ΑΠΕ και περιβάλλον

Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΤΙΚΕΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΚΤΙΡΙΩΝ

Ελευθερία Αλεξανδρή[1], Ανδρέας Ανδρουτσόπουλος[2*]

[1] Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
[2*] Τμήμα Κτιρίων, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ), 19ο χλμ. Λεωφ. Μαραθώνος, 19009 Πικέρμι, e-mail: aandr@cres.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο παρόν πόνημα εξετάζεται η επιρροή των χαρακτηριστικών διαφόρων Η/Μ συστημάτων, τα οποία ορίζονται από την πιστοποίηση περιβαλλοντικών και ενεργειακών κριτηρίων στην ενεργειακή κατάταξη των κτιρίων.

Στόχος της εργασίας είναι να εξετάσει τη συμβολή των αποδοτικών Η/Μ συστημάτων που υπάρχουν στην αγορά και την αποτελεσματικότητά τους στην εξοικονόμηση ενέργειας υφιστάμενων κτιρίων ως προς τις ενεργειακές τους ανάγκες, την ενεργειακή τους κατηγορία στο πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης, την εξοικονόμηση ενέργειας, τη μείωση του λειτουργικού κόστους, των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, του αρχικού κόστους επένδυσης και την περίοδο απόσβεσης της επένδυσης.

Η εργασία εστιάζει σε ένα κτίριο μονοκατοικίας, όπου, ανάλογα με το χρόνο κατασκευής του, το κτίριο έχει τα θερμικά χαρακτηριστικά τυπικής κατασκευής α) πριν τον Κανονισμό Θερμομόνωσης, β) κατά τον Κανονισμό Θερμομόνωσης και γ) κατά τον Κανονισμό ΕΝεργειακής Απόδοσης Κτιρίων, εκπονείται παραμετρική ανάλυση παρεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας στο κτίριο στις τέσσερις κλιματικές ζώνης, επικεντρώνοντας σε Η/Μ συστήματα με πιστοποίηση ecolabel. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται μεταξύ τους τόσο ως προς την επιτυγχανόμενη εξοικονόμηση ενέργειας και τα υπόλοιπα κριτήρια που έχει στη διάθεσή του ο ενεργειακός επιθεωρητής και, κυρίως, ως προς τη βελτίωση της ενεργειακής κατηγορίας του κτιρίου καθώς και ως προς το χρόνο απόσβεσης της κάθε επέμβασης. Παράλληλα, προκειμένου να ιεραρχηθούν τα συγκεκριμένα κριτήρια γίνεται μια μικρή έρευνα πάνω στις σχετικές απόψεις των μηχανικών και ενεργειακών επιθεωρητών.

Με βάση την ανάλυση εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τις πιο συμφέρουσες επεμβάσεις, τόσο από πλευράς εξοικονόμησης ενέργειας, αλλά και από πλευράς επένδυσης και αλλαγής ενεργειακής κατάταξης, με την ιεράρχηση των κριτηρίων που προτείνουν οι μηχανικοί. Βάσει των αποτελεσμάτων δίνονται κατευθυντήριες οδηγίες για τις καταλληλότερες επεμβάσεις στις Η/Μ εγκαταστάσεις ή στο κέλυφος, ανάλογα με την κατασκευή και την κλιματική ζώνη.

Λέξεις Κλειδιά: eco label, eco design, υφιστάμενα κτίρια, ενεργειακή κατηγορία, εξοικονόμηση ενέργειας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με την τελευταία απογραφή (2011), οι κατοικίες αποτελούν το 79.2% του κτιριακού αποθέματος της χώρας [1]. Από αυτές, το 38.6% είναι μονοκατοικίες [2], ενώ τα ισόγεια κτίρια αποτελούν το 51.5% του συνόλου των κτιρίων της Ελλάδας [1]. Βάσει της απογραφής, το 53.7% των μονοκατοικιών δεν έχει κανενός είδους θερμική θωράκιση, ούτε στα διαφανή, ούτε στα αδιαφανή στοιχεία [2]. Η έλλειψη θερμικής θωράκισης μειώνεται μετά τη θέσπιση του Κανονισμού Θερμομόνωσης σταδιακά, από το 41.5% των κτιρίων που ανεγέρθηκαν την περίοδο 1981-1990 σε 7.8% την περίοδο μετά το 2006 (ibid).

Τα νοικοκυριά της Ελλάδας καταναλώνουν κατά μέσο όρο 13994kWh ετησίως [3], προκειμένου να καλύψουν τις ενεργειακές τους ανάγκες. Είναι υπεύθυνα για το 36% της ηλεκτρικής κατανάλωσης στο σύνολο της χώρας (18878GWh για το 2012) [4], ενώ την ίδια χρονιά παράγουν 6.95Mt CO_2, που αντιστοιχεί στο 8% του συνόλου της χώρας [4]. Όσον αφορά την πηγή ενέργειας για θέρμανση, εκείνες που χρησιμοποιούνται περισσότερο το 2011 είναι το πετρέλαιο (66.7%), ακολουθούμενο από τον ηλεκτρισμό (8.7%), το φυσικό αέριο (8.5%) και τη βιομάζα (5.7%), ενώ το 4.8% των κατοικιών δεν θερμαίνεται [2]. Το Ζεστό Νερό Χρήσης θερμαίνεται κυρίως με ηλεκτρισμό (49.5%), ηλιακή ενέργεια (32.7%), πετρέλαιο (10.1%) και φυσικό αέριο (4.1%) [4].

Η μείωση του εισοδήματος, σε συνάρτηση με τις αυξημένες ανάγκες κατανάλωσης ενέργειας για την επίτευξη της αίσθησης θερμικής άνεσης στην πλειοψηφία των Ελληνικών κατοικιών, οδηγεί σε ενεργειακή φτώχεια. Βάσει δειγματοληπτικής έρευνας του [5], στη Βόρειο Ελλάδα, το 62.4% του πληθυσμού του δείγματος βρίσκεται σε κατάσταση ενεργειακής φτώχειας[1] το 2012, ενώ σε πολλές περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα στο Δήμο Αθηναίων, παρατηρείται μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στις κατοικίες την περίοδο 2008-2015 [6], με παράλληλη μείωση της αίσθησης θερμικής άνεσης και υγιεινής, ιδιαίτερα σε κατασκευές χωρίς θερμική θωράκιση. Οι επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας στο κτίριο καθώς και η χρήση συστημάτων ΑΠΕ, παρά το αρχικά σχετικά υψηλό τους κόστος, μπορούν να συμβάλλουν θετικά στην αντιμετώπιση της ενεργειακής φτώχειας, προσφέροντας μακροπρόθεσμα οφέλη εξοικονόμησης ενέργειας και χρημάτων [7].

Με βάση τα παραπάνω, είναι σημαντικό να εξεταστούν παραμετρικά, με βάση όχι μόνο ενεργειακά, αλλά και περιβαλλοντικά, κοινωνικά και οικονομικά κριτήρια, οι επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας στις μονοκατοικίες στην Ελλάδα. Πέραν των τυπικών επεμβάσεων εξοικονόμησης ενέργειας στο κτιριακό κέλυφος (θερμομόνωση αδιαφανών στοιχείων, αντικατάσταση διαφανών με ενεργειακώς πιο αποδοτικά στοιχεία), η παρούσα εργασία εστιάζει στα ενεργειακώς αποδοτικά Η/Μ συστήματα (σήμανση 'ecolabel') και στην επιρροή που έχουν τόσο στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου και την αλλαγή κατηγορίας στο ενεργειακό πιστοποιητικό, όσο και στη βελτίωση των περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών κριτηρίων που αναλύονται παρακάτω.

Η περιβαλλοντική σήμανση και ο ενεργειακός σχεδιασμός προϊόντων αποτελούν μια από τις προτεραιότητες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, προκειμένου να μειώσει τις καταναλώσεις ενέργειάς της και την εκπομπή βλαβερών για την υγεία ουσιών στην ατμόσφαιρα. Έτσι, η ΕΕ έχει εκδώσει πληθώρα Οδηγιών, Κανονισμών και Αποφάσεων που προωθούν προϊόντα τα οποία μπορούν να συμβάλλουν στην εξοικονόμηση ενέργειας και στον περιορισμό των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους [8,9,10,11]. Για τα προϊόντα που καταναλώνουν ενέργεια έχουν εκδοθεί δεσμευτικοί όροι που καθορίζουν την ενέργεια που επιτρέπεται να καταναλώνουν και κατηγοριοποιείται η ενεργειακή τους αποδοτικότητα. Επί παραδείγματι, έχουν εκδοθεί αρχές ενεργειακού σχεδιασμού για λευκές συσκευές, κυκλοφορητές, κινητήρες, ανεμιστήρες αερισμού, κ.ά. Στην παρούσα έρευνα γίνεται προσπάθεια ένταξης αυτών των ενεργειακών χαρακτηριστικών σε στοιχεία που έχουν άμεση επίπτωση στην ενεργειακή απόδοση και στην ενεργειακή κατάταξη ενός κτιρίου και πιο συγκεκριμένα για λέβητες θέρμανσης, αντλίες θερμότητας, θερμαντήρες νερού, δίνοντας έμφαση στα ενεργειακά αποδοτικά στοιχεία. Καθώς η επέμβαση σε Η/Μ στοιχεία είναι πιο απλή και λιγότερο δαπανηρή ως προς τις απαιτούμενες τροποποιήσεις στις εγκαταστάσεις στις μονοκατοικίες σε σχέση με τις πολυκατοικίες και καθώς, όπως προαναφέρθηκε, περίπου το 1/3 των κατοικιών της χώρας είναι μονοκατοικίες, η παρούσα εργασία εστιάζει στις συγκεκριμένες επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας στις μονοκατοικίες, εξετάζοντας τες με τη χρήση έξι κριτηρίων που είναι διαθέσιμα στους μηχανικούς και τους ενεργειακούς επιθεωρητές από το επίσημο λογισμικό για την ενεργειακή επιθεώρηση και μελέτη.

[1] Ως ενεργειακή φτώχεια στη συγκεκριμένη έρευνα ορίζεται η κατάσταση του νοικοκυριού που δαπανά πάνω από το 10% του εισοδήματός του για να καλύψει τους λογαριασμούς θέρμανσης χώρου [5].

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση της σήμανσης 'ecolabel' σε μια μονοκατοικία, επιλέγεται μια τυπική, πανταχόθεν ελεύθερη, ισόγεια κατοικία, με υπόγειο Μη Θερμαινόμενο Χώρο (Εικόνα 1), που σκιάζεται από τον περιβάλλοντα χώρο της και δεν διαθέτει εξωτερικά σκίαστρα. Η κατοικία αυτή εξετάζεται με τα θερμικά χαρακτηριστικά του κελύφους τριών περιόδων: α) αμόνωτη (πριν τον Κανονισμό Θερμομόνωσης Κτιρίων), β) θερμομονωμένη με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ελάχιστων απαιτήσεων του (περίοδος 1979-2010) [12], γ) θερμομονωμένη με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ελάχιστων απαιτήσεων του [13] ως προς το κέλυφος[2] (από το 2010 έως το 2017), για τις τέσσερις κλιματικές ζώνες της χώρας, όπως έχουν χαρακτηριστεί κατά [13]. Για την Α κλιματική ζώνη εισάγονται τα κλιματικά δεδομένα του Ηρακλείου Κρήτης, για τη Β εκείνα της Αθήνας, για τη Γ της Θεσσαλονίκης και για τη Δ της Κοζάνης. Για κάθε μία από τις δώδεκα περιπτώσεις εξετάζονται τα έντεκα σενάρια που φαίνονται στον πίνακα 1. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του κάθε σεναρίου φαίνονται στον πίνακα 2, για τις Α, Β, Γ και Δ κλιματικές ζώνες και επιλέγονται βάσει προϊόντων (δομικών και Η/Μ) που βρίσκονται στην Ελληνικά αγορά σχετικά εύκολα. Στο μηδενικό σενάριο (κτίριο ως έχει), το κτίριο θερμαίνεται με λέβητα πετρελαίου και ψύχεται (το 50% της Θερμαινόμενης Ζώνης) με τοπικό αερόψυκτο ψύκτη, ενώ δεν διαθέτει κανένα σύστημα αυτοματισμού ή ανεμιστήρα οροφής. Ο βαθμός απόδοσης του συστήματος θέρμανσης θεωρείται χαμηλός, ομοίως και ο δείκτης ενεργειακής αποδοτικότητας του συστήματος ψύξης (βλ. πίνακα 2)[3]. Το ΖΝΧ παράγεται από τοπικό ηλεκτρικό θερμαντήρα, ισχύος 4kW, ενώ ο φυσικός αερισμός και τα φορτία του φωτισμού είναι βάσει της [14]. Στα σενάρια ενεργειακής αναβάθμισης με αντλία θερμότητας για θέρμανση και ψύξη (Σενάρια 4, 5, 6, 9), θεωρείται ότι τοποθετούνται δύο αντλίες θερμότητας, με τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά (πίνακας 2), με ενεργειακή κατηγορία Α+ ως προς τη θέρμανση και Α++ ως προς την ψύξη. Στα Σενάρια 7, 8 και 10 τοποθετείται λέβητας συμπύκνωσης φυσικού αερίου για θέρμανση, ενεργειακής κατηγορίας Α+, καθώς και θερμομόνωση στο δίκτυο διανομής βάσει κτιρίου αναφοράς [14] και αντλία θερμότητας για ψύξη με τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά των προηγούμενων σεναρίων, η οποία όμως δεν χρησιμοποιείται για θέρμανση. Σε όλες τις περιπτώσεις θεωρείται ότι ψύχεται το 50% της θερμαινόμενης ζώνης. Στα σενάρια 3,6,9,10 τοποθετούνται 3.76m^2 επιλεκτικού, επίπεδου, μη σκιαζόμενου ηλιακού συλλέκτη για την παραγωγή Ζεστού Νερού Χρήσης. Οι διατάξεις ελέγχου και αυτοματισμών θεωρούνται κατηγορίας Β, βάσει της [14] στα Σενάρια 4-10, ενώ είναι κατηγορίας Δ στα Σενάρια 0-3.

Πίνακας 1: Περιγραφή σεναρίων

Αρ. σεναρίου	Σύντομη περιγραφή
Σενάριο 0	Κτίριο ως έχει
Σενάριο 1	Βελτίωση κελύφους, βάσει πίν. Γ2 [15]
Σενάριο 2	Βελτίωση κελύφους, βάσει πίν. Γ1 [15]
Σενάριο 3	Τοποθέτηση επιλεκτικού επίπεδου ηλιακού συλλέκτη για ΖΝΧ
Σενάριο 4	Τοποθέτηση αποδοτικής αντλίας θερμότητας για θέρμανση (Α+) και ψύξη (Α++)
Σενάριο 5	Συνδυασμός Σεν. 1 (βελτίωση κελύφους) & Σεν. 4 (αντλία θερμότητας)
Σενάριο 6	Συνδυασμός Σεν. 3 & Σεν. 4 (ηλιακός συλλέκτης και αντλία θερμότητας)
Σενάριο 7	Τοποθέτηση λέβητα συμπύκνωσης φυσικού αερίου για θέρμανση (Α+) και αποδοτικής αντλίας θερμότητας για ψύξη (Α++)
Σενάριο 8	Συνδυασμός Σεν. 1 (βελτίωση κελύφους) & Σεν. 7 (λέβητας για θέρμανση, αντλία θερμότητας για ψύξη)
Σενάριο 9	Συνδυασμός Σεν. 1 (βελτιωμένο κέλυφος) & Σεν. 6 (ηλιακός συλλέκτης για ΖΝΧ και αντλία θερμότητας για θέρμανση και ψύξη)
Σενάριο 10	Συνδυασμός Σεν. 8 (βελτιωμένο κέλυφος, λέβητας για θέρμανση, αντλία θερμότητας για ψύξη) & Σεν. 7 (ηλιακός συλλέκτης για ΖΝΧ)

[2] Στην περίπτωση των σεναρίων όπου το κέλυφός τους προκύπτει είτε από το [12] είτε από το [13], για λόγους σύγκρισης δεν θεωρούνται οι τιμές των συντελεστών θερμοπερατότητας των διαφόρων στοιχείων του κελύφους που θα προέκυπταν από τον έλεγχο θερμομονωτικής επάρκειας, αλλά οι μέγιστες απαιτήσεις του κάθε κανονισμού.

[3] Αν και βάσει των απαιτήσεων του [13] δεν μπορούν να εφαρμοσθούν τέτοια συστήματα και να επιτευχθεί ενεργειακή κατηγορία "Β", θεωρείται, για λόγους σύγκρισης των περιπτώσεων, ότι ο [13] έχει εφαρμοσθεί μόνο ως προς τις προδιαγραφές του κελύφους.

Πίνακας 2: Τεχνικά χαρακτηριστικά – παραδοχές σεναρίων[4]

Περιπτώσεις:		Κέλυφος κτιρίου βάσει ΚΕΝΑΚ/2010						Κέλυφος κτιρίου βάσει ΚΘΚ						Κέλυφος κτιρίου πριν τον ΚΘΚ (χωρίς θερμική θωράκιση)						Για όλες τις περιπτώσεις			
Τεχνικά χαρακτηριστικά:		Συντελεστής θερμοπερατότητας (W/m²K)					Συντελεστής θερμικών ηλιακών απολαβών ανοιγμάτων	Συντελεστής θερμοπερατότητας (W/m²K)					Συντελεστής θερμικών ηλιακών απολαβών ανοιγμάτων	Συντελεστής θερμοπερατότητας (W/m²K)					Συντελεστής θερμικών ηλιακών απολαβών ανοιγμάτων				
Στοιχεία:		Εξωτερικής ταχυπαίας	Εξωτερικού Φ.Ο.	Οροφής	Δαπέδου προς ΜΘΧ	Ανοιγμάτων		Εξωτερικής ταχυπαίας	Εξωτερικού Φ.Ο.	Οροφής	Δαπέδου προς ΜΘΧ	Ανοιγμάτων		Εξωτερικής τοιχοπαίας	Εξωτερικού Φ.Ο.	Οροφής	Δαπέδου προς ΜΘΧ	Ανοιγμάτων		Β.Α. λέβητα	EER ανελλίκτ. θερμάντρας	COP ανελλίκτ. θερμάντρας	Εμβαδόν επιλεκτικού ηλιακού συλλέκτη
Κλιματική ζώνη Α	Σενάριο 0	0.60	0.60	0.50	1.20	3.20	0.54	0.70	0.70	0.50	3.00	4.50	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	0.80	1.50	-	-
	Σενάριο 1	-	-	-	-	-	-	0.60	0.60	0.50	1.20	3.20	0.54	0.60	0.60	0.50	1.20	3.20	0.54	0.80	1.50	-	-
	Σενάριο 2	0.55	0.55	0.45	1.10	0.90	0.54	0.55	0.55	0.45	1.10	2.80	0.54	0.55	0.55	0.45	1.10	2.80	0.54	0.80	1.50	-	-
	Σενάριο 3	0.60	0.60	0.50	1.20	4.30	0.54	0.70	0.70	0.50	3.00	4.50	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	0.80	1.50	-	3.76
	Σενάριο 4	0.60	0.60	0.50	1.20	0.00	0.54	0.70	0.70	0.50	3.00	4.50	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	-	4.00	6.20	-
	Σενάριο 5	-	-	-	-	-	-	0.60	0.60	0.50	1.20	3.20	0.54	0.60	0.60	0.50	1.20	3.20	0.54	-	4.00	6.20	-
	Σενάριο 6	0.60	0.60	0.50	1.20	0.00	0.54	0.70	0.70	0.50	3.00	4.50	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	-	4.00	6.20	3.76
	Σενάριο 7	0.60	0.60	0.50	1.20	0.00	0.54	0.70	0.70	0.50	3.00	4.50	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	1.13	4.00	-	-
	Σενάριο 8	-	-	-	-	-	-	0.60	0.60	0.50	1.20	3.20	0.54	0.60	0.60	0.50	1.20	3.20	0.54	1.13	4.00	-	-
	Σενάριο 9	-	-	-	-	-	-	0.60	0.60	0.50	1.20	3.20	0.54	0.60	0.60	0.50	1.20	3.20	0.54	-	4.00	6.20	3.76
	Σενάριο 10	0.60	0.60	0.50	1.20	0.00	0.54	0.60	0.60	0.50	1.20	3.20	0.54	0.60	0.60	0.50	1.20	3.20	0.54	1.13	4.00	-	3.76
Κλιματική ζώνη Β	Σενάριο 0	0.50	0.50	0.45	0.90	3.00	0.54	0.50	0.50	0.45	0.90	3.00	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	0.80	1.50	-	-
	Σενάριο 1	-	-	-	-	-	-	0.45	0.45	0.40	0.80	2.60	0.54	0.50	0.50	0.45	0.90	3.00	0.54	0.80	1.50	-	-
	Σενάριο 2	0.45	0.45	0.40	0.80	2.60	0.54	0.70	0.70	0.50	1.90	4.50	0.54	0.45	0.45	0.40	0.80	2.60	0.54	0.80	1.50	-	-
	Σενάριο 3	0.50	0.50	0.45	0.90	3.00	0.54	0.70	0.70	0.50	1.90	4.50	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	0.80	1.50	-	3.76
	Σενάριο 4	0.50	0.50	0.45	0.90	3.00	0.54	0.50	0.50	0.45	0.90	3.00	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	-	4.00	0.00	0.00
	Σενάριο 5	-	-	-	-	-	-	0.70	0.70	0.50	1.90	4.50	0.54	0.50	0.50	0.45	0.90	3.00	0.54	-	4.00	0.00	0.00
	Σενάριο 6	0.50	0.50	0.45	0.90	3.00	0.54	0.70	0.70	0.50	1.90	4.50	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	-	4.00	0.00	3.76
	Σενάριο 7	0.50	0.50	0.45	0.90	3.00	0.54	0.50	0.50	0.45	0.90	3.00	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	1.13	4.00	-	-
	Σενάριο 8	-	-	-	-	-	-	0.50	0.50	0.45	0.90	3.00	0.54	0.50	0.50	0.45	0.90	3.00	0.54	1.13	4.00	-	-
	Σενάριο 9	-	-	-	-	-	-	0.50	0.50	0.45	0.90	3.00	0.54	0.50	0.50	0.45	0.90	3.00	0.54	-	4.00	6.20	3.76
	Σενάριο 10	0.50	0.50	0.45	0.90	3.00	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.50	0.50	0.45	0.90	3.00	0.54	1.13	4.00	-	3.76
Κλιματική ζώνη Γ	Σενάριο 0	0.45	0.45	0.40	0.75	2.80	0.54	0.70	0.70	0.50	0.70	4.50	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	0.80	1.50	-	-
	Σενάριο 1	-	-	-	-	-	-	0.45	0.45	0.40	**0.70**	2.80	0.54	0.45	0.45	0.40	0.75	2.80	0.54	0.80	1.50	-	-
	Σενάριο 2	0.40	0.40	0.35	0.65	2.40	0.54	0.40	0.40	0.35	0.65	2.40	0.54	0.40	0.40	0.35	0.65	2.40	0.54	0.80	1.50	-	-
	Σενάριο 3	0.45	0.45	0.40	0.75	2.80	0.54	0.70	0.70	0.50	0.70	4.50	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	0.80	1.50	-	3.76
	Σενάριο 4	0.45	0.45	0.40	0.75	2.80	0.54	0.70	0.70	0.50	0.70	4.50	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	-	4.00	6.20	-
	Σενάριο 5	-	-	-	-	-	-	0.45	0.45	0.40	0.70	2.80	0.54	0.45	0.45	0.40	0.75	2.80	0.54	-	4.00	6.20	-
	Σενάριο 6	0.45	0.45	0.40	0.75	2.80	0.54	0.70	0.70	0.50	0.70	4.50	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	-	4.00	6.20	3.76
	Σενάριο 7	0.45	0.45	0.40	0.75	2.80	0.54	0.70	0.70	0.50	0.70	4.50	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	1.13	4.00	-	-
	Σενάριο 8	-	-	-	-	-	-	0.45	0.45	0.40	0.70	2.80	0.54	0.45	0.45	0.40	0.75	2.80	0.54	1.13	4.00	-	-
	Σενάριο 9	-	-	-	-	-	-	0.45	0.45	0.40	0.70	2.80	0.54	0.45	0.45	0.40	0.75	2.80	0.54	-	4.00	6.20	3.76
	Σενάριο 10	0.45	0.45	0.40	0.75	2.80	0.54	0.45	0.45	0.40	0.70	2.80	0.54	0.45	0.45	0.40	0.75	2.80	0.54	1.13	4.00	-	3.76
Κλιματική ζώνη Δ	Σενάριο 0	0.40	0.40	0.35	0.70	2.60	0.54	0.70	0.70	0.50	0.70	4.50	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	0.80	1.50	-	-
	Σενάριο 1	-	-	-	-	-	-	0.40	0.40	0.35	0.70	2.60	0.54	0.40	0.40	0.35	0.70	2.60	0.54	0.80	1.50	-	-
	Σενάριο 2	0.35	0.35	0.30	0.60	2.20	0.54	0.35	0.35	0.30	0.60	2.20	0.54	0.35	0.35	0.30	0.60	2.20	0.54	0.80	1.50	-	-
	Σενάριο 3	0.40	0.40	0.35	0.70	2.60	0.54	0.70	0.70	0.50	0.70	4.50	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	0.80	1.50	-	3.76
	Σενάριο 4	0.40	0.40	0.35	0.70	2.60	0.54	0.70	0.70	0.50	0.70	4.50	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	-	4.00	0.00	0.00
	Σενάριο 5	-	-	-	-	-	-	0.40	0.40	0.35	0.70	2.60	0.54	0.40	0.40	0.35	0.70	2.60	0.54	-	4.00	0.00	0.00
	Σενάριο 6	0.40	0.40	0.35	0.70	2.60	0.54	0.70	0.70	0.50	0.70	4.50	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	-	4.00	0.00	3.76
	Σενάριο 7	0.40	0.40	0.35	0.70	2.60	0.54	0.70	0.70	0.50	0.70	4.50	0.54	2.20	3.40	3.05	2.00	6,00-6,20	0,46-0,62	1.13	4.00	-	-
	Σενάριο 8	-	-	-	-	-	-	0.40	0.40	0.35	0.70	2.60	0.54	0.40	0.40	0.35	0.70	2.60	0.54	1.13	4.00	-	-
	Σενάριο 9	-	-	-	-	-	-	0.40	0.40	0.35	0.70	2.60	0.54	0.40	0.40	0.35	0.70	2.60	0.54	-	4.00	6.20	3.76
	Σενάριο 10	0.40	0.40	0.35	0.70	2.60	0.54	0.40	0.40	0.35	0.70	2.60	0.54	0.40	0.40	0.35	0.70	2.60	0.54	1.13	4.00	-	3.76

* Καθώς στη Γ' κλιματική ζώνη ο συντελεστής θερμοπερατότητας κατά τον πίνακα Γ.2 του [15] είναι μεγαλύτερος από εκείνον του [12] (0.75W/m²K), διατηρείται η τιμή του [12] στο Σενάριο 1 και στα αντίστοιχα σενάρια που προκύπτουν από αυτό.

[4] Είναι πασιφανές πως το Σενάριο 1 ταυτίζεται με το Σενάριο 0 για τα κτίρια της περίπτωσης του κτιριακού κελύφους με τα χαρακτηριστικά του [13], καθώς οι τιμές των μέγιστων επιτρεπόμενων συντελεστών θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων ανά κλιματική ζώνη του πίνακα Γ.1 του [13] ταυτίζεται με εκείνες του πίνακα Γ.2 του [15]. Για το λόγο αυτό, το Σενάριο 1, σε αυτή την περίπτωση παραλείπεται και στις τέσσερις κλιματικές ζώνες. Ομοίως ταυτίζονται το Σενάριο 4 με το Σενάριο 5, το Σενάριο 7 με το Σενάριο 8 και το Σενάριο 6 με το Σενάριο 9.

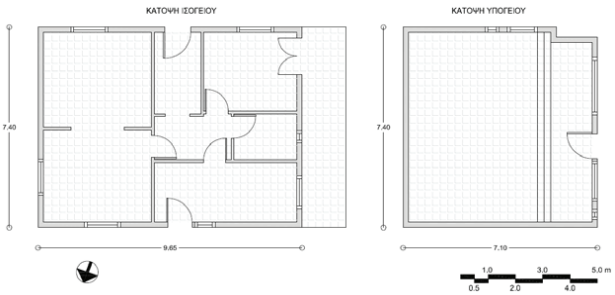
Πίνακας 3: Θεωρούμενα κόστη σεναρίων

Περιπτώσεις		Κέλυφος κτιρίου βάσει ΚΕΝΑΚ/2010					Κέλυφος κτιρίου βάσει ΚΘΚ					Κέλυφος κτιρίου πριν τον ΚΘΚ (χωρίς θερμική θωράκιση)					Για όλες τις περιπτώσεις:		
Στοιχεία:		Εξωτερική τοιχοποιία (€/m²)	Εξωτερικός ΦΟ (€/m²)	Οροφή (€/m²)	Δάπεδο προς ΜΘΧ (€/m²)	Ανοίγματα (€/m²)	Εξωτερική τοιχοποιία (€/m²)	Εξωτερικός ΦΟ (€/m²)	Οροφή (€/m²)	Δάπεδο προς ΜΘΧ (€/m²)	Ανοίγματα (€/m²)	Εξωτερική τοιχοποιία (€/m²)	Εξωτερικός ΦΟ (€/m²)	Οροφή (€/m²)	Δάπεδο προς ΜΘΧ (€/m²)	Ανοίγματα (€/m²)	Αντλία θερμότητας (€/τεμάχιο)	Λέβητας (€/τεμάχιο)	Ηλιακός συλλέκτης (€/m²)
Κτίριο Ζώνη Α - κύριος (€/m²)	Σενάριο 1	-	-	-	-	245.00 €	35.10 €	35.10 €	-	31.45 €	245.00 €	35.10 €	36.10 €	43.00 €	31.45 €	245.00 €	-	-	-
	Σενάριο 2	35.10 €	35.10 €	39.95 €	31.45 €	255.00 €	35.10 €	35.10 €	39.95 €	31.45 €	255.00 €	36.10 €	36.10 €	45.80 €	31.45 €	255.00 €	-	-	-
	Σενάριο 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	240.00 €
	Σενάριο 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	700.00 €	-	-
	Σενάριο 5	-	-	-	-	245.00 €	35.10 €	35.10 €	-	31.45 €	245.00 €	35.10 €	36.10 €	43.00 €	31.45 €	245.00 €	700.00 €	-	-
	Σενάριο 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	700.00 €	-	240.00 €
	Σενάριο 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	700.00 €	3,360.00 €	-
	Σενάριο 8	-	-	-	-	245.00 €	35.10 €	35.10 €	-	31.45 €	245.00 €	35.10 €	36.10 €	43.00 €	31.45 €	245.00 €	700.00 €	3,360.00 €	-
	Σενάριο 9	-	-	-	-	245.00 €	35.10 €	35.10 €	-	31.45 €	245.00 €	35.10 €	36.10 €	43.00 €	31.45 €	245.00 €	700.00 €	-	240.00 €
	Σενάριο 10	-	-	-	-	245.00 €	35.10 €	35.10 €	-	31.45 €	245.00 €	35.10 €	36.10 €	43.00 €	31.45 €	245.00 €	-	3,360.00 €	240.00 €
Κτίριο Ζώνη Β - κύριος (€/m²)	Σενάριο 1	-	-	-	-	-	35.10 €	35.10 €	39.95 €	31.45 €	250.00 €	37.40 €	37.40 €	45.80 €	31.45 €	250.00 €	-	-	-
	Σενάριο 2	35.10 €	35.10 €	39.95 €	31.45 €	260.00 €	35.10 €	35.10 €	39.95 €	31.45 €	260.00 €	39.90 €	39.90 €	50.00 €	31.45 €	260.00 €	-	-	-
	Σενάριο 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	240.00 €
	Σενάριο 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	700.00 €	-	-
	Σενάριο 5	-	-	-	-	-	35.10 €	35.10 €	39.95 €	31.45 €	250.00 €	37.40 €	37.40 €	45.80 €	31.45 €	250.00 €	700.00 €	-	-
	Σενάριο 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	700.00 €	-	240.00 €
	Σενάριο 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	700.00 €	3,360.00 €	-
	Σενάριο 8	-	-	-	-	-	35.10 €	35.10 €	39.95 €	31.45 €	250.00 €	37.40 €	37.40 €	45.80 €	31.45 €	250.00 €	700.00 €	3,360.00 €	-
	Σενάριο 9	-	-	-	-	-	35.10 €	35.10 €	39.95 €	31.45 €	250.00 €	37.40 €	37.40 €	45.80 €	31.45 €	250.00 €	700.00 €	-	240.00 €
	Σενάριο 10	-	-	-	-	-	35.10 €	35.10 €	39.95 €	31.45 €	250.00 €	37.40 €	37.40 €	45.80 €	31.45 €	250.00 €	- €	3,360.00 €	240.00 €
Κτίριο Ζώνη Γ - κύριος (€/m²)	Σενάριο 1	-	-	-	-	-	35.10 €	35.10 €	39.95 €	-	255.00 €	37.40 €	38.40 €	48.90 €	33.10 €	255.00 €	-	-	-
	Σενάριο 2	35.10 €	35.10 €	39.95 €	31.45 €	265.00 €	35.10 €	35.10 €	39.95 €	31.45 €	265.00 €	38.40 €	39.90 €	52.80 €	33.10 €	265.00 €	-	-	-
	Σενάριο 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	240.00 €
	Σενάριο 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	700.00 €	-	-
	Σενάριο 5	-	-	-	-	-	35.10 €	35.10 €	39.95 €	-	255.00 €	37.40 €	38.40 €	48.90 €	33.10 €	255.00 €	700.00 €	-	-
	Σενάριο 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	700.00 €	-	240.00 €
	Σενάριο 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	700.00 €	3,360.00 €	-
	Σενάριο 8	-	-	-	-	-	35.10 €	35.10 €	39.95 €	-	255.00 €	37.40 €	38.40 €	48.90 €	33.10 €	255.00 €	700.00 €	3,360.00 €	-
	Σενάριο 9	-	-	-	-	-	35.10 €	35.10 €	39.95 €	-	255.00 €	37.40 €	38.40 €	48.90 €	33.10 €	255.00 €	700.00 €	-	240.00 €
	Σενάριο 10	-	-	-	-	-	35.10 €	35.10 €	39.95 €	-	255.00 €	37.40 €	38.40 €	48.90 €	33.10 €	255.00 €	- €	3,360.00 €	240.00 €
Κτίριο Ζώνη Δ - κύριος (€/m²)	Σενάριο 1	-	-	-	-	260.00 €	35.10 €	35.10 €	39.95 €	-	260.00 €	38.40 €	39.90 €	50.00 €	31.45 €	260.00 €	-	-	-
	Σενάριο 2	35.10 €	35.10 €	39.95 €	31.45 €	270.00 €	36.10 €	36.10 €	41.60 €	31.45 €	270.00 €	41.40 €	41.40 €	52.80 €	33.10 €	270.00 €	-	-	-
	Σενάριο 3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	240.00 €
	Σενάριο 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	700.00 €	-	-
	Σενάριο 5	-	-	-	-	260.00 €	35.10 €	35.10 €	39.95 €	-	260.00 €	38.40 €	39.90 €	50.00 €	31.45 €	260.00 €	700.00 €	-	-
	Σενάριο 6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	700.00 €	-	240.00 €
	Σενάριο 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	700.00 €	3,360.00 €	-
	Σενάριο 8	-	-	-	-	260.00 €	35.10 €	35.10 €	39.95 €	-	260.00 €	38.40 €	39.90 €	50.00 €	31.45 €	260.00 €	700.00 €	3,360.00 €	-
	Σενάριο 9	-	-	-	-	260.00 €	35.10 €	35.10 €	39.95 €	-	260.00 €	38.40 €	39.90 €	50.00 €	31.45 €	260.00 €	700.00 €	-	240.00 €
	Σενάριο 10	-	-	-	-	260.00 €	35.10 €	35.10 €	39.95 €	-	260.00 €	38.40 €	39.90 €	50.00 €	31.45 €	260.00 €	- €	3,360.00 €	240.00 €

Το κόστος της κάθε επέμβασης εξοικονόμησης ενέργειας για κάθε σενάριο σε κάθε περίπτωση κτιρίου και κλιματικής ζώνης εκτιμάται βάσει του [16], καθώς και από πληροφορίες από αντίστοιχες εταιρείες (τηλεφωνικές και διαδικτυακές). Πιο συγκεκριμένα, για την κοστολόγηση των θερμομονώσεων (εξωτερικών τοιχοποιιών, οροφής και δαπέδου θερμαινόμενου χώρου), υπολογίζεται το πάχος πετροβάμβακα[5], με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λ=0.036W/mK, που μειώνει το συντελεστή θερμοπερατότητας του κάθε στοιχείου από εκείνον που θεωρείται στο Σενάριο 0, στον αντίστοιχο που θεωρείται σε κάθε σενάριο, όπως φαίνεται στον πίνακα 2, ενώ λαμβάνονται υπόψη, τόσο στον υπολογισμό του κόστους, όσο και στον υπολογισμό του συντελεστή θερμοπερατότητας οι νέες στρώσεις που είναι απαραίτητες σε κάθε δομικό στοιχείο (επίχρισμα, επικαλύψεις κοκ), βάσει και των κατασκευαστικών λεπτομερειών που προτείνονται στη [17] και των αντίστοιχων οικοδομικών εργασιών. Για τα Η/Μ συστήματα λαμβάνεται υπόψη και το κόστος εγκατάστασης, βάσει και του [16], ενώ δεν λαμβάνεται υπ'όψη το κόστος αποξήλωσης και απομάκρυνσης των υφιστάμενων εγκαταστάσεων. Το κόστος της κάθε επέμβασης φαίνεται στον πίνακα 3.

Η ενεργειακή συμπεριφορά της μονοκατοικίας προσομοιώνεται στο πρόγραμμα ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ, με τις παραδοχές που ορίζονται στις [14] και [18]. Ομοίως, ο υπολογισμός της περιόδου αποπληρωμής και του λειτουργικού κόστους γίνεται βάσει της μεθοδολογίας του προγράμματος. Επιλέχθηκε το συγκεκριμένο λογισμικό, καθώς είναι το επίσημο λογισμικό του ελληνικού κράτους για την έκδοση ενεργειακού πιστοποιητικού και για την ενεργειακή κατηγοριοποίηση των κτιρίων, το οποίο είναι και ένα από τα θέματα που εξετάζει η παρούσα έρευνα.

[5] Εάν το υπολογιζόμενο πάχος θερμομόνωσης δεν υπάρχει στην αγορά, γίνεται υπολογισμός του κόστους βάσει του αμέσως μεγαλύτερου διαθέσιμου πάχους, ενώ ως συντελεστής θερμοπερατότητας λαμβάνεται εκείνος που προδιαγράφεται από τους αντίστοιχους κανονισμούς.



Εικόνα 1: Κάτοψη μονοκατοικίας (ισογείου) και Μη Θερμαινόμενου Χώρου (υπογείου)

Τα αποτελέσματα αξιολογούνται βάσει ενεργειακών, οικονομικών, κοινωνικών και περιβαλλοντικών κριτηρίων. Στα ενεργειακά κριτήρια λαμβάνονται υπόψη η εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας και η αλλαγή της ενεργειακής κατηγορίας στο Πιστοποιητικό Ενεργειακής Απόδοσης. Ως περιβαλλοντικό κριτήριο επιλέγεται η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Ως κοινωνικό κριτήριο λαμβάνεται η μείωση του λειτουργικού κόστους, ενώ τα οικονομικά κριτήρια που εξετάζονται είναι το αρχικό κόστος επένδυσης και η περίοδος αποπληρωμής της. Επιλέγονται τα συγκεκριμένα κριτήρια, καθώς είναι εκείνα που προκύπτουν ποσοτικά από το πρόγραμμα ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ, στοιχεία δηλαδή που διαθέτει κάθε μηχανικός και ενεργειακός επιθεωρητής και μπορεί να αξιοποιήσει, προκειμένου να προτείνει επεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας στο κτίριο που μελετά ή επιθεωρεί.

Προκειμένου να ιεραρχηθούν τα συγκεκριμένα έξι κριτήρια, εστάλη ένα μικρό ερωτηματολόγιο σε μηχανικούς[6], το οποίο απαντήθηκε την περίοδο Σεπτεμβρίου-Οκτωβρίου 2017. Στο ερωτηματολόγιο αυτό, εκτός από το να δηλώσουν την ειδικότητά τους κι αν είναι ή όχι ενεργειακοί επιθεωρητές, οι μηχανικοί καλούνταν να αξιολογήσουν τα προαναφερθέντα κριτήρια, με βαθμολόγηση σε κλίμακα από 1 (καθόλου σημαντικό) έως 5 (πολύ σημαντικό).

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

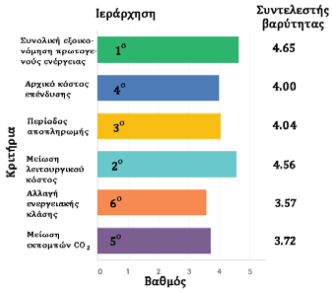
3.1. Ιεράρχηση κριτηρίων

Από τις απαντήσεις 100 μηχανικών, προέκυψε η εξής ιεράρχηση των κριτηρίων: Πρώτη στις προτιμήσεις βγαίνει η εξοικονόμηση ενέργειας (ενεργειακό κριτήριο, με συντελεστή βαρύτητας 4.65), δεύτερη η μείωση του λειτουργικού κόστους (κοινωνικό κριτήριο, με συντελεστή βαρύτητας 4.56), τρίτη η περίοδος αποπληρωμής (οικονομικό κριτήριο, με συντελεστή βαρύτητας 4.04), τέταρτο, επίσης οικονομικό κριτήριο, το αρχικό κόστος επένδυσης, με μικρή διαφορά από το προηγούμενο (με συντελεστή βαρύτητας 4.00), πέμπτο το περιβαλλοντικό κριτήριο της μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (με συντελεστή βαρύτητας 3.72) και έκτο και τελευταίο το ενεργειακό κριτήριο της αλλαγής ενεργειακής κατηγορίας (με συντελεστή βαρύτητας 3.57) (Εικόνα 2).

Θα περίμενε κανείς το τελευταίο κριτήριο, που είναι και το κριτήριο στο οποίο εστιάζει η παρούσα έρευνα, να έχει περισσότερη βαρύτητα στους ενεργειακούς επιθεωρητές, σε σχέση με τους υπόλοιπους μηχανικούς. Από τους 100 μηχανικούς που συμμετείχαν στην έρευνα, το 60%, που ήταν ενεργειακοί επιθεωρητές, έδωσαν ένα συντελεστή βαρύτητας της τάξης του 3.62, ενώ το υπόλοιπο 40%, που δεν ήταν ενεργειακοί επιθεωρητές, έδωσαν ένα λίγο μικρότερο συντελεστή βαρύτητας, της τάξης του 3.53. Παρόλο που στην εκπαίδευση των ενεργειακών επιθεωρητών έχει δοθεί έμφαση στην αλλαγή της ενεργειακής κατηγορίας, καθώς και στην εξοικονόμηση ενέργειας και τον χρόνο απόσβεσης [17], το γεγονός, ότι δεν δίνουν τόσο μεγάλη σημασία στο κριτήριο της αλλαγής ενεργειακής κατηγορίας οι ενεργειακοί επιθεωρητές, μπορεί να εξηγηθεί από δύο παράγοντες: Ο πρώτος είναι ότι δεν υπάρχουν ακόμα ενδείξεις η ενεργειακή κατηγορία να επηρεάζει τελικά την τιμή του ακινήτου [19]. Ο δεύτερος αφορά τη δεύτερη σελίδα του Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης κτιρίων (ΠΕΑ), όπου στα σενάρια εξοικονόμησης ενέργειας δίνονται πληροφορίες για όλα τα άλλα κριτήρια, εκτός από την αλλαγή της ενεργειακής κατηγορίας, η οποία εμφανίζεται μόνο στον ενεργειακό επιθεωρητή, κατά τη χρήση του προγράμματος ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ. Είναι εύλογο λοιπόν, αφού το

[6] Το ερωτηματολόγιο αναρτήθηκε στην ιστοσελίδα:
https://www.surveymonkey.com/r/?sm=_2BLhm81EsgbCPQ_2Fer0jRU_2Bg_3D_3D

κριτήριο της αλλαγής ενεργειακής κατηγορίας στα σενάρια εξοικονόμησης ενέργειας απαξιώνεται από το ίδιο το πιστοποιητικό, να απαξιώνεται κι από τους ενεργειακούς επιθεωρητές.



Εικόνα 2: Συντελεστής βαρύτητας και ιεράρχηση κριτηρίων ενεργειακής αναβάθμισης κτιρίων

3.2. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Βάσει των παραδοχών του λογισμικού του ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ, προκύπτουν τα εξής ως προς την πρωτογενή κατανάλωση ενέργειας και τα έξι εξεταζόμενα κριτήρια (πίνακας 4 και εικόνα 3): Όσον αφορά τα αμόνωτα κτίρια, η αναβάθμιση του κτιριακού κελύφους, αν και έχει αρκετά υψηλό κόστος επένδυσης (από 11877.60€ για το Σενάριο 1 στην κλιματική ζώνη Α έως 13674.50€ για το Σενάριο 2 στην κλιματική ζώνη Δ), παρουσιάζει μια εύλογη περίοδο αποπληρωμής, ιδιαίτερα για τη Γ και Δ κλιματική ζώνη (4.2 και 3.3, αντίστοιχα), ενώ αυξάνει προς τα θερμότερα κλίματα, στα 5.7 έτη στη Β ζώνη και στα 9.0 στην Α. Η διαφορά στην εξοικονόμηση ενέργειας μεταξύ των δύο σεναρίων δεν είναι τόσο σημαντική (από 59% για το Σενάριο 1 και 61% για το Σενάριο 2 στην Α ζώνη έως 71% και 74%, αντίστοιχα, για τη ζώνη Δ), αλλά είναι πολύ σημαντική η εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας που επιτυγχάνεται σε όλες τις περιπτώσεις. Το λειτουργικό κόστος μειώνεται αντίστοιχα αρκετά και για τα δύο σενάρια, αλλά όχι με μεγάλη διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων (73% και 75%, αντίστοιχα, για τη Γ ζώνη). Οι εκπομπές CO_2 μειώνονται επίσης αρκετά και για τα δύο σενάρια, αλλά όχι με μεγάλη διαφορά μεταξύ τους (61% και 63%, αντίστοιχα, για τη Β ζώνη). Η ενεργειακή κατηγορία, το τελευταίο κατά ιεράρχηση κριτήριο, από Η που είναι στο μηδενικό σενάριο, ανεβαίνει σε Δ και για τα δύο σενάρια στις ζώνες Β και Γ, στη ζώνη Δ στο Δ για το Σενάριο 1 και στο Γ για το Σενάριο 2, ενώ στη ζώνη Α στην Ε για το Σενάριο 1 και στη Δ για το Σενάριο 2. Η μεγαλύτερη θερμική θωράκιση στα ψυχρά κλίματα επιφέρει πιο εμφανή αποτελέσματα ως προς την ενεργειακή κατάταξη. Σε σχέση με την εφαρμογή αντλιών θερμότητας ενεργειακών κλάσεων Α+ και Α++ για ψύξη και θέρμανση, αντίστοιχα, στα αμόνωτα κτίρια (Σενάριο 4), προκύπτουν επίσης υψηλά ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας (από 64% στη ζώνη Α έως 72% στη ζώνη Δ), αντίστοιχα με εκείνα που προκύπτουν από τη βελτίωση του κτιριακού κελύφους, με μικρότερο αρχικό κόστος (1400.00€) και μικρότερη περίοδο απόσβεσης (από 0.3 έτη στη Δ ζώνη έως 0.9 έτη στην Α ζώνη), ενώ και ως προς τη μείωση του λειτουργικού κόστους παρουσιάζουν μεγαλύτερη ελάττωση σε σχέση με τις επεμβάσεις του κελύφους (π.χ. 84% στη Γ κλιματική ζώνη), ενώ ως προς τη μείωση των εκπομπών CO_2 παρουσιάζουν αντίστοιχη ελάττωση με εκείνη του κελύφους (60% για τη Β ζώνη). Ως προς την ενεργειακή κατηγορία, και στις 4 ζώνες, ανεβαίνει κατά 3 κλάσεις, από την κατηγορία 'Η' στην κατηγορία 'Δ'. Η εφαρμογή λέβητα ενεργειακής κατηγορίας Α+ για θέρμανση, σε συνδυασμό με αντλία θερμότητας ενεργειακής κατηγορίας Α++ για ψύξη (Σενάριο 7) επιφέρει λίγο χαμηλότερα αποτελέσματα σε σχέση με το σενάριο 4. Η εξοικονόμηση ενέργειας κυμαίνεται από 51% στην Α ζώνη έως 57% στις Β και Γ. Το λειτουργικό κόστος μειώνεται λιγότερο (από 58% στην Α ζώνη έως 65% στη Γ), για υψηλότερο κόστος αρχικής επένδυσης (4060,00€) και μεγαλύτερο χρόνο απόσβεσης, της τάξης των 1.3 ετών (Δ ζώνη) έως 3.5 ετών (Α ζώνη), χαμηλότερη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Η ενεργειακή κατηγορία ανεβαίνει στην 'Ε' στις κλιματικές ζώνες Α, Β, Γ, ενώ για την ψυχρότερη Δ, μόνο έως τη 'Ζ'.

Η τοποθέτηση του ηλιακού συλλέκτη για την κάλυψη ΖΝΧ (σενάριο 3) στα αμόνωτα κτίρια και στις τέσσερις κλιματικές ζώνες δεν επιφέρει τόσο θεαματικά αποτελέσματα, καθώς είναι αρκετά μεγαλύτερα τα φορτία θέρμανσης και ψύξης, σε σχέση με το ΖΝΧ. Έτσι, για τα χαρακτηριστικά του ηλιακού συλλέκτη που έχουν θεωρηθεί, προκύπτει ΕΞΕ από 7% στη Δ ζώνη έως 15% στην Α ζώνη, με αρκετά χαμηλή μείωση του λειτουργικού κόστους (2% στη Δ έως 9% στην Α ζώνη), με ένα χαμηλό αρχικό κόστος επένδυσης (902.40€), αλλά με χρόνο απόσβεσης της τάξεως των 5 ετών, μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα από 9% στη Δ κλιματική ζώνη σε 18% στην Α και χωρίς καμία

επιρροή στην ενεργειακή κατηγορία (παραμένει 'Η' σε όλες τις κλιματικές ζώνες). Οι συνέργειες βελτίωσης του κτιριακού κελύφους και των Η/Μ συστημάτων (Σενάρια 5 και 8) προσφέρουν μεγαλύτερη βελτίωση των ενεργειακών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών κριτηρίων που τέθηκαν, έχοντας όμως μεγαλύτερο χρόνο απόσβεσης σε σχέση με τα σενάρια αλλαγής μόνο των Η/Μ, αλλά μικρότερο χρόνο απόσβεσης σε σχέση με τα σενάρια επεμβάσεων μόνο στο κέλυφος, με το Σενάριο 5 (αντλία θερμότητας) να υπερτερεί του Σεναρίου 8 (λέβητας συμπύκνωσης), όπως φαίνεται στον πίνακα 4. Η τελική συνέργεια, βελτίωσης κελύφους, Η/Μ συστημάτων και τοποθέτησης ΑΠΕ για την παραγωγή ΖΝΧ (Σενάριο 9, με αντλία θερμότητας για θέρμανση και Σενάριο 10, με λέβητα) προσφέρει τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας, της τάξης του 90% σε όλες τις κλιματικές ζώνες, με το Σενάριο 9 να υπερτερεί κατά κάποιες μονάδες του 10, τα χαμηλότερα λειτουργικά κόστη (μείωση από 91% στις ζώνες Α και Γ για το Σενάριο 10 έως 97% για το Σενάριο 9 στη ζώνη Δ), με μικρές περιόδους αποπληρωμής (από 3.0 έτη για τη ζώνη Δ και το Σενάριο 9 έως 9.3 έτη για τη ζώνη Α και το Σενάριο 10), αλλά τα μεγαλύτερα κόστη (από 14800.00€ για το Σενάριο 9/ζώνη Α έως 17926.90€ για το Σενάριο 10/ζώνη Δ), τη μεγαλύτερη μείωση των εκπομπών του CO_2 (της τάξης του 90%) και τη μεγαλύτερη βελτίωση της ενεργειακής κατηγορίας του κτιρίου (έως 'Β+' και 'Α' για το Σενάριο 10 και 'Α' και 'Α+' για το Σενάριο 9).

Σε σχέση με τα κτίρια που είναι θερμομονωμένα κατά [12], τα σενάρια επεμβάσεων στο κτιριακό κέλυφος παρουσιάζουν χαμηλότερη ΕΞΕ (από 20% για το Σενάριο 1 στη ζώνη Α έως 36% για το Σενάριο 2 στη ζώνη Δ), μείωση λειτουργικού κόστους (από 28% έως 42%, αντίστοιχα), μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (από 17% έως 32%, αντίστοιχα), με σχετικά μεγάλους χρόνους αποπληρωμής (από 14.3 έτη για το Σενάριο 2 στη Δ ζώνη έως τη σχεδόν απαγορευτική τιμή των 38.5 ετών για το ίδιο σενάριο στη ζώνη Α) και κόστη (από 8769.00€ για το Σενάριο 1 στην Α ζώνη έως 12254.90€ για το Σενάριο 2 στη Δ ζώνη), ενώ η ενεργειακή κατηγορία από 'Ε' που είναι στο Σενάριο 0 στις ζώνες Γ και Δ ανεβαίνει κατά μία κατηγορία για τα δύο σενάρια στη ζώνη Γ, ενώ για τη ζώνη Δ ανεβαίνει στη 'Δ' για το Σενάριο 1 και στη 'Γ' για το Σενάριο 2, υπενθυμίζοντας τη σημασία της θερμομόνωσης στα ψυχρότερα κλίματα. Στις ζώνες 'Α' και 'Β' το Σενάριο 0 βρίσκεται σε ενεργειακή κατηγορία 'Ζ' και ανεβαίνει στο 'Δ' και για τα δύο σενάρια στη ζώνη Β, ενώ για τη ζώνη Α ανεβαίνει στο 'Ε' για το Σενάριο 1 και στο 'Δ' για το Σενάριο 2 (Εικόνα 3). Καθώς τα πρώτα εκατοστά της θερμομόνωσης είναι τα πιο αποδοτικά [20], είναι αναμενόμενο η επιπλέον προσθήκη θερμομόνωσης να επιφέρει κάποια βελτίωση ως προς την ενεργειακή απόδοση, αλλά όχι τόσο σημαντική όσο για τα αμόνωτα κτίρια.

Μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση αντλιών θερμότητας για θέρμανση και ψύξη (Σενάριο 4), με εξοικονόμηση ενέργειας από 53% για τη ζώνη Α έως 62% στη ζώνη Δ, μείωση λειτουργικού κόστους από 68% έως 79%, αντίστοιχα και μείωση εκπομπών CO_2 από 45% έως 52%, αντίστοιχα. Η περίοδος αποπληρωμής κυμαίνεται από 0.9 έτη στη ζώνη Δ έως 2.2 έτη στη ζώνη Α, ενώ το αρχικό κόστος είναι σχετικά χαμηλό (1400.00€). Η αλλαγή της ενεργειακής κατηγορίας είναι πιο αξιόλογη στις πιο ψυχρές ζώνες (κατηγορία 'Β' για τις ζώνες Β, Γ και Δ), ενώ στην Α κλιματική ζώνη φτάνει έως την κατηγορία 'Γ'. Η αντικατάσταση της αντλίας θερμότητας με λέβητα συμπύκνωσης (Σενάριο 7) ανεβάζει την ενεργειακή κατηγορία έως 'Γ' και στις τέσσερις κλιματικές ζώνες. Η εξοικονόμηση ενέργειας είναι μικρότερη από εκείνη του Σεναρίου 4, αλλά μεγαλύτερη από εκείνες των Σεναρίων 1 και 2 (από 43% στη ζώνη Α έως 46% στις ζώνες Β, Γ και Δ). Όπως φαίνεται και στον πίνακα 4 και τα υπόλοιπα κριτήρια ακολουθούν παρόμοιες κατανομές (λίγο χαμηλότερα από το Σενάριο 4 και υψηλότερα από τα Σενάρια 1 και 2), ενώ το αρχικό κόστος επένδυσης είναι σχεδόν τριπλάσιο από το Σενάριο 4 και τετραπλάσιος ο χρόνος απόσβεσης για τις ζώνες Α, Β, Γ και εξαπλάσιος για τη ζώνη Δ.

Η τοποθέτηση ηλιακού συλλέκτη (Σενάριο 3), ομοίως δεν επιφέρει μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας ή μεγάλη βελτίωση ως προς τη μείωση του λειτουργικού κόστους ή τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, αλλά αξιολογότερη, σε σχέση με εκείνη των αμόνωτων κτιρίων. Ανεβάζει την ενεργειακή κατηγορία σε 'Δ' για τις ζώνες Α, Β, Γ, ενώ στη Δ παραμένει στην 'Ε', καθώς στην ψυχρότερη κλιματική ζώνη Δ υπερτερεί το φορτίο θέρμανσης στο συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο του κτιρίου. Έχει σαφώς χαμηλότερο αρχικό κόστος επένδυσης σε σχέση με τα Σενάρια 1 και 2 και μικρότερο χρόνο απόσβεσης (περίπου 5 έτη), σε σχέση με τα ίδια σενάρια, αλλά μεγαλύτερο σε σχέση με τα σενάρια επέμβασης στα Η/Μ (4 και 7). Ομοίως, οι συνέργειες κελύφους – Η/Μ βελτιώνουν όλα τα κριτήρια, ακόμα και το χρόνο απόσβεσης, ενώ η συνέργεια βελτίωσης του κτιριακού κελύφους – ecolabel αντλίας θερμότητας – επιλεκτικού ηλιακού συλλέκτη μεγιστοποιεί την εξοικονόμηση ενέργειας, χρημάτων από ενεργειακούς λογαριασμούς, μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, αυξάνει το αρχικό κόστος επένδυσης, ενώ οι περίοδοι αποπληρωμής κυμαίνονται από επιτρεπτοί στη Δ ζώνη (9.7 έτη) σε αποτρεπτικοί στην Α (18.5 έτη). Η ενεργειακή κατηγορία είναι 'Α+' σε όλες τις κλιματικές ζώνες.

	Κέλυφος κτιρίου βάσει ΚΕΝΑΚ / 2010				Κέλυφος κτιρίου βάσει ΚΘΚ				Κέλυφος κτιρίου πριν τον ΚΘΚ (χωρίς θερμική θωράκιση)			
	Ζώνη Α	Ζώνη Β	Ζώνη Γ	Ζώνη Δ	Ζώνη Α	Ζώνη Β	Ζώνη Γ	Ζώνη Δ	Ζώνη Α	Ζώνη Β	Ζώνη Γ	Ζώνη Δ
ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ												
EP ≤ 0.33·R_E A+	Σεν. 6 Σεν. 10	Σεν. 6 Σεν. 10	Σεν. 6	Σεν. 6	Σεν. 9 Σεν. 6,10	Σεν. 9 Σεν. 6,10	Σεν. 9 Σεν. 6	Σεν. 9 Σεν. 6	Σεν. 9 Σεν. 10	Σεν. 9 Σεν. 10	Σεν. 9	Σεν. 9
0.33·R_E < EP ≤ 0.5·R_E A												
0.5·R_E < EP ≤ 0.75·R_E B+			Σεν. 4,10	Σεν. 4,10			Σεν. 5,10	Σεν. 5,10			Σεν. 5,10	Σεν. 5,10
0.75·R_E < EP ≤ 1.0·R_E B	Σεν. 4	Σεν. 4,7	Σεν. 7	Σεν. 7	Σεν. 5	Σεν. 4,5,8	Σεν. 4,8	Σεν. 4,8	Σεν. 5,6	Σεν. 5,8	Σεν. 8	Σεν. 8
1.0·R_E < EP ≤ 1.41·R_E Γ	Σεν. 3,7	Σεν. 3	Σεν. 3	Σεν. 2,3	Σεν. 4,7,8	Σεν. 7	Σεν. 7	Σεν. 2,7	Σεν. 8	Σεν. 6	Σεν. 6	Σεν. 2,6
1.41·R_E < EP ≤ 1.82·R_E Δ	Σεν. 2	Σεν. 0,2	Σεν. 0,2	Σεν. 0	Σεν. 2,3	Σεν.1,2,3	Σεν.1,2,3	Σεν. 1	Σεν. 2,4	Σεν. 1,2,4	Σεν. 1,2,4	Σεν. 1,4
1.82·R_E < EP ≤ 2.27·R_E E	Σεν. 0				Σεν. 1		Σεν. 0	Σεν. 0,3	Σεν. 1,7	Σεν. 7	Σεν. 7	
2.27·R_E < EP ≤ 2.73·R_E Z					Σεν. 0	Σεν. 0						Σεν. 7
2.73·R_E < EP H									Σεν. 0,3	Σεν. 0,3	Σεν. 0,3	Σεν. 0,3
ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΜΗ ΑΠΟΔΟΤΙΚΟ												

Εικόνα 3: Αλλαγή ενεργειακής κατηγορίας (κριτήριο 6) για τα εξεταζόμενα σενάρια

Σε ένα κτίριο με τη θερμική θωράκιση των κτιρίων με τις προδιαγραφές του [13], η τοποθέτηση λίγο παραπάνω θερμομόνωσης δεν επιφέρει ιδιαίτερα σημαντικά αποτελέσματα ως προς το 1ο κριτήριο (ΕΞΕ), το 2ο (μείωση λειτουργικού κόστους) και το 5ο (μείωση εκπομπών CO_2), με μειώσεις κατά 5%, 7% και 4%, αντίστοιχα στην Α κλιματική ζώνη έως 9%, 18% και 7%, αντίστοιχα στη Δ κλιματική ζώνη. Ως προς το 3ο κριτήριο (περίοδος αποπληρωμής), το 2ο σενάριο είναι αποτρεπτικό και στις τέσσερις κλιματικές ζώνες (από 81.6 έτη στη Δ ζώνη έως 241.4 στην Α ζώνη), ενώ τα αρχικά κόστη είναι αρκετά αυξημένα (από 11798.30€ στη Α' ζώνη έως 12323.30€ στη Δ κλιματική ζώνη), όπως φαίνεται και στον πίνακα 4. Το σενάριο αυτό επιφέρει μία αλλαγή στην ενεργειακή κατηγορία στις ζώνες Α και Δ (από 'Ε' σε 'Δ' κι από 'Δ' σε 'Γ', αντίστοιχα), ενώ δεν επιφέρει καμία αλλαγή στις ζώνες Β και Γ (οι οποίες, στο Σενάριο 0 βρίσκονται στη 'Δ'). Όπως είναι προφανές, η αλλαγή πλαισίων και υαλοπινάκων και η τοποθέτηση λίγων εκατοστών θερμομόνωσης για τη μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας των ανοιγμάτων κατά κάποια δεκαδικά ψηφία δεν είναι μια αποδεκτή λύση, ούτε ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας που προσφέρει, ούτε προς το αρκετά ανεβασμένο αρχικό κόστος επένδυσης, καθώς και ως προς τα υπόλοιπα κριτήρια και ιδιαίτερα το χρόνο απόσβεσης. Στα κτίρια που είναι θερμομονωμένα βάσει [13], η τοποθέτηση ηλιακού συλλέκτη για ZNX (Σενάριο 3) επιφέρει τόσο μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας και στις τέσσερις κλιματικές ζώνες (από 24% στη Δ ζώνη έως 37% στην Α ζώνη), όσο και μικρότερο χρόνο απόσβεσης (από 4.8 έτη στη Δ ζώνη έως 5.0 στις Α και Γ ζώνες), έχει το χαμηλότερο κόστος αρχικής επένδυσης (902.40€), σε σχέση με τις επεμβάσεις στο κτιριακό κέλυφος βάσει του Σεναρίου 2, ενώ προσφέρει μεγαλύτερη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (από 29% στη Δ ζώνη έως 40% στην Α ζώνη). Ως προς το δεύτερο κατά ιεράρχηση κριτήριο, τη μείωση του λειτουργικού κόστους, στη Δ κλιματική ζώνη είναι πιο σημαντικά τα αποτελέσματα του 2ου σεναρίου (18%), σε σχέση με το 3ο σενάριο (13%), ενώ στην Α κλιματική ζώνη, υπερτερεί το 3ο σενάριο (27% μείωση λειτουργικού κόστους), σε σχέση με το 2ο σενάριο (7%), ομοίως και στη Β κλιματική ζώνη (21% και 9%, αντίστοιχα), και στη Γ (16% και 9%, αντίστοιχα). Ως προς το τελευταίο κριτήριο (την αλλαγή ενεργειακής κατηγορίας), το Σενάριο 3 επιφέρει αλλαγή δύο κλάσεων στην Α κλιματική ζώνη (από 'Ε' σε 'Γ') και μίας (από 'Δ' σε 'Γ') στις υπόλοιπες ζώνες.

Η βελτίωση των αποδόσεων των συστημάτων Η/Μ έχει σημαντικά αποτελέσματα σε αυτά τα κτίρια, αλλά όχι τόσο μεγάλα όσο εκείνα που παρατηρήθηκαν στα προηγούμενα κτίρια για τα Σενάρια 4 και 7. Καθώς το θερμικά θωρακισμένο κέλυφος έχει χαμηλότερη ζήτηση σε ενέργεια, η απόδοση των συστημάτων δεν παίζει τον σημαντικό ρόλο που έπαιζε στα κτίρια με υψηλότερους συντελεστές θερμοπερατότητας. Παρόλα αυτά, συνεχίζει να παίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο, με καθόλου ευκαταφρόνητα αποτελέσματα, αρκετά πιο σημαντικά από εκείνα που επιτεύχθηκαν στο Σενάριο 3. Έτσι, για το Σενάριο 4 η εξοικονόμηση ενέργειας κυμαίνεται από 46% στην Α ζώνη έως 55% στη Δ, η μείωση του λειτουργικού κόστους από 60% έως 75%, αντίστοιχα, χαμηλή περίοδο αποπληρωμής από 1.3 έτη στη ζώνη Δ σε 3.6 στη ζώνη Α, σχετικά χαμηλό αρχικό κόστος επένδυσης (1400.00€) και μείωση των εκπομπών CO_2 από 41% στη ζώνη Α σε 46% στη ζώνη Γ. Στις ζώνες Α και Β ανεβάζει το κτίριο στην ενεργειακή κατηγορία 'Β', ενώ στις Γ και Δ στη 'Β+'. Το Σενάριο 7 έχει παρόμοια, λίγο χαμηλότερα αποτελέσματα ως προς τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, του λειτουργικού κόστους και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, αλλά με υψηλότερο κόστος επένδυσης (4060.00€), μεγαλύτερες περιόδους αποπληρωμής (από 5.8 έτη στη Δ ζώνη έως 13.8 στην Α ζώνη), ίδια ενεργειακή κατηγορία για τις Α και Β ζώνες ('Β') και χαμηλότερη αλλαγή ενεργειακής κατηγορίας για τις ζώνες Γ και Δ ('Β' αντί για 'Β+'). Τέλος, οι συνέργειες βελτιωμένων Η/Μ συστημάτων και χρήσης ηλιακής ενέργειας για παραγωγή ZNX (Σενάρια 6 και 10) επιφέρουν τη μεγαλύτερη ΕΞΕ, με την αντλία θερμότητας να υπερτερεί στη θέρμανση σε σχέση με το λέβητα συμπύκνωσης. Έτσι, στο Σενάριο 6 επιτυγχάνεται ΕΞΕ από 79% στη ζώνη Δ έως 82% στην Α, μείωση λειτουργικού κόστους από 86% στη ζώνη Γ έως 89% στη ζώνη Δ και περίοδο αποπληρωμής από 1.8 έτη στη ζώνη Δ έως 4.0 στη ζώνη Α. Το αρχικό κόστος επένδυσης είναι της τάξης των 2302.40€ για το Σενάριο 6, η μείωση του CO_2 από 75% στη ζώνη Δ έως 81% στη ζώνη Α, ενώ στις ζώνες Α, Β και Δ το κτίριο αλλάζει ενεργειακή

κατηγορία σε 'Α+', ενώ στη Γ σε 'Α'. Το Σενάριο 10 παρουσιάζει σχετικά χαμηλότερες τιμές ως προς το 1^o, 2^o και 5^o κριτήριο, όπως φαίνεται και στον πίνακα 4, έχει μεγαλύτερο αρχικό κόστος (4962.40€), μεγαλύτερες περιόδους αποπληρωμής (από 5.6 έτη στη Δ έως 10.2 στην Α ζώνη) και μικρότερη αλλαγή ενεργειακής κατηγορίας σε 'Α' για τις ζώνες Α και Β και 'Β+' για τις Γ και Δ (Εικόνα 3).

Πίνακας 4: Εξοικονόμηση ενέργειας, μείωση λειτουργικού κόστους, περίοδος αποπληρωμής, αρχικό κόστος επένδυσης και μείωση εκπομπών CO_2 (κριτήρια 1-5) για τα εξεταζόμενα σενάρια

Περιπτώσεις:		Κέλυφος κτιρίου βάσει ΚΕΝΑΚ/2010				Κέλυφος κτιρίου βάσει ΚΘΚ				Κέλυφος κτιρίου πριν τον ΚΘΚ (χωρίς θερμική θωράκιση)			
Κλιματικές Ζώνες:		Α	Β	Γ	Δ	Α	Β	Γ	Δ	Α	Β	Γ	Δ
Εξοικονόμηση Ενέργειας (%)	Σενάριο 1	-	-	-	-	20%	25%	24%	30%	59%	65%	68%	71%
	Σενάριο 2	5%	7%	8%	9%	24%	30%	30%	36%	61%	67%	71%	74%
	Σενάριο 3	37%	30%	25%	24%	29%	22%	20%	17%	15%	11%	8%	7%
	Σενάριο 4	46%	51%	54%	55%	53%	58%	60%	62%	64%	68%	70%	72%
	Σενάριο 5	-	-	-	-	57%	63%	65%	68%	78%	83%	85%	87%
	Σενάριο 6	82%	81%	79%	79%	82%	81%	79%	79%	79%	79%	78%	79%
	Σενάριο 7	39%	42%	42%	41%	43%	46%	46%	46%	51%	57%	57%	52%
	Σενάριο 8	-	-	-	-	51%	57%	56%	59%	75%	80%	82%	83%
	Σενάριο 9	-	-	-	-	86%	86%	84%	86%	93%	93%	93%	94%
	Σενάριο 10	76%	72%	67%	66%	81%	79%	76%	76%	90%	90%	89%	90%
Μείωση λειτουργικού κόστους (%)	Σενάριο 1	-	-	-	-	28%	32%	29%	35%	67%	71%	73%	75%
	Σενάριο 2	7%	9%	9%	18%	34%	38%	35%	42%	69%	73%	75%	78%
	Σενάριο 3	27%	21%	16%	13%	20%	14%	11%	9%	9%	6%	4%	2%
	Σενάριο 4	60%	66%	71%	75%	68%	74%	76%	79%	78%	82%	84%	86%
	Σενάριο 5	-	-	-	-	71%	77%	79%	83%	87%	90%	92%	93%
	Σενάριο 6	87%	87%	86%	89%	88%	88%	88%	89%	87%	88%	88%	89%
	Σενάριο 7	47%	51%	53%	57%	52%	55%	56%	56%	58%	64%	65%	61%
	Σενάριο 8	-	-	-	-	62%	67%	67%	69%	83%	86%	88%	88%
	Σενάριο 9	-	-	-	-	91%	91%	91%	92%	96%	96%	96%	97%
	Σενάριο 10	74%	71%	68%	70%	81%	81%	78%	79%	91%	92%	91%	92%
Περίοδος αποπληρωμής (Έτη)	Σενάριο 1	-	-	-	-	34.1	28.0	22.9	14.9	9.0	5.7	4.2	3.3
	Σενάριο 2	241.4	144.4	112.4	81.6	38.5	23.7	21.2	14.3	9.0	5.7	4.1	3.3
	Σενάριο 3	5.0	4.8	5.0	4.7	5.0	4.8	5.0	4.8	5.0	4.8	5.1	5.1
	Σενάριο 4	3.6	2.4	1.7	1.3	2.2	1.4	1.2	0.9	0.9	0.6	0.4	0.3
	Σενάριο 5	-	-	-	-	15.7	13.0	9.4	7.1	7.7	5.0	3.7	2.9
	Σενάριο 6	4.0	3.0	2.4	1.8	2.9	2.0	1.6	1.3	1.3	0.9	0.6	0.5
	Σενάριο 7	13.2	8.9	6.8	5.8	8.6	5.6	4.6	5.8	3.5	2.1	1.5	1.3
	Σενάριο 8	-	-	-	-	22.8	18.0	13.7	10.4	9.7	6.2	4.6	3.6
	Σενάριο 9	-	-	-	-	13.4	11.7	8.9	6.9	7.5	5.0	3.7	3.0
	Σενάριο 10	10.2	7.8	6.4	5.6	18.5	15.7	12.5	9.7	9.3	6.2	4.6	3.7
Αρχικό κόστος επένδυσης (€)	Σενάριο 1	-	-	-	-	8,769 €	11,720 €	10,495 €	10,573 €	11,878 €	12,377 €	12,695 €	12,965 €
	Σενάριο 2	11,798 €	11,877 €	11,955 €	12,323 €	11,798 €	11,877 €	11,955 €	12,255 €	12,320 €	12,794 €	13,033 €	13,675 €
	Σενάριο 3	902 €	902 €	902 €	902 €	902 €	902 €	902 €	902 €	902 €	902 €	902 €	902 €
	Σενάριο 4	1,400 €	1,400 €	1,400 €	1,400 €	1,400 €	1,400 €	1,400 €	1,400 €	1,400 €	1,400 €	1,400 €	1,400 €
	Σενάριο 5	-	-	-	-	10,189 €	13,120 €	11,895 €	11,973 €	13,278 €	13,777 €	14,095 €	14,365 €
	Σενάριο 6	2,302 €	2,302 €	2,302 €	2,302 €	2,302 €	2,302 €	2,302 €	2,302 €	2,302 €	2,302 €	2,302 €	2,302 €
	Σενάριο 7	4,060 €	4,060 €	4,060 €	4,060 €	4,060 €	4,060 €	4,060 €	4,060 €	4,060 €	4,060 €	4,060 €	4,060 €
	Σενάριο 8	-	-	-	-	12,849 €	15,780 €	14,555 €	14,633 €	15,938 €	16,437 €	16,755 €	17,025 €
	Σενάριο 9	-	-	-	-	11,091 €	14,023 €	12,797 €	12,876 €	14,180 €	14,680 €	14,997 €	15,267 €
	Σενάριο 10	4,962 €	4,962 €	4,962 €	4,962 €	13,751 €	16,683 €	15,457 €	15,536 €	16,840 €	17,340 €	17,657 €	17,927 €
Μείωση εκπομπών CO2 (%)	Σενάριο 1	-	-	-	-	17%	21%	19%	26%	55%	61%	64%	68%
	Σενάριο 2	4%	5%	5%	7%	20%	26%	24%	32%	57%	63%	66%	70%
	Σενάριο 3	40%	34%	29%	29%	33%	27%	24%	21%	18%	13%	10%	9%
	Σενάριο 4	41%	45%	46%	45%	45%	51%	51%	52%	57%	60%	62%	62%
	Σενάριο 5	0%	0%	0%	0%	51%	57%	57%	60%	73%	79%	81%	82%
	Σενάριο 6	81%	79%	46%	75%	79%	77%	75%	74%	75%	73%	72%	72%
	Σενάριο 7	40%	43%	44%	43%	44%	49%	49%	49%	55%	60%	62%	59%
	Σενάριο 8	0%	0%	0%	0%	50%	56%	56%	58%	73%	79%	81%	82%
	Σενάριο 9	0%	0%	0%	0%	84%	83%	81%	81%	91%	92%	91%	92%
	Σενάριο 10	80%	77%	73%	73%	83%	82%	79%	80%	91%	91%	90%	91%

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, σε σχέση με την ιεράρχηση των έξι κριτηρίων που προκύπτουν από το λογισμικό ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ, από τις προτιμήσεις των μηχανικών από τη σχετική δειγματοληψία, το σημαντικότερο κριτήριο για όλους είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, ακολουθούμενη από το κοινωνικό κριτήριο της μείωσης του λειτουργικού κόστους. Ούτε για τους περισσότερους μηχανικούς ούτε για τους ενεργειακούς επιθεωρητές η αλλαγή ενεργειακής κατηγορίας θεωρείται ένα σημαντικό κριτήριο για την επιλογή των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας σε ένα υφιστάμενο κτίριο. Η αναφορά της ενεργειακής κατηγορίας στα σενάρια ΕΞΕ στη δεύτερη σελίδα του ΠΕΑ κτιρίων θα μπορούσε να άλλαζε αυτή την αντίληψη. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι δεύτερο κριτήριο μετά την ΕΞΕ είναι η μείωση του λειτουργικού κόστους, το οποίο εξηγείται να ιεραρχείται τόσο υψηλά, λόγω της αύξησης της ενεργειακής φτώχειας στην Ελλάδα την περίοδο της κρίσης.

Βάσει των παραδοχών της παρούσας έρευνας (πίνακες 2 και 3), για τα σενάρια που εξετάστηκαν (πίνακας 1) για τη μονοκατοικία της εικόνας 1, τα έξι ιεραρχημένα κριτήρια (εικόνα 2), τις παραδοχές του λογισμικού ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ και των παραδοχών του [13], οι επεμβάσεις στο κέλυφος έχουν αρκετά μεγαλύτερες περιόδους αποπληρωμής σε σχέση με τα χαρακτηρισμένα ecolabel Η/Μ, ενώ η εξοικονόμηση ενέργειας που μπορεί να επιτευχθεί με μια αποδοτική αντλία θερμότητας θεωρητικά μπορεί να είναι μεγαλύτερη, ομοίως και η μείωση του λειτουργικού κόστους και των εκπομπών CO_2, με μικρότερο αρχικό κόστος επένδυσης, μικρότερους χρόνους αποπληρωμής και την ίδια περίπου

διαφορά στην ενεργειακή κατηγορία, ακόμα και για τα αμόνωτα κτίρια, πόσο μάλλον για τα θερμομονωμένα είτε κατά [12] είτε κατά [13]. Καθώς στο λογισμικό ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ δεν ποσοτικοποιείται η αίσθηση θερμικής άνεσης, φαίνεται, με μια πρώτη ματιά, ότι τα αποδοτικά Η/Μ συστήματα, με κατηγορίες Α+ και Α++ μπορούν να αντικαταστήσουν τη θερμική θωράκιση του κελύφους, στηριζόμενοι στα έξι κριτήρια που εξάγονται από το πρόγραμμα ΤΕΕ ΚΕΝΑΚ. Κάτι τέτοιο θα ήταν γενικά εσφαλμένο ως αντίληψη, καθώς η επιρροή της μέσης ακτινοβολούμενης θερμοκρασίας στην αίσθηση θερμικής άνεσης και κατ'επέκταση στην κατανάλωση ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντική, οπότε σε κτίρια με μη θωρακισμένο θερμικό κέλυφος και βελτιωμένα Η/Μ συστήματα, κατά πάσα πιθανότητα θα έχουμε μεγαλύτερες καταναλώσεις ενέργειας σε σχέση με τις υπολογιζόμενες. Εκτός αυτού, το πρόγραμμα θεωρεί μια αγαστή λειτουργία των Η/Μ συστημάτων, που στην πράξη μπορεί να απέχει από την πραγματικότητα (ελλειπής συντήρηση, γήρανση του μηχανήματος κοκ). Από την άλλη βέβαια, τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων είναι σχετικά ελπιδοφόρα, καθώς σε παλιά κτίρια, με μικρό χρόνο ζωής, από πλευράς ανάλυσης κύκλου ζωής, μπορεί να συμφέρει να τοποθετηθούν Η/Μ συστήματα, τα οποία μετά την κατεδάφισή τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν αλλού, σε σχέση με θερμομόνωση, που κατά πάσα πιθανότητα θα μετατραπεί σε οικοδομικό απόρριμμα.

Η τοποθέτηση περαιτέρω θερμομόνωσης στα θερμικώς θωρακισμένα κατά [13] κτίρια είναι ασύμφορη από όλες τις απόψεις και ιδιαίτερα ως προς την περίοδο αποπληρωμής, ακόμα και για τις αυξημένες ενεργειακές καταναλώσεις που θεωρούνται για τις κατοικίες από τη [14], σε σχέση με την πραγματικότητα [21]. Άλλες επεμβάσεις ΕΞΕ, όπως εξωτερική σκίαση, χρήση ανεμιστήρων οροφής, που δεν εξετάστηκαν εδώ, μπορούν επίσης να επιφέρουν σημαντικά αποτελέσματα [22]. Στα αμόνωτα κτίρια, η κάλυψη μόνο του ΖΝΧ με ΑΠΕ δεν επιφέρει μεγάλα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας, μείωσης λειτουργικού κόστους και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, ούτε βελτίωση της ενεργειακής κατηγορίας, καθώς οι ανάγκες τους σε θέρμανση και ψύξη είναι αρκετά υψηλές. Πάντως, στο πιο ήπιο κλίμα της Α κλιματικής ζώνης έχει μεγαλύτερη βαρύτητα η παραγωγή ΖΝΧ από ΑΠΕ, σε σχέση με τη μείωση του φορτίου θέρμανσης και ψύξης, σε σύγκριση με τις άλλες ζώνες.

Οι ενεργειακώς αποδοτικές αντλίες θερμότητας παρουσιάζουν σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, μείωση λειτουργικού κόστους και εκπομπών CO_2, του χρόνου απόσβεσης και του αρχικού κόστους, όντας έτσι μια εφικτή τεχνική λύση για την αντιμετώπιση της ενεργειακής φτώχειας. Στις περισσότερες περιπτώσεις επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αλλαγή ενεργειακής κατηγορίας, σε σχέση με ένα λέβητα αντίστοιχης ενεργειακής κατηγορίας (Α+). Όπως είναι αναμενόμενο, οι συνέργειες βελτίωσης κελύφους, τοποθέτησης χαρακτηρισμένων ως ecolabel Η/Μ συστημάτων και τοποθέτησης ΑΠΕ (αποδοτικού ηλιακού συλλέκτη για παραγωγή ΖΝΧ) υπερτερούν ως προς όλα τα κριτήρια, εκτός από εκείνο του αρχικού κόστους επένδυσης, επιτυγχάνοντας ένα συμβατικά σχεδιασμένο κτίριο μονοκατοικίας να ανέβει σε ενεργειακή κατηγορία 'Α' και 'Α+'.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν θερμά την Αθανασία Οικονόμου για τις πολύτιμες συμβουλές της στα θέματα κόστους των ενεργειακών επεμβάσεων βάσει του [16].

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] ΕΛΣΤΑΤ, 2015, "Απογραφή Κτιρίων 2011," Διαθέσιμο στο: http://www.statistics.gr/documents/20181/1204362/ A1601_SKT01_DT_DC_00_2011_01_F_GR.pdf/33bc3e1f-ea63-47ec-93b8-a96179b2ee59 [Πρόσβαση: 02.10.2017].

[2] ΕΛΣΤΑΤ, 2014, "Απογραφή Πληθυσμού – Κατοικιών 2011," Διαθέσιμο στο: https://www.statistics.gr/documents/20181/1210503/A1602_SAM05_DT_DC_00_2011_02_F_GR.pdf/9eb63639-b6a3-4378-8b85-4afc7b6caddc [Πρόσβαση: 02.10.2017].

[3] ΕΛΣΤΑΤ, 2013, "Έρευνα Κατανάλωσης Ενέργειας στα Νοικοκυριά, 2011-2012," Διαθέσιμο στο: http://www.statistics.gr/documents/20181/e74d6134-8c02-404e-a02b-aa6d959219e3 [Πρόσβαση: 10.10.2017].

[4] Εφημερίδα της Κυβέρνησης της Ελληνικής Δημοκρατίας, 2015, "Έγκριση Έκθεσης Μακροπρόθεσμης Στρατηγικής για την Κινητοποίηση Επενδύσεων για την Ανακαίνιση του Αποτελούμενου από Κατοικίες και Εμπορικά Κτίρια, Δημόσια και Ιδιωτικά, Εθνικού Κτιριακού Αποθέματος," Απόφαση Αρίθμ. ΔΕΠΕΑ/Γ/οικ. 185497/2015 (ΦΕΚ3004/Β/31.12.2015), Εθνικό Τυπογραφείο, Αθήνα.

[5] Πάνας, Ε., 2012, "Έρευνα για την Ενεργειακή Φτώχεια στην Ελλάδα," Παρουσίαση στην Ημερίδα "Ρύπανση από Αιθαλομίχλη – Το Χρονικό Άστοχων Επιλογών: Τα Λάθη – οι Επιπτώσεις – οι Λύσεις", ΤΕΕ, 27.03.2013, Αθήνα. Διαθέσιμο στο: http://library.tee.gr/digital/m2600/m2600_panas.pdf [Πρόσβαση: 10.10.2017].

[6] Βαταβάλη, Φ., και Χατζηκωνσταντίνου, Ε., 2016, "Χαρτογραφώντας την Ενεργειακή Φτώχεια στην Αθήνα της Κρίσης," Στο: Μαλούτας, Θ., Σπυρέλλης, Σ., (επιμ.) (2015) "Κοινωνικός Άτλαντας της Αθήνας," Διαθέσιμο στο: http://www.athenssocialatlas.gr/άρθρο/ενεργειακή-φτώχεια [Πρόσβαση: 22.02.2017].

[7] Κοροβέση, Α., Μεταξά, Κ., Τουλουπάκη, Ε., και Χρυσόγελος, Ν. (2017) "Ενεργειακή Φτώχεια στην Ελλάδα," Ίδρυμα Χάινριχ Μπελ Ελλάδας, Θεσσαλονίκη. Διαθέσιμο στο: http://www.teetas.gr/sites/default/files/eisigisi_korovesi_0.pdf [Πρόσβαση: 30.04.2017].

[8] Οδηγία 2010/30/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 19ης Μαΐου 2010, "Για την Ένδειξη της Κατανάλωσης Ενέργειας και Λοιπών Πόρων από τα Συνδεόμενα με την Ενέργεια Προϊόντα Μέσω της Επισήμανσης και της Παροχής Ομοιόμορφων Πληροφοριών Σχετικά με Αυτά," (ΕΕ L 153).

[9] Κανονισμός (ΕΕ) 2017/1369 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 4ης Ιουλίου 2017, "Σχετικά με τον Καθορισμό ενός Πλαισίου για την Ενεργειακή Σήμανση και για την Κατάργηση της Οδηγίας 2010/30/ΕΕ," (ΕΕ L 198).

[10] Οδηγία 2009/125/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 21ης Οκτωβρίου 2009, "Σχετικά με τη Θέσπιση Πλαισίου για τον Καθορισμό Απαιτήσεων Οικολογικού Σχεδιασμού για Συνδεόμενα με την Ενέργεια Προϊόντα," (ΕΕ L 285).

[11] Κανονισμός (ΕΚ) 66/2010 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 25ης Νοεμβρίου 2009, "Σχετικά με το Οικολογικό Σήμα της ΕΕ (EU Ecolabel)," (ΕΕ L 27).

[12] Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, 1979, "Περί Εγκρίσεως Κανονισμού δια την Θερμομόνωσιν των Κτιρίων," Διάταγμα (ΦΕΚ362/Δ/04.07.1979), Εθνικό Τυπογραφείο, Αθήνα.

[13] Εφημερίδα της Κυβέρνησης της Ελληνικής Δημοκρατίας, 2010, "Έγκριση Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων," Απόφαση Αρίθμ.Δ6/Β/οικ. 5825/2010 (ΦΕΚ407/Β/09.04.2010), Εθνικό Τυπογραφείο, Αθήνα.

[14] ΤΟΤΕΕ 20701-1:2014, "Αναλυτικές Εθνικές Προδιαγραφές Παραμέτρων για τον Υπολογισμό της Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων και την Έκδοση του Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης," Γ' έκδοση, ΤΕΕ, Αθήνα.

[15] Εφημερίδα της Κυβέρνησης της Ελληνικής Δημοκρατίας, 2017, "Έγκριση Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων," Απόφαση Αρίθμ.ΔΕΠΕΑ/οικ. 178581/2017 (ΦΕΚ2367/Β/12.07.2017), Εθνικό Τυπογραφείο, Αθήνα.

[16] Εφημερίδα της Κυβέρνησης της Ελληνικής Δημοκρατίας, 2017, "Κανονισμός Περιγραφικών Τιμολογίων Εργασιών για Δημόσιες Συμβάσεις Έργων," Απόφαση Αρίθμ. ΔΝΣγ/οικ.35577/ΦΝ466/2017 (ΦΕΚ1746/Β/19.05.2017), Εθνικό Τυπογραφείο, Αθήνα.

[17] Αραβαντινός, Δ., Αξαρλή, Κ., Γαγλία, Α., Γιδάκου, Λ., Δρούτσα, Π., Θεοδοσίου, Θ., Κοντογιαννίδης, Σ., Λάσκος, Κ., Μανασής, Δ., Μπαλαράς, Κ., Μπίκας, Δ., Τσικαλουδάκη, Κ., 2011, "Ενεργειακή Επιθεώρηση Κτιρίου," Κατάρτιση Ενεργειακών Επιθεωρητών, Εκπαιδευτικό Υλικό, Α. Επιθεώρηση Κτιρίων, Θεματική Ενότητα ΔΚ3, ΤΕΕ, Αθήνα.

[18] ΤΟΤΕΕ-20701-2, 2010, "Θερμοφυσικές Ιδιότητες Δομικών Υλικών και Έλεγχος της Θερμομομονωτικής Επάρκειας των Κτηρίων," Β' έκδοση, ΤΕΕ, Αθήνα.

[19] Τηλεφωνική επικοινωνία με ΕΛΙΕ (Ελληνικό Ινστιτούτο Εκτιμητικής), 12.10.2017.

[20] Reiter, S., 2010, "Life Cycle Assessment of Buildings – an Overview," Sustainability Workshop and Third Plenary Meeting, Bruxelles, Belgique.

[21] Alexandri, E., 2013, "User Behaviour and Assumptions that Affect the Energy Performance of Buildings; Comparison with In Situ Measurements," 5th International Renewable and Clean Energy Conference, Yerevan.

[22] Αλεξανδρή, Ε., 2010, "Προτάσεις για την Ενεργειακή Αναβάθμιση Κτιρίων Κατοικίας του ΟΕΚ," ΟΕΚ, Αθήνα.

Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΕΜΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΣΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΕΠΙΠΕΔΑ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΣΧΕΔΟΝ ΜΗΔΕΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ (NZEB)

Παναγιώτης Χαστάς*, Θεόδωρος Θεοδοσίου, Κάρολος Κοντολέων, Δημήτριος Μπίκας

Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσική των Κτιρίων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ, 541 24 Θεσσαλονίκη,
e-mail: pchastas@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πλαίσιο της ευρωπαϊκής οδηγίας 2010/31/ΕΕ (EPBD recast), παρατηρείται αυξημένη εφαρμογή δεσμών μέτρων για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Προτεινόμενες παρεμβάσεις όπως η ενίσχυση του πάχους της θερμομόνωσης, η χρήση ενεργειακά αποδοτικών κουφωμάτων με πολλαπλούς υαλοπίνακες ή ακόμα και η χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οδηγούν σε συνεχώς αυξανόμενη χρήση υλικών. Η διεθνής και εθνική βιβλιογραφία υποδεικνύουν ότι η αυξημένη χρήση υλικών συνδέεται με μία παράλληλη αύξηση της εμπεριεχόμενης ενέργειας, η οποία συμμετέχει με ποσοστό μεταξύ 74% και 100% στη συνολική ενέργεια του πλήρους κύκλου ζωής των κτιρίων κατοικίας με σχεδόν μηδενική ενεργειακή κατανάλωση (nearly zero energy building-nZEB). Η ισχύουσα ευρωπαϊκή νομοθεσία για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων χαρακτηρίζεται ως «ατελής», καθώς λαμβάνει υπόψη μόνο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις -υπό μορφή διοξειδίου του άνθρακα- οι οποίες προκύπτουν από τη φάση λειτουργίας, αγνοώντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τα υπόλοιπα στάδια του κύκλου ζωής ενός κτιρίου. Παρόλα αυτά, οι συνοδευτικές οδηγίες του κανονισμού 244/2012, αναγνωρίζουν την «ατέλεια» αυτή και προσφέρουν τη δυνατότητα διεύρυνσης των ορίων της μεθόδου σε πλήρη κοστολόγηση και Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ). Η παρούσα μελέτη λαμβάνει υπόψη τη δυνατότητα αυτή, την οποία και εφαρμόζει σε ένα κτίριο κατοικίας με σχεδόν μηδενική ενεργειακή κατανάλωση το οποίο εντοπίζεται στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Για το σκοπό αυτό υπολογίζεται και αναλύεται η επιρροή των εμπεριεχόμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα βέλτιστα επίπεδα κόστους, σε μακροοικονομικό επίπεδο και μέσω εκτεταμένης ανάλυσης ευαισθησίας, έχοντας ως απώτερο στόχο την αποτίμηση της ατέλειας των ευρωπαϊκών κανονισμών. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν περιορισμένη επίδραση των εμπεριεχόμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα βέλτιστα επίπεδα κόστους, η οποία εντοπίζεται στις εκτεταμένες περιόδους υπολογισμού (50 και 60 έτη) και στα χαμηλά επιτόκια (2% και 3%) της ανάλυσης ευαισθησίας και κυρίως σε συνδυασμό με άλλες εξεταζόμενες παραμέτρους, όπως η μείωση στις τιμές της ενέργειας και των καυσίμων ή η αύξηση στις τιμές εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Η επέκταση της μεθοδολογίας σε πλήρη ΑΚΖ οδηγεί σε εναλλαγή της βέλτιστης οικονομικά λύσης, με παράλληλη μετατόπιση του βέλτιστου επιπέδου κόστους σε παραλλαγές που χαρακτηρίζονται από χαμηλότερα επίπεδα θερμομόνωσης, χαμηλότερο αριθμό υαλοπινάκων και κατ' επέκταση σε περιορισμένες εμπεριεχόμενες εκπομπές.

Λέξεις Κλειδιά: Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), εμπεριεχόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, κτίρια σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης, βέλτιστα επίπεδα κόστους, εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

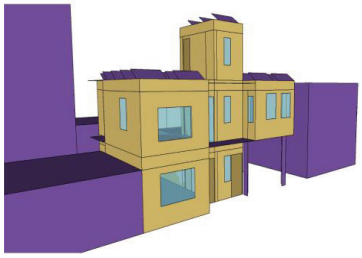
Η Ευρωπαϊκή Ένωση το 2010 ενίσχυσε το θεσμικό πλαίσιο για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) στον κτιριακό τομέα μέσω της Ευρωπαϊκής Οδηγίας 2010/31/ΕΕ [1], του κατ' εξουσιοδότηση Κανονισμού 244/2012 [2] και των κατευθυντήριων γραμμών που τον συνοδεύουν [3]. Η ενίσχυση αυτή των κανονισμών για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων επικεντρώνεται στην ενέργεια και τις εκπομπές που σχετίζονται με τη φάση λειτουργίας ενός κτιρίου. Στη διεθνή βιβλιογραφία εντοπίζεται μία μείωση στην ενέργεια λειτουργίας των κτιρίων (χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, παθητικά και κτίρια σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης-nZEB) [4-7] η οποία συνδέεται με την αυξανόμενη αυστηρότητα των κανονισμών. Η μείωση αυτή συνοδεύεται από μία αύξηση της εμπεριεχόμενης ενέργειας (embodied energy) όταν το κτίριο εξετάζεται με μεθοδολογία Ενεργειακής Ανάλυσης Κύκλου ζωής (Life Cycle Energy Analysis-LCEA), με αποτέλεσμα το ποσοστό συμμετοχής της στη συνολική ενέργεια του πλήρους κύκλου ζωής των κτιρίων κατοικίας σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης να κυμαίνεται μεταξύ 74% και 100% [7]. Η εκτεταμένη χρήση υλικών και μηχανολογικού εξοπλισμού [8] υποδεικνύει μία αυξημένη αρχική (κατά την κατασκευή του κτιρίου) αλλά και μετέπειτα/περιοδική (κατά τη λειτουργία και συντήρηση του κτιρίου) [9] εμπεριεχόμενη ενέργεια και ενθαρρύνει μεθοδολογίες θεώρησης πλήρους κύκλου ζωής για τα κτίρια μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης (Life Cycle-ZEB) [10] καθώς και προσεγγίσεις που σχετίζονται με τη βιώσιμη [11], την περιβαλλοντική και οικονομική θεώρηση των κατασκευών [12]. Οι εμπεριεχόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις έχουν αρχίσει να εκτιμώνται και να λαμβάνονται υπόψη σε εθνικές νομοθεσίες και πιστοποιήσεις, όπως το Minergie A στην Ελβετία [13] υπό μορφή εμπεριεχόμενης ενέργειας και τα ZEB-OM, ZEB-COME και ZEB-COMPLETE στη Νορβηγία υπό μορφή εμπεριεχόμενων εκπομπών CO_2 [14]. Παρόλα αυτά, τα νομοθετικά αυτά πλαίσια στηρίζουν την παραγωγή ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ως αντίβαρο για τις εμπεριεχόμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, με αποτέλεσμα την ενθάρρυνση και χρήση όλο και περισσότερων υλικών και πόρων. Εκτός από τις εθνικές νομοθεσίες, η ισχύουσα ευρωπαϊκή νομοθεσία για τα κτίρια σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης, όπως ορίζεται από την Οδηγία 2010/31/ΕΕ, τον κατ' εξουσιοδότηση Κανονισμό 244/2012 [2] και τις κατευθυντήριες γραμμές που τον συνοδεύουν, χαρακτηρίζεται από μία «ατέλεια». Ο μακροοικονομικός υπολογισμός λαμβάνει υπόψη τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο υπό μορφή εκπομπών CO_2 μόνο για τη φάση λειτουργίας του κτιρίου, με την μετατροπή τους σε νομισματικές μονάδες μέσω των τιμών του διεθνούς Συστήματος Εμπορίας Εκπομπών (Emission Trading System-ETS), και αγνοώντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τα λοιπά στάδια του κύκλου ζωής του. Παρόλα αυτά οι κατευθυντήριες γραμμές του κανονισμού 244/2012 αναγνωρίζουν αυτή την «ατέλεια» της διαδικασίας αποτίμησης και προσφέρουν τη δυνατότητα να συμπεριληφθεί η εμπεριεχόμενη «γκρίζα» ενέργεια, καθώς *«επαφίεται στα κράτη μέλη να επεκτείνουν τη μέθοδο στην πλήρη κοστολόγηση του κύκλου ζωής και, προς τον σκοπό αυτό, να μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν τα ευρωπαϊκά πρότυπα EN ISO 14040 [15], 14044 [16] και 14025 [17]»* [3]. Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η επέκταση του μεθοδολογικού πλαισίου για τον υπολογισμό των βέλτιστων επιπέδων κόστους των κτιρίων σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης σε μία πλήρη κοστολόγηση και Ανάλυση Κύκλου Ζωής. Απώτερο στόχο αποτελεί η αποτίμηση της επιρροής των εμπεριεχόμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα βέλτιστα επίπεδα κόστους των κτιρίων κατοικίας με σχεδόν μηδενική ενεργειακή κατανάλωση και ο εντοπισμός των πιο σημαντικών παραγόντων που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. «Αντιπροσωπευτικό» υπό μελέτη κτίριο αναφοράς

Καθώς η Ελλάδα δεν έχει ολοκληρώσει τις υποχρεώσεις της για τον ορισμό των κτιρίων αναφοράς και των βέλτιστων επιπέδων κόστους για τα κτίρια σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης [18, 19], μία στατιστική ανάλυση για το Ελληνικό κτιριακό απόθεμα [20] και συγκεκριμένα για την κλιματική ζώνη Γ [21], οδήγησε στον προσδιορισμό ενός αντιπροσωπευτικού κτιρίου αναφοράς το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες εφαρμογής του παρόντος μεθοδολογικού πλαισίου. Το κτίριο, είναι κτίριο μονοκατοικίας, εντοπίζεται στην περιοχή της Θεσσαλονίκης, έχει συνολική επιφάνεια 191,10 m^2, θερμαινόμενη επιφάνεια 123,75 m^2 και ακολουθεί νότιο προσανατολισμό. Αποτελείται από ισόγειο, όροφο και δώμα και έχει δύο θερμαινόμενες ζώνες (ένα διαμέρισμα ανά όροφο) και δύο μη θερμαινόμενες ζώνες (κοινόχρηστο κλιμακοστάσιο και λεβητοστάσιο με συνολική μη θερμαινόμενη επιφάνεια 34,86 m^2). Στο ισόγειο υπάρχει πυλωτή για τη στάθμευση των αυτοκινήτων (εμβαδόν 32,49

m^2). Το κτίριο έχει διαστασιολογηθεί σύμφωνα με τις ελάχιστες απαιτήσεις του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης των Κτιρίων (ΚΕΝΑΚ) [22] για την κλιματική ζώνη Γ και την ενεργειακή κλάση Β. Ως θερμομόνωση έχει επιλεγεί η εξηλασμένη πολυστερίνη (XPS) (7 cm για τα κατακόρυφα δομικά στοιχεία, 8 cm για τα οριζόντια δομικά στοιχεία και 4 cm για τα δομικά στοιχεία σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο). Για τις διαφανείς επιφάνειες του κτιρίου έχουν επιλεγεί συνθετικά κουφώματα (PVC) με διπλό υαλοπίνακα (4/6αέρας/4).

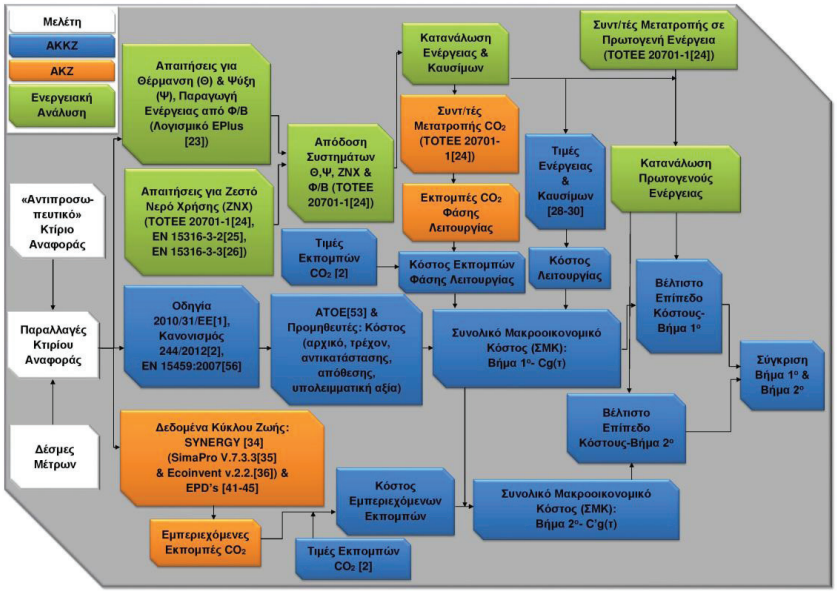


Εικόνα 1: Τρισδιάστατη απεικόνιση του «χαρακτηριστικού» υπό μελέτη κτιρίου αναφοράς

Οι ετήσιες απαιτήσεις για τη θέρμανση (53,59 kWh/m^2·ετησίως-κτίριο αναφοράς) και για την ψύξη (33,27 kWh/m^2·ετησίως-κτίριο αναφοράς) του κτιρίου υπολογίστηκαν μέσω δυναμικής ενεργειακής προσομοίωσης με το λογισμικό Energy Plus [23] ενώ οι απαιτήσεις για Ζεστό Νερό Χρήσης (ΖΝΧ) (30,30 kWh/m^2·ετησίως-κτίριο αναφοράς) σύμφωνα με τις τεχνικές οδηγίες του ΚΕΝΑΚ [24] και τα πρότυπα EN 15316-3-2 [25] και EN 15316-3-3 [26]. Το κτίριο θεωρείται ότι έχει φυσικό αερισμό και δεν λαμβάνονται υπόψη οι απαιτήσεις για φωτισμό όπως ορίζεται από την ισχύουσα εθνική νομοθεσία για τα κτίρια κατοικίας. Οι ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου υπολογίζονται για την επιφάνεια αναφοράς του κτιρίου, όπως αυτή ορίζεται από τον ΚΕΝΑΚ και την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2010/31/ΕΕ, η οποία στην παρούσα μελέτη ταυτίζεται με την θερμαινόμενη επιφάνεια του κτιρίου (123,75 m^2).

2.2. Ανάλυση

Το παρόν μεθοδολογικό πλαίσιο παρουσιάζεται αναλυτικά στην ακόλουθη Εικόνα 2 και αναλύεται στις επόμενες τρεις υπό-ενότητες.



Εικόνα 2: Διάγραμμα ροής-Μεθοδολογικό πλαίσιο

2.2.1. Ενεργειακή Ανάλυση (Energy Analysis)

Στην παρούσα μελέτη η ενεργειακή ανάλυση εφαρμόζεται για την ποσοτικοποίηση των ενεργειακών απαιτήσεων για θέρμανση, ψύξη, ζεστό νερό χρήσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ. Επίσης, για τον υπολογισμό των καταναλώσεων, της παραγωγής ενέργειας και τέλος της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας που προκύπτει από τη φάση λειτουργίας του υπό μελέτη κτιρίου. Για την επίτευξη του στόχου της μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης εφαρμόζονται μία σειρά από μέτρα τα οποία περιλαμβάνουν τη διαφοροποίηση στο πάχος της θερμομόνωσης, τη χρήση ενεργειακά αποδοτικών κουφωμάτων και την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πλαισίων (Φ/Β) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με τον παράλληλο συνδυασμό τους σε δέσμες μέτρων και τέλος σε παραλλαγές του υπό μελέτη «χαρακτηριστικού» κτιρίου αναφοράς. Το πάχος της θερμομόνωσης κυμαίνεται μεταξύ 3 cm και 14 cm, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα πάχη των 11 cm και 13 cm λόγω έλλειψης δυνατότητας για άμεση προμήθεια στην ελληνική αγορά. Ως θερμομόνωση επιλέχτηκε η εξηλασμένη πολυστερίνη με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας (λ) ίσο με 0,035 (W/m·K). Όσον αφορά τα κουφώματα του κτιρίου, εξετάζονται οκτώ διαφορετικοί τύποι με συνθετικό (PVC) πλαίσιο (συντελεστής θερμοπερατότητας Uf=1,60 (W/m^2·K)) και με διαφοροποίηση μόνο στη διάφανη επιφάνειά τους (Πίνακας 1). Ο συντελεστής θερμοπερατότητας των θυρών εισόδου του κτιρίου θεωρείται ίσος με 1,40 (W/m^2·K).

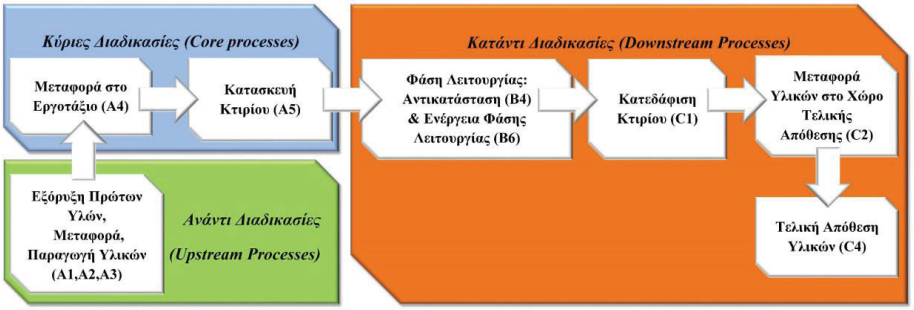
Πίνακας 1: Μέτρα ενεργειακής απόδοσης. Διαφανείς επιφάνειες του κτιρίου. Μέσος Συντελεστής θερμοπερατότητας (U-value) κουφώματος (w: window, α:αέρας, αρ: αργό)

Διάταξη Διαφανούς Επιφάνειας	W1 6/12α/6	W2 6/12αρ/6	W3 lowe6/12α/6	W4 6/12α/6 /12α/6	W5 6/12αρ/ 6/12αρ/6	W6 lowe6/ 12αρ/6	W7 lowe6/ 12α/ 6/12α/6	W8 lowe6/ 12αρ/ 6/12αρ/6
U_w (W/m^2·K)	2,56	2,44	1,95	1,88	1,78	1,76	1,61	1,47

Η παραγωγή ενέργειας από Φ/Β προσομοιώθηκε και υπολογίστηκε με το λογισμικό Energy Plus (one diode equivalent method). Ο επιλεγμένος τύπος Φ/Β πλαισίων έχει εμβαδόν 1,65 m^2/τεμάχιο [27]. Η απόδοση του αντιστροφέα θεωρείται ίση με 96%. Η ανάλυση των Φ/Β εξετάζεται για εγκατεστημένη ισχύ μεταξύ 1,0 kW (παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 1.420,89 kWh ετησίως) και 4,0 kW (παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 5.471,66 kWh ετησίως) και με αυξανόμενο βήμα 0,5 kW εγκατεστημένης ισχύος [27]. Η εγκατάσταση θεωρείται συνδεδεμένη με το δίκτυο με συμβόλαιο εγγυημένης τιμής πώλησης (0,115€/kWh) καθώς αυτό αντικατοπτρίζει την μέχρι σήμερα ελληνική πραγματικότητα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από οικιακά Φ/Β [27]. Η ανάλυση ολοκληρώνεται με ένα σενάριο μηδενικής εγκατεστημένης ισχύος, το οποίο αντιστοιχεί και στο υπό μελέτη κτίριο αναφοράς. Τα προαναφερόμενα μέτρα συνδυάζονται με όλους τους δυνατούς συνδυασμούς δίνοντας ένα τελικό αριθμό 10 × 8 × 8 = 640 παραλλαγών του υπό μελέτη κτιρίου. Το κτίριο και οι παραλλαγές του εξετάζονται επίσης για τρία διαφορετικά σενάρια ενεργειακών φορέων: φυσικό αέριο (τιμή προμήθειας 0,050€), πετρέλαιο (τιμή προμήθειας 0,053€) και ηλεκτρισμό (τιμή προμήθειας 0,1557€) [28-30]. Το πρώτο σενάριο περιλαμβάνει την κάλυψη των αναγκών για θέρμανση και ΖΝΧ με λέβητα φυσικού αερίου και των αναγκών για ψύξη με τοπική αντλία θερμότητας (αέρος-αέρος). Στο δεύτερο σενάριο ο λέβητας φυσικού αερίου αντικαθίσταται με λέβητα πετρελαίου, ενώ στο τρίτο σενάριο οι ανάγκες για θέρμανση και ψύξη καλύπτονται με τοπική αντλία θερμότητας και για το ΖΝΧ με ηλεκτρικό θερμοσίφωνα. Χρησιμοποιώντας τις ελάχιστες απαιτήσεις και τιμές της απόδοσης των συστημάτων για θέρμανση, ψύξη και ΖΝΧ κατά ΚΕΝΑΚ για τα τρία προαναφερόμενα σενάρια καθώς και τους εθνικούς συντελεστές μετατροπής σε πρωτογενή ενέργεια [24, 27], υπολογίζεται η τελική κατανάλωση σε ηλεκτρική ενέργεια και καύσιμα και τέλος η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας.

2.2.2. Ανάλυση Κύκλου Ζωής-ΑΚΖ (Life Cycle Assessment-LCA)

Στον κτιριακό τομέα η ΑΚΖ αποτελεί μία μέθοδο που χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός κτιρίου και το μεθοδολογικό της πλαίσιο ορίζεται από τα διεθνή πρότυπα ISO 14040 [15], ISO 14044 [16] και ISO 14025 [17]. Η παρούσα ανάλυση λαμβάνει υπόψη το σύνολο των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την παραγωγή των υλικών μέχρι και την τελική απόθεση κατά το τέλος του κύκλου ζωής τους (cradle to grave). Τα όρια του παρόντος συστήματος (Εικόνα 3), ορίστηκαν ακολουθώντας τις προδιαγραφές και τις οδηγίες των ευρωπαϊκών προτύπων EN 15978 [31] και EN 15804 [32].



Εικόνα 3: Διαδικασίες κύκλου ζωής του κτιρίου και όρια του υπό μελέτη συστήματος [31, 32]

Για τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων επιλέχτηκε ο περιβαλλοντικός δείκτης Global Warming Potential Effect (GWP-100a) της μεθόδου CML 2 Baseline 2000 v.2.05 [33]. Ο κατάλογος των δεδομένων κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory-LCI) προέρχεται από τη βάση περιβαλλοντικών δεδομένων του ερευνητικού έργου SYNERGY 2011 [34], η οποία βασίστηκε στη χρήση του λογισμικού AKZ Sima Pro v.7.3.3 [35] και στη βάση δεδομένων Ecoinvent v.2.2 [36]. Όσες απαραίτητες πληροφορίες δεν ήταν διαθέσιμες στη βάση δεδομένων του SYNERGY προέρχονται από τη διεθνή βιβλιογραφία [37-39] και από το σύστημα Περιβαλλοντικής Δήλωσης Προϊόντων (Environmental Product Declaration (EPD) system [40]) [41-45]. Αξίζει να τονιστεί ότι η χρήση περιβαλλοντικών δεδομένων από διεθνείς βάσεις δεδομένων, λόγω έλλειψης αντίστοιχων ελληνικών καταγραφών, ενέχει πιθανή ευαισθησία και αβεβαιότητα στα τελικά αποτελέσματα. Για το κτίριο αναφοράς και για κάθε παραλλαγή του υπολογίστηκαν οι ποσότητες υλικών του συνόλου της κατασκευής [27] χωρίς όμως να λαμβάνονται υπόψη οι τελικές επικαλύψεις στους χώρους υγιεινής καθώς και ο υδραυλικός και ηλεκτρολογικός εξοπλισμός που δεν σχετίζεται με την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Η ενέργεια για την κατασκευή του κτιρίου (διαδικασία A5, Εικόνα 3) υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη των όγκο των εργασιών και τιμές από τη διεθνή βιβλιογραφία [37]. Η μεταφορά των υλικών (διαδικασίες A4 και C2, Εικόνα 3) υπολογίστηκε επακριβώς από τον προμηθευτή μέχρι το εργοτάξιο και από το εργοτάξιο μέχρι την τελική τους απόθεση, λαμβάνοντας υπόψη τη χρήση φορτηγού και εμπορευματικού τρένου για αποστάσεις κάτω και άνω των 800 km αντίστοιχα. Για τη φάση κατασκευής και αντικατάστασης χρησιμοποιήθηκαν συντελεστές υπολογισμού των αποβλήτων (waste factors) που προκύπτουν από τις διαδικασίες αυτές [46-49]. Η διάρκεια ζωής (reference service life) των υλικών και του μηχανολογικού εξοπλισμού [40, 50, 51], σε συνδυασμό με τις αρχικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υλικών (διαδικασίες A1, A2 και A3, Εικόνα 3) προσδίδουν τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της φάσης αντικατάστασής τους (διαδικασία B4, Εικόνα 3). Η κατεδάφιση του κτιρίου και η τελική αποκατάσταση του εργοταξίου/οικοπέδου θεωρείται ότι διεξάγονται με υδραυλικό εκσκαφέα. Για το τέλος του κύκλου ζωής λαμβάνεται υπόψη η μεταφορά των υλικών και η τελική απόθεσή τους σε χώρο υγειονομικής ταφής σε απόσταση 25 km από το χώρο του εργοταξίου. Παρόλο που η διάρκεια ζωής ενός κτιρίου κυμαίνεται μεταξύ των 80 και 100 ετών, για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης εξετάζονται τρεις χρονικές περίοδοι: μία περίοδος υπολογισμού 30 ετών όπως ορίζεται από την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2010/31/ΕΕ [1], μία περίοδος 50 ετών όπως ορίζεται από την PCR 2014:02 [52] (Product Category Rule for Buildings) και μία περίοδος 60 ετών όπως λαμβάνεται υπόψη στα ευρέως διαδεδομένα Εργαλεία Βιώσιμης Διαχείρισης των Κτιρίων (Building Sustainability Assessment Tools) [53, 54]. Οι καταναλώσεις σε ενέργεια και καύσιμα από τη φάση λειτουργίας του κτιρίου (διαδικασία B6, Εικόνα 3) υπολογίστηκαν αναλυτικά σύμφωνα με την προηγούμενη υπο-ενότητα (*2.2.1 Ενεργειακή Ανάλυση-Energy Analysis*). Η μετατροπή τους σε εκπομπές CO_2 έγινε λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές εκλυόμενων ρύπων ανά μονάδα ενέργειας όπως αυτές ορίζονται από τον ΚΕΝΑΚ [24].

2.2.3. Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής-ΑΚΚΖ (Life Cycle Cost Assessment-LCCA)

Η ΑΚΚΖ *«είναι μια μεθοδολογία για το συστηματικό οικονομικό υπολογισμό του κόστους κύκλου ζωής για μια περίοδο ανάλυσης, όπως αυτή προσδιορίζεται από το σκοπό της μελέτης»* [51]. Συγκεκριμένα στον κτιριακό τομέα χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του συνολικού κόστους από τον κύκλο ζωής ενός κτιρίου. Στην Ευρωπαϊκή Οδηγία 2010/31/ΕΕ, η ανάλυση κόστους ακολουθεί τη μέθοδο της Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value-NPV) για τον υπολογισμό του κόστους της αρχικής επένδυσης (υλικά, μεταφορά στο εργοτάξιο, εργασία, σχεδιασμός και κατασκευή), του μελλοντικού/περιοδικού κόστους (τρέχον κόστος, κόστος αντικατάστασης, ενεργειακό κόστος και κόστος ανθρακούχων εκπομπών) και του κόστους διάθεσης (κατεδάφιση κτιρίου, μεταφορά και τελική

απόθεση/ανακύκλωση/διαχείριση των υλικών) κατά το τέλος του κύκλου ζωής του κτιρίου. Στην παρούσα μελέτη λαμβάνονται υπόψη όλα τα προαναφερόμενα κόστη. Το κόστος σχεδιασμού θεωρήθηκε ίσο με το 50% της ελάχιστης νόμιμης αμοιβής που προκύπτει σύμφωνα με το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος για τη μελέτη, το σχεδιασμό και την αδειοδότηση της κατασκευής του υπό μελέτη κτιρίου. Το κόστος των υλικών, της μεταφοράς, της κατασκευής, της αντικατάστασης και της κατεδάφισης το κτιρίου έχει υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των πινάκων οικοδομικών εργασιών ΑΤΟΕ (Αναλυτικό Τιμολόγιο Οικοδομικών Εργασιών) [55], για την τελική διαμόρφωση των οποίων λήφθηκε υπόψη μία εκτεταμένη στατιστική ανάλυση των τάσεων έκπτωσης/προσφοράς στις δημοπρατήσεις δημοσίων οικοδομικών έργων καθώς και οι τάσεις της ελληνικής αγοράς δομικών υλικών μέσω προσφορών από προμηθευτές. Τα τρέχοντα κόστη θεωρήθηκαν ίσα με το 3% επί της αρχικής επένδυσης για τις ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις του κτιρίου [56]. Το κόστος ενέργειας και καυσίμων ακολούθησε τις τιμές της ελληνικής αγοράς στο τέλος του έτους 2015 [28-30] καθώς ως έτος έναρξης της περιόδου υπολογισμού ορίζεται το έτος 2016, ενώ για το κόστος ανθρακούχων εκπομπών λήφθηκαν υπόψη διάφορα μελλοντικά σενάρια μεταβολής του κόστους εκπομπών CO_2 [2, 3]. Τέλος, το κόστος διάθεσης των υλικών μετά την κατεδάφιση του κτιρίου ορίστηκε ως το κόστος μεταφοράς και εισόδου των αδιαχείριστων ΑΕΚΚ (Απόβλητα Εκσκαφών Κατασκευών και Κατεδαφίσεων) σε χώρο υγειονομικής ταφής σε απόσταση 25 km από το εργοτάξιο.

2.3. Μεθοδολογία

2.3.1. Βήμα 1ο

Στο πρώτο βήμα υπολογίζεται το συνολικό μακροοικονομικό κόστος, όπως ορίζεται από την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2010/31/ΕΕ, τον κανονισμό 244/2012 και τις κατευθυντήριες γραμμές του, και όπως παρουσιάζεται στις δύο ακόλουθες εξισώσεις:

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j [\sum_{i=1}^{\tau} (C_{a,i(j)} \times R_{d(i)} + C_{c,i(j)}) - V_{f,\tau(j)}], \quad (1)$$

και

$$R_{d(p)} = (\frac{1}{1+\frac{r}{100}})^p, \quad (2)$$

όπου: τ είναι η περίοδος υπολογισμού σε έτη, $C_g(\tau)$ είναι το συνολικό μακροοικονομικό κόστος (ως προς το έτος έναρξης $\tau 0$) για την περίοδο υπολογισμού (σε ευρώ), C_I είναι το αρχικό κόστος της επένδυσης για το μέτρο ή σύνολο μέτρων *j* (σε ευρώ), $C_{a,i(j)}$ είναι το ετήσιο (τρέχον, ενεργειακό, αντικατάστασης) κόστος του μέτρου ή συνόλου μέτρων *j* κατά το έτος *i* (σε ευρώ), $R_{d(i)}$ είναι ο συντελεστής προεξόφλησης για το έτος *i* με βάση το προεξοφλητικό επιτόκιο *r*, p είναι ο αριθμός των ετών από την έναρξη της περιόδου υπολογισμού, *r* είναι το πραγματικό προεξοφλητικό επιτόκιο, $V_{f,\tau(j)}$ είναι η υπολειμματική αξία του μέτρου ή συνόλου μέτρων *j* στο τέλος της περιόδου υπολογισμού (που έχει αναχθεί στο έτος έναρξης $\tau 0$) (σε ευρώ) και $C_{c,i(j)}$ είναι το κόστος του μέτρου ή συνόλου μέτρων *j* για τις ανθρακούχες εκπομπές κατά τη διάρκεια του έτους *i* (σε ευρώ).

Για τους μακροοικονομικούς υπολογισμούς οι τιμές δεν περιλαμβάνουν φόρους, ΦΠΑ, τέλη και επιδοτήσεις. Από τον υπολογισμό του συνολικού μακροοικονομικού κόστους και τον υπολογισμό της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας για το κτίριο αναφοράς και για κάθε παραλλαγή του, υπολογίζεται το εύρος του βέλτιστου κόστους και το οικονομικό βέλτιστο επίπεδο.

2.3.2. Βήμα 2ο

Στο δεύτερο βήμα επαναπροσδιορίζεται το συνολικό μακροοικονομικό κόστος, με επέκταση του κόστους των εκπομπών σε θεώρηση κύκλου ζωής και τη συμμετοχή των ανθρακούχων εκπομπών από όλο τον κύκλο ζωής του κτιρίου. Η ΑΚΖ εφαρμόζεται για κάθε διαδικασία εντός των ορίων του συστήματος (Εικόνα 3) και υπολογίζονται οι συνολικές εκπομπές σε κιλά ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα ($kgCO_2e$). Κάθε εκπομπή υπολογίζεται και τοποθετείται στο έτος της περιόδου υπολογισμού κατά το οποίο λαμβάνει χώρα, μετατρέπεται σε νομισματικές μονάδες (ευρώ) λαμβάνοντας υπόψη τα διάφορα σενάρια για τιμές ανθρακούχων εκπομπών, προστίθεται στο κόστος εκπομπών της φάσης λειτουργίας για το αντίστοιχο έτος και ανάγεται στο έτος έναρξης της περιόδου υπολογισμού. Οι υπολογισμοί του δεύτερου βήματος παρουσιάζονται αναλυτικά στις δύο ακόλουθες εξισώσεις:

$$C'_g(\tau) = C_I + \sum_j [\sum_{i=1}^{\tau} (C_{ai(j)} \times R_{g(i)} + C'_{ci(j)}) - V_{f,\tau(j)}], \quad (3)$$

και:

$$C'_{ci(j)} = C_{ci(j)} + C_{cenbi(j)}, \quad (4)$$

όπου:

$C'_g(\tau)$ είναι το συνολικό μακροοικονομικό κόστος (ως προς το έτος έναρξης *τ0*) για την περίοδο υπολογισμού (σε ευρώ) και για τη συνολική θεώρηση κύκλου ζωής η οποία περιλαμβάνει το κόστος των εμπεριεχόμενων εκπομπών και των εκπομπών της φάσης λειτουργίας, $C_{ci(j)}$ είναι το κόστος του μέτρου ή συνόλου μέτρων *j* για τις ανθρακούχες εκπομπές κατά τη διάρκεια του έτους *i* (σε ευρώ) το οποίο σχετίζεται με τη φάση λειτουργίας του κτιρίου, $C_{cenbi(j)}$ είναι το κόστος του μέτρου ή συνόλου μέτρων *j* για τις εμπεριεχόμενες ανθρακούχες εκπομπές κατά τη διάρκεια του έτους *i* σε (ευρώ) και $C'_{ci(j)}$ είναι το συνολικό κόστος του μέτρου ή συνόλου μέτρων *j* για το σύνολο των ανθρακούχων εκπομπών (εμπεριεχόμενες και λειτουργίας) κατά τη διάρκεια του έτους *i* (σε ευρώ).

Μετά από τον υπολογισμό του συνολικού μακροοικονομικού κόστους στο δεύτερο μεθοδολογικό βήμα, το εύρος του βέλτιστου κόστους και το οικονομικό βέλτιστο επίπεδο επαναπροσδιορίζονται και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα του πρώτου βήματος.

2.3.3. Ανάλυση Ευαισθησίας

Ο κατ' εξουσιοδότηση κανονισμός 244/2012 και οι συνοδευτικές του οδηγίες ορίζουν την υποχρέωση για ανάλυση ευαισθησίας ως προς τις σημαντικότερες παραμέτρους, όπως το επιτόκιο και η εξέλιξη των ενεργειακών τιμών, καθώς και για άλλες παραμέτρους των οποίων η μελλοντική εξέλιξη μπορεί να επηρεάσει το τελικό αποτέλεσμα [2].

Πίνακας 2: Σενάρια ανάλυσης ευαισθησίας. Διαφοροποίηση στην εξέλιξη των τιμών των βασικών - υπό εξέταση- παραμέτρων

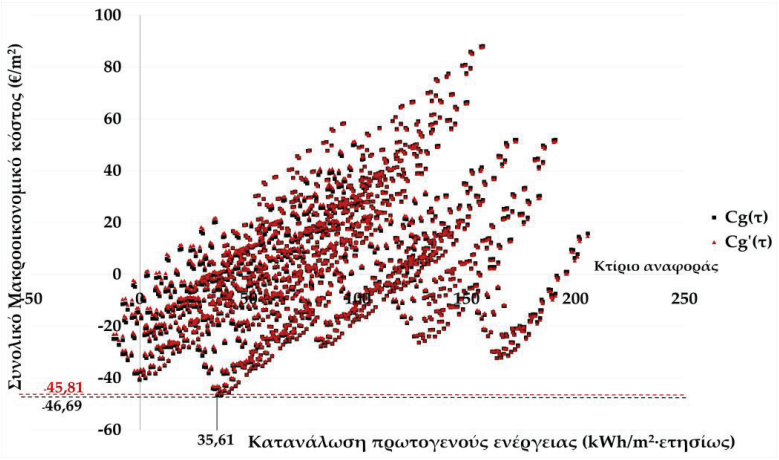
Σενάρια	Διαφοροποίηση της εξέλιξης των τιμών [2, 27, 57]								
	Ενεργειακές	Κατασκευής	Ανθρακούχων Εκπομπών (€)						
	(%)	(%)	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Re (Αναφοράς)	2,80	0,00	16,5	20,0	36,0	50,0	52,0	51,0	50,0
Lpr (Μείωση τιμών κατασκευής)	2,80	−2,32	16,5	20,0	36,0	50,0	52,0	51,0	50,0
HCO_2 (Υψηλή αύξηση τιμών εκπομπών)	2,80	0,00	25,0	38,0	60,0	64,0	78,0	115,0	190,0
MCO_2 (Μεσαία αύξηση τιμών εκπομπών)	2,80	0,00	25,0	34,0	51,0	53,0	64,0	92,0	147,0
Len (Χαμηλές ενεργειακές τιμές)	1,87	0,00	16,5	20,0	36,0	50,0	52,0	51,0	50,0
Hen (Υψηλές ενεργειακές τιμές)	4,20	0,00	16,5	20,0	36,0	50,0	52,0	51,0	50,0

Η ανάλυση ευαισθησίας (Πίνακας 2) ολοκληρώνεται για τις τρεις διαφορετικές περιόδους υπολογισμού (30, 50 και 60 έτη) όπως αυτές αναλύονται στην προηγούμενη υπο-ενότητα *2.2.2. Ανάλυση Κύκλου*

Ζωής-AKZ (Life Cycle Assessment-LCA). Το σύνολο των εξεταζόμενων παραμέτρων της ανάλυσης ευαισθησίας (Πίνακας 2) εφαρμόζεται και για τα δύο βήματα του παρόντος μεθοδολογικού πλαισίου.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το συνολικό μακροοικονομικό κόστος (ΣΜΚ) υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ του συνολικού κόστους του κτιρίου αναφοράς και κάθε παραλλαγής του και για κάθε βήμα του μεθοδολογικού πλαισίου, με τον οριζόντιο άξονα να αντιστοιχεί στο συνολικό μακροοικονομικό κόστος (μηδενική διαφορά) του κτιρίου αναφοράς (Εικόνα 4). Για το βασικό σενάριο αναφοράς το ΣΜΚ του βέλτιστου επιπέδου κόστους (Βήμα 1ο, Cg(τ)) αντιστοιχεί σε 1.285,83 €/m^2, με κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ίση με 35,61 kWh/m^2·ετησίως και μία διαφορά -46,69 €/m^2 από το ΣΜΚ του κτιρίου αναφοράς (Εικόνα 4). Το βέλτιστο επίπεδο κόστους αντικατοπτρίζει πάχος θερμομόνωσης 10 cm, διαφανή επιφάνεια (W6: low-e 6/12αργό/6, Πίνακας 1), 4,0kW εγκατεστημένη ισχύ Φ/Β πλαισίων και τη χρήση ηλεκτρισμού ως πηγή ενέργειας. Το βέλτιστο επίπεδο κόστους για την πλήρη θεώρηση κύκλου ζωής (Βήμα 2ο) και το σενάριο αναφοράς ταυτίζεται με τα αποτελέσματα του πρώτου βήματος. Το ΣΜΚ του δεύτερου βήματος (C'g(τ) = 1.305,26 €/m^2) είναι αυξημένο κατά 1,5% σε σχέση με το πρώτο και παρουσιάζει μία διαφορά σε σχέση με το ΣΜΚ του κτιρίου αναφοράς ίση με -45,81 €/m^2 (Εικόνα 4). Η συμμετοχή των εμπεριεχόμενων εκπομπών δεν επηρεάζει το βέλτιστο επίπεδο κόστους για το σενάριο αναφοράς και για κάθε σενάριο της ανάλυσης ευαισθησίας για την περίοδο υπολογισμού των 30 ετών καθώς δεν παρατηρείται καμία μετατόπιση στο επίπεδο κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας (Εικόνα 5, η αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων στην πηγή [27]). Αυτό οφείλεται στο χαμηλό ποσοστό συμμετοχής του κόστους εκπομπών στο ΣΜΚ (με μέγιστη τιμή 4,6% για το επιτόκιο του 2%), σε συνδυασμό με τη μικρή περίοδο υπολογισμού των 30 ετών και το όφελος από τις «αποφεχθείσες» εκπομπές εξαιτίας της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ.



Εικόνα 4: Συνολικό μακροοικονομικό κόστος και βέλτιστο επίπεδο κόστους για το σενάριο αναφοράς (Re). Βήμα 1ο (Cg(τ)) and Βήμα 2ο (C'g(τ))

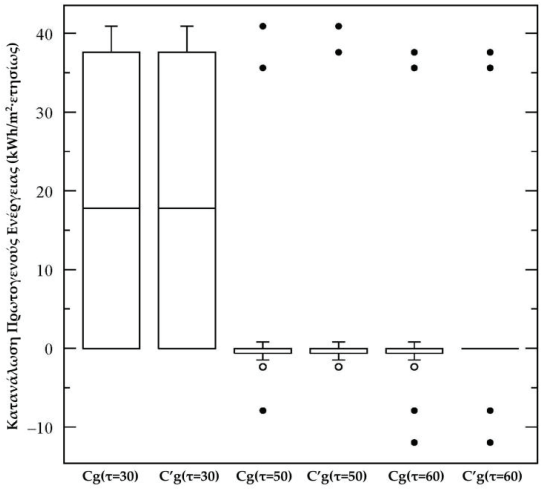
Η επιρροή των εμπεριεχόμενων εκπομπών εντοπίζεται σε χαμηλά επιτόκια (2% και 3%, σκιασμένα κελιά, Πίνακας 3 και Πίνακας 4) όπου τα μελλοντικά/περιοδικά κόστη, όπως το κόστος εκπομπών, έχουν μεγαλύτερη επιρροή και σε συνδυασμό με την αύξηση των τιμών ανθρακούχων εκπομπών (σενάριο HCO_2, σκιασμένα κελιά, Πίνακας 4) ή μία μείωση σε άλλες κατηγορίες κόστους, όπως το κατασκευαστικό (σενάριο Lpr, σκιασμένα κελιά, Πίνακας 4) ή το ενεργειακό κόστος (σενάριο Len, σκιασμένα κελιά Πίνακας 3), ενισχύουν αυτή την επιρροή. Στα τρία προαναφερόμενα σενάρια εντοπίζεται μία μετατόπιση σε παραλλαγές με χρήση λιγότερων υλικών και χαμηλότερων περιβαλλοντικών επιπτώσεων καθώς παρατηρείται μείωση στον αριθμό των υαλοπινάκων από τρεις (W8, Πίνακας 1) σε δύο (W6, Πίνακας 1) για το σενάριο HCO_2 (σκιασμένα κελιά, Πίνακας 4), μείωση στο πάχος θερμομόνωσης από 10 cm σε 9 cm για το σενάριο Len (σκιασμένα κελιά, Πίνακας 3) και από 14 cm σε 12 cm για το σενάριο Lpr (σκιασμένα κελιά, Πίνακας 4).

Πίνακας 3: Ανάλυση Ευαισθησίας. Μακροοικονομικός υπολογισμός. Περίοδος υπολογισμού 50 έτη. Βέλτιστο επίπεδο κόστους.(ΠΕ: Πρωτογενής Ενέργεια)

Βήμα 1ο – Προεξοφλητικό Επιτόκιο (r)						
Σενάρια	2%		3%		4%	
	ΠΕ (kWh/m²·ετησίως)	Cg(τ)(€)	ΠΕ (kWh/m²·ετησίως)	Cg(τ)(€)	ΠΕ (kWh/m²·ετησίως)	Cg(τ)(€)
Re	−0,06	−85,02	−0,06	−57,35	−0,06	−36,85
Lpr	−2,35	−89,41	−0,06	−60,06	−0,06	−38,79
HCO_2	−2,35	−185,50	−0,06	−130,37	−0,06	−91,04
MCO_2	−0,06	−152,56	−0,06	−106,57	−0,06	−73,41
Len	−0,06	−73,05	35,61	−52,72	40,91	−45,35
Hen	−7,91	−113,69	−2,35	−76,51	−0,06	−50,42
Βήμα 2ο – Προεξοφλητικό Επιτόκιο (r)						
Σενάρια	2%		3%		4%	
	ΠΕ (kWh/m²·ετησίως)	Cg'(τ)(€)	ΠΕ (kWh/m²·ετησίως)	Cg'(τ)(€)	ΠΕ (kWh/m²·ετησίως)	Cg'(τ)(€)
Re	−0,06	−82,34	−0,06	−55,14	−0,06	−34,98
Lpr	−2,35	−86,57	−0,06	−57,85	−0,06	−36,92
HCO_2	−2,35	−178,90	−0,06	−125,49	−0,06	−87,13
MCO_2	−0,06	−147,31	−0,06	−102,41	−0,06	−70,01
Len	−0,06	−70,36	37,60	−50,92	40,91	−44,17
Hen	−2,35	−110,80	−2,35	−74,17	−0,06	−48,54

Πίνακας 4: Ανάλυση Ευαισθησίας. Μακροοικονομικός υπολογισμός. Περίοδος υπολογισμού 60 έτη. Βέλτιστο επίπεδο κόστους.(ΠΕ: Πρωτογενής Ενέργεια)

Βήμα 1ο – Προεξοφλητικό Επιτόκιο (r)						
Σενάρια	2%		3%		4%	
	ΠΕ (kWh/m²·ετησίως)	Cg(τ)(€)	ΠΕ (kWh/m²·ετησίως)	Cg(τ)(€)	ΠΕ (kWh/m²·ετησίως)	Cg(τ)(€)
Re	−0,06	−119,99	−0,06	−77,71	−0,06	−48,78
Lpr	−11,97	−128,15	−0,06	−81,15	−0,06	−51,17
HCO_2	−2,35	−245,80	−0,06	−165,46	−0,06	−111,60
MCO_2	−0,06	−205,03	−0,06	−137,13	−0,06	−91,32
Len	−0,06	−101,38	35,61	−69,37	37,60	−55,04
Hen	−11,97	−181,33	−7,91	−109,35	−0,06	−68,66
Βήμα 2ο – Προεξοφλητικό Επιτόκιο (r)						
Σενάρια	2%		3%		4%	
	ΠΕ (kWh/m²·ετησίως)	Cg'(τ)(€)	ΠΕ (kWh/m²·ετησίως)	Cg'(τ)(€)	ΠΕ (kWh/m²·ετησίως)	Cg'(τ)(€)
Re	−0,06	−117,29	−0,06	−75,49	−0,06	−46,90
Lpr	−7,91	−124,29	−0,06	−78,93	−0,06	−49,29
HCO_2	−0,06	−239,09	−0,06	−160,54	−0,06	−107,66
MCO_2	−0,06	−199,73	−0,06	−132,94	−0,06	−87,90
Len	−0,06	−98,68	35,61	−67,41	37,60	−53,59
Hen	−11,97	−176,88	−7,91	−106,33	−0,06	−68,66



Εικόνα 5: Εύρος αποτελεσμάτων ανάλυσης ευαισθησίας για την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας του βέλτιστου οικονομικά επιπέδου κόστους. Βήμα 1ο (Cg(τ)) και Βήμα 2ο (C'g(τ))

Για το σενάριο υψηλών ενεργειακών τιμών (Hen) η αύξηση των ενεργειακών τιμών στο πρώτο βήμα οδηγεί σε μία μετατόπιση σε παραλλαγές με μεγαλύτερο πάχος θερμομόνωσης και χαμηλότερη κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, με ένα εύρος στην ανάλυση ευαισθησίας μεταξύ −0.06 kWh/m²·ετησίως (σενάριο Re, Βήμα 1ο, Πίνακας 3) και −7.91 kWh/m²·ετησίως (σενάριο Hen, Βήμα 1ο, Πίνακας 3). Η συμμετοχή των εμπεριεχόμενων εκπομπών στο δεύτερο βήμα περιορίζει το εύρος αυτό μεταξύ -0.06 kWh/m²·ετησίως (σενάριο Re, Βήμα 2ο, Πίνακας 3) και −2.35 kWh/m²·ετησίως (σενάριο Hen, Βήμα 2ο, Πίνακας 3) και υποδεικνύει μία άλλη παραλλαγή του κτιρίου για το επίπεδο βέλτιστου κόστους, η οποία χαρακτηρίζεται από χαμηλότερο πάχος θερμομόνωσης (μετατόπιση από 12 cm σε 10 cm), χαμηλότερες εμπεριεχόμενες εκπομπές και υψηλότερη κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας. Η περίοδος υπολογισμού υποδεικνύεται ως μία σημαντική παράμετρος για τον υπολογισμό του ΣΜΚ και για το εύρος ευαισθησίας της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας, καθώς το εύρος αυτό αυξάνεται μεταξύ των 30 και των 50 και 60 ετών κατά 19,17% και 21,01% αντίστοιχα, οδηγώντας σε χαμηλότερα επίπεδα πρωτογενούς ενέργειας. Το συνολικό εύρος της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας όπως προκύπτει από την ανάλυση ευαισθησίας κυμαίνεται μεταξύ −11,97 kWh/m²·ετησίως και 40,91 kWh/m²·ετησίως. Τα αποτελέσματα για την περίοδο υπολογισμού των 50 ετών (Εικόνα 5) υποδεικνύουν ότι η συμμετοχή των εμπεριεχόμενων εκπομπών οδηγεί σε μία μείωση του εύρους αυτού. Η μετατόπιση των βέλτιστων επιπέδων κόστους σε υψηλότερα επίπεδα κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας και σε χρήση λιγότερων υλικών συνδέεται με τις περιόδους υπολογισμού των 50 και 60 ετών (σκιασμένα κελιά, Πίνακας 3 και Πίνακας 4), με την επιρροή των εμπεριεχόμενων εκπομπών να εντοπίζεται εντός του εύρους της ανάλυσης ευαισθησίας όπως αυτό υπολογίζεται από το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων (Cg(τ), Βήμα 1ο, Εικόνα 5). Οι περιορισμοί και οι παραδοχές της παρούσας μελέτης (τυπολογία κτιρίου, προσανατολισμός κτιρίου, κλιματικές συνθήκες) υποδεικνύουν την ανάγκη για επέκταση της παρούσας μελέτης στους τέσσερις κύριους προσανατολισμούς του κτιρίου, στις τέσσερις κλιματικές περιοχές της Ελλάδας, στην εξέταση ενός κτιρίου με διαφορετική τυπολογία (κτίριο πολυκατοικίας) και ενός σεναρίου net metering για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β πλαίσια καθώς αυτό αποτελεί πλέον τη νέα και μελλοντική τάση στην ελληνική αγορά για τον οικιακό τομέα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα έρευνα εξετάζει την επιρροή των εμπεριεχόμενων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στα βέλτιστα επίπεδα κόστους των κτιρίων κατοικίας nZEB και αποτελεί μία προσπάθεια εξάλειψης της «ατέλειας» από την οποία χαρακτηρίζεται η ισχύουσα ευρωπαϊκή νομοθεσία για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. Η περιορισμένη συμμετοχή του κόστους εκπομπών στο συνολικό μακροοικονομικό κόστος οδηγεί σε επιρροή των εμπεριεχόμενων εκπομπών στα βέλτιστα επίπεδα

κόστους μόνο στα σενάρια της ανάλυσης ευαισθησίας που σχετίζονται με χαμηλά επιτόκια, της τάξης του 2% και 3%, τα οποία ενισχύουν την επιρροή αυτή όταν συνδυάζονται με υψηλές τιμές εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα ή χαμηλές τιμές ενέργειας και κόστους κατασκευής. Η επιρροή αυτή εντοπίζεται στις εκτεταμένες περιόδους υπολογισμού των 50 και 60 ετών, όπου η αντικατάσταση των υλικών και των εγκαταστάσεων του κτιρίου, οι μελλοντικές/περιοδικές εμπεριεχόμενες εκπομπές και οι τιμές των ανθρακούχων εκπομπών είναι υψηλότερες σε σχέση με την περίοδο υπολογισμού των 30 ετών. Η εφαρμογή της πλήρους θεώρησης κύκλου ζωής οδηγεί σε μία μείωση στην κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας που αντιστοιχεί στο βέλτιστο επίπεδο κόστους μεταξύ 1,99 kWh/m^{2}·ετησίως και 5,56 kWh/m^{2}·ετησίως καθώς και σε εναλλαγή της βέλτιστης οικονομικά λύσης, οδηγώντας σε παραλλαγές του κτιρίου αναφοράς οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλότερη πρωτογενή ενέργεια, χαμηλότερα επίπεδα θερμομόνωσης (μείωση πάχους θερμομόνωσης κατά 1 cm-2 cm), χαμηλότερο αριθμό υαλοπινάκων (μείωση από τριπλό σε διπλό) και κατ' επέκταση σε χαμηλότερα επίπεδα εμπεριεχόμενων περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Το εύρος ευαισθησίας της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας αυξάνεται με την διεύρυνση της περιόδου υπολογισμού, με τη μέγιστη αύξηση (21,01%) να εντοπίζεται μεταξύ των περιόδων υπολογισμού των 30 και των 60 ετών, και επιβεβαιώνει τη σημαντικότητά της ως παράμετρο η οποία οφείλει να λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση ευαισθησίας όπως αυτή ορίζεται από την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2010/31/ΕΕ, τον κατ' εξουσιοδότηση Κανονισμό 244/2012 και τις κατευθυντήριες γραμμές που τον συνοδεύουν. Τέλος, οι περιορισμοί, οι παραδοχές και τα αποτελέσματα της παρούσης υποδεικνύουν την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα χρηματοδοτείται από το ΙΚΥ, στα πλαίσια του προγράμματος «Αριστείας ΙΚΥ/SIEMENS». Η παρούσα έρευνα έχει δημοσιευθεί στο περιοδικό MDPI, Energies 2017, 10, 740.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] EC, 2010, "Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast)", Offi. J. of the Euro. Union, 53, pp.13-35.

[2] EC, 2012, "Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements", Offi. J. of the Euro. Union, 55, pp.1-28.

[3] EC, 2012, "Guidelines accompanying Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating cost-optimal levels of minimum energy performance requirements for buildings and building elements", Offi. J. of the Euro. Union, 55, pp.18-36.

[4] Karimpour, M., Belusko, M., Xing, K., Bruno, F., 2014, "Minimising the life cycle energy of buildings: Review and analysis", Building and Environment, 73, pp.106-114.

[5] Ramesh, T., Prakash, R., Shukla, K.K., 2010, "Life cycle energy analysis of buildings: An overview", Energy and Buildings, 42, pp. 1592-1600.

[6] Sartori, I., and Hestnes, AG., 2007, "Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article", Energy and Buildings, 39, pp. 249-257.

[7] Chastas, P., Theodosiou, T., Bikas, D., 2016, "Embodied energy in residential buildings-towards the nearly zero energy building: A literature review", Building and Environment,105,pp. 267-282.

[8] Thiel, C.L., Campion, N., Landis, A.E., Jones, A.K., Schaefer, L.A., Bilec, M.M., 2013, "A materials life cycle assessment of a net-zero energy building", Energies, 6, pp. 1125-1141.

[9] Cellura, M., Guarino, F., Longo, S., Mistretta, M., 2014, "Energy life-cycle approach in Net zero energy buildings balance: Operation and embodied energy of an Italian case study", Energy and Buildings, 72, pp. 371-381.

[10] Hernandez, P., and Kenny, P., 2011, "Development of a methodology for life cycle building energy ratings", Energy Policy, 39, pp. 3779-3788.

[11] Pombo, O., Allacker, K., Rivela, B., Neila, J., 2016, “Sustainability assessment of energy saving measures: A multi-criteria approach for residential buildings retrofitting-A case study of the Spanish housing stock”, Energy and Buildings, 116, pp. 384-394.

[12] Almeida, M., Mateus, R., Ferreira, M., Rodrigues, A., 2016, “Relevance of embodied energy on building retrofit assessment”, SBE16 Brazil & Portugal - Sustainable Urban Communities towards a Nearly Zero Impact Built Environment, Vitória, Brazil, pp. 1819-1828.

[13] Hall, M., Geissler, A., Burger, B., 2014, “Two years of experience with a net zero energy balance - Analysis of the Swiss MINERGIE-A standard”, Energy Procedia, 48, 1281-1291.

[14] Kristjansdottir, T.F., Fjeldheim, H., Selvig, E., Risholt, B., Time, B., Georges, L., et al., 2014, “A Norwegian ZEB-definition embodied emission”, SINTEF Academic Press and Norwegian University of Science and Technology.

[15] International Organization for Standardization, 2006, “ISO 14040: Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework”, Geneva, Switzerland.

[16] International Organization for Standardization, 2006, “ISO 14044: Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines”, Geneva, Switzerland.

[17] International Organization for Standardization, 2006, “ISO 14025: Environmental labels and declarations - Type III environmental declarations - Principles and procedures”, Geneva, Switzerland.

[18] Boermans, T., Grözinger, J., Ashok, J., Seehusen, J., Wehringer, F., Scherberich, M., 2014, “Overview of Member States information on NZEBs - Working version of the progress report - final report”, Ecofys, Cologne, Germany.

[19] EC, 2014, “EC COM 464 final: Report from the Comission to the European Parliament and the Council-Progress by Member States in reaching cost-optimal levels of minimum energy performance requirements”, Brussels, Belgium.

[20] Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ), 2011, “Απογραφή Κτιρίων”.

[21] ΥΠΕΚΑ, 2012, “Τεχνική Οδηγία 20701-3: Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών”, Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, 1413 (Β).

[22] ΥΠΕΚΑ, 2010, “Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (ΚΕΝΑΚ)”, Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, 430 (Β).

[23] NREL, 2017, “Energy Plus TM”, National Renewable Energy Laboratory, U.S.A..

[24] ΥΠΕΚΑ, 2012, “Τεχνική Οδηγία 20701-1: Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης”. Εφημερίς της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, 1413 (Β).

[25] European Committee for Standardization, 2007, “EN 15316: Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 3-2: Domestic hot water systems, distribution”, Brussels, Belgium.

[26] European Committee for Standardization, 2007, “EN 15316: Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 3-3: Domestic hot water systems, generation”, Brussels, Belgium.

[27] Chastas, P., Theodosiou, T., Kontoleon, J.K., Bikas, D., 2017, “The Effect of Embodied Impact on the Cost-Optimal Levels of Nearly Zero Energy Buildings: A Case Study of a Residential Building in Thessaloniki, Greece”, Energies, 10 (740).

[28] Eurostat, 2015, “Natural gas prices for household consumers”.

[29] Eurostat, 2015, “Electricity prices for household consumers”.

[30] ΠΟΠΕΚ, 2015, “Τιμές πετρελαίου θέρμανσης”.

[31] European Committee for Standardization, 2011, “EN 15978: Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method”, Brussels, Belgium.

[32] European Committee for Standardization, 2012, “EN 15804: Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products”, Brussels, Belgium.

[33] Centre for Environmental Studies, 2009, “CML-IA Database”, University of Leiden, Netherlands.

[34] SYNERGY, 2014, “Research and development of a system of high energy-efficient building elements, under integrated protection criteria and life-cycle design aspects, through the SYNERGASIA 2011”, LBCP, Aristotle University of Thessaloniki, Greece.

[35] Pre Consultants, 2012, “Sima Pro Software v.7.3.3”.

[36] Ecoinvent, 2010, “Ecoinvent Database v.2.2”.

[37] Andersen, S., Dinesen, J., Hjort Knudsen, H., Willendrup, A., 1993, “Livscyklus-baseret bygningsprojektering (Life-cycle-based building design, Energy and environment model, calculating tool and database)”, Danish Building Research Institute, Hørsholm, Denmark.

[38] Koubogiannis, D., Nouhou, C., 2016, “How much Energy is Embodied in your Central Heating Boiler?”, 20th Innovative Manufacturing Engineering and Energy Conference (IManEE 2016), Chalkidiki, Greece, Materials Science and Engineering.

[39] Piroozfar, P., Pomponi, F., Farr, E.R.P., 2016, “Life cycle assessment of domestic hot water systems: a comparative analysis”, International Journal of Construction Management,16, pp. 109-125.

[40] International EPD System, 1997, “Environmental Product Declaration”.

[41] Gmbh E., 2012, “EPD Flat glass, toughened safety glass and laminated safety glass”.

[42] Europe AG., 2015, “Iplus | Planibel low-e the range of AGC glasses with thermal insulation”.

[43] Polisan Boya San. ve Tic AŞ., 2015, “EPD Polisan Exelans Macro External Paint”.

[44] Polisan Boya San. ve Tic AŞ., 2015, “EPD Polisan Natura Ambians Internal Paint”.

[45] Ruukki Construction, 2014, “EPD-Hot-Dip Galvanized Products”.

[46] Adalberth, K., 1997, “Energy use during the Life cycle of Single Unit Dwellings: Examples”, Building and Environment, 32, pp. 321-329.

[47] Blengini G.A., 2009, “Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy”, Building and Environment, 44, pp. 319-330.

[48] Blengini, G.A., and Di Carlo, T., 2010, “The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings”, Energy and Buildings, 42, pp. 869-880.

[49] Chen, T.Y, Burnett, J., Chau, C.K., 2001, “Analysis of embodied energy use in the residential building of Hong Kong”, 26, pp. 323-340.

[50] BMUB, 2008, “Nutzungsdauern von Bauteilen, Datenbank Zwischenauswertung”, German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety, Berlin, Germany.

[51] International Organization for Standardization, 2008, “ISO 15686: Buildings and constructed assets -Service-life planning - Part 5: Life-cycle costing”, Geneva, Switzerland.

[52] Tyréns, A.B., 2014, “Product category rules according to ISO 14025:2006 Product group-2014:02”, Envirodec.

[53] BRE, 2014, “BREEAM, International New Construction Technical Manual. Building Research Establishment”.

[54] USGBC, 2015, “LEED v4 for Building Design and Construction”.

[55] ΕΔΤΔΕ, 2015, ΑΤΟΕ- Αναλυτικό Τιμολόγιο Οικοδομικών Έργων.

[56] European Committee for Standardization, 2007, “EN 15459: Energy Efficiency for Buildings - Standard economic evaluation procedure for energy systems in buildings”, Brussels, Belgium.

[57] Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ), 2015, “Δείκτης τιμών κατασκευής νέων κτιρίων”.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (ΑΚΖ) ΗΛΙΑΚΩΝ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΞΕΝΟΔΟΧΕΙΩΝ

Ευφροσύνη Γιαμά[1*], Έλλη Κυριάκη[1], Αγις. Μ. Παπαδόπουλος[1]
1* Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών, Θεσσαλονίκη, 54124, Ελλάδα
*E-mail: fgiama@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η περιβαλλοντική αξιολόγηση των θερμικών ηλιακών συστημάτων σε κτίρια ξενοδοχείων χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ). Στο πλαίσιο αυτό μελετήθηκε η ενεργειακή και περιβαλλοντική συμπεριφορά, μιας από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), των ηλιακών θερμικών συστημάτων συνδυασμένης λειτουργίας για την θέρμανση των χώρων και την παραγωγή Ζεστού Νερού Χρήσης (ΖΝΧ).

Η εφαρμογή της ΑΚΖ πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα της σειράς ISO 14040 και υποστηρίχθηκε από την χρήση του λογισμικού Gabi. Η ΑΚΖ είναι μια δημοφιλής, αλλά σαφώς και επιστημονικώς οριοθετημένη βάσει προτύπων, μεθοδολογία η οποία στοχεύει στην ποσοτικοποίηση των ροών ενέργειας και υλικών στο υπό μελέτη σύστημα. Η περιβαλλοντική αξιολόγηση αφορά στον κύκλο ζωής του προϊόντος ή του συστήματος που εξετάζεται και ποσοτικοποιεί περιβαλλοντικές επιπτώσεις όπως: το φαινόμενο του θερμοκηπίου, την οξείνιση, τον ευτροφισμό, την δημιουργία φωτοχημικού όζοντος, το νέφος, κα. Ο στόχος είναι να αξιολογηθούν και να ποσοτικοποιηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του υπό μελέτη ενεργειακού συστήματος σε σχέση με τον χρόνο ζωής του. Στο υπό μελέτη σύστημα αξιολογήθηκαν οι ακόλουθες φάσεις: παραγωγή και μεταφορά ενέργειας και υλικών, παραγωγική διαδικασία, εγκατάσταση, συντήρηση, καθώς και μεταφορές που πραγματοποιούνται σε κάθε βήμα.

Η προσέγγιση της ΑΚΖ στην παρούσα εργασία, είναι πιο σωστό να αναφέρεται ως «οροθετημένη (streamlined)» καθώς δεν λαμβάνει υπόψη την ανακύκλωση των δομικών υλικών ή την διάθεση τους σε χώρους υγειονομικής ταφής.

Στη συγκεκριμένη εργασία τα αποτελέσματα που θα αξιολογηθούν και θα παρουσιασθούν περιλαμβάνουν την ανάλυση της παραγωγικής διαδικασίας, τη διάθεση και μεταφορά των υλικών και της ενέργειας που χρησιμοποιούνται στην φάση της κατασκευής των ενεργειακών συστημάτων. Το σύστημα που θα μελετηθεί περιλαμβάνει το ηλιακό θερμικό σύστημα συνδυασμένης λειτουργίας (ηλιακός συλλέκτης και όλα τα επιμέρους στοιχεία του) καθώς και τον λέβητα φυσικού αερίου που χρησιμοποιείται ως βοηθητική πηγή ενέργειας. Τέλος, η περιβαλλοντική αξιολόγηση θα γίνει για δύο διαφορετικά είδη ηλιακών συλλεκτών (επίπεδο συλλέκτη και συλλέκτη κενού).

Ο βασικός στόχος είναι η ολοκληρωμένη περιβαλλοντική αξιολόγηση των θερμικών ηλιακών συστημάτων συνδυασμένης λειτουργίας καθώς και η σύγκριση διαφορετικών ειδών ηλιακού συλλέκτη, έτσι ώστε τελικά να συνυπολογισθεί το περιβαλλοντικό κριτήριο στην διαδικασία λήψης αποφάσεων ενεργειακών συστημάτων με εφαρμογές στα κτίρια ξενοδοχείων.

Λέξεις Κλειδιά: Ανάλυση Κύκλου Ζωής, ηλιακά θερμικά συστήματα, ξενοδοχειακός τομέας

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια η Ευρώπη, στο γενικότερο παγκόσμιο πλαίσιο, αντιμετωπίζει προκλήσεις στον ενεργειακό και οικονομικό τομέα. Το ευμετάβλητο οικονομικό κλίμα αποτελεί έντονη πηγή διαταραχών και τροχοπέδη στην βιώσιμη ανάπτυξη αρκετών Ευρωπαϊκών χωρών, ειδικά νοτίων. Παράλληλα με την συνεχόμενη αύξηση της κατανάλωσης, καταγράφεται και σημαντική αύξηση των αέριων ρύπων (CO_2, SO_2 και NO_x) με σημαντικές επιπτώσεις στο κλίμα και στην ποιότητα του αερίου περιβάλλοντος (π.χ φαινόμενο του θερμοκηπίου). Η ανάγκη για χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συνδυασμό με την απαίτηση για υψηλότερη ποιότητα διαβίωσης και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αναδεικνύουν σε μείζονα σκοπό την ανάπτυξη και ενσωμάτωση τεχνολογιών που προωθούν την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και υιοθετούν βέλτιστες πρακτικές ορθολογικής χρήσης ενέργειας [1]. Στην προσπάθεια αυτή, η Ευρωπαϊκή ένωση παίζει κυρίαρχο ρόλο μέσα από μία σειρά δράσεων και πρωτοβουλιών (Target 20-20-20) προκειμένου να βασιστεί αλλά και να διασφαλιστεί η ανάπτυξη σε γερές οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές βάσεις. Πιο συγκεκριμένα, η Ευρώπη έχει θέσει ως στόχο, το 20% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης να προέρχεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ως το 2020, με ακόμη πιο φιλόδοξους στόχους ως το 2030 [2].

Στην κατεύθυνση λοιπόν της προώθησης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν αναπτυχθεί ποικίλα συστήματα θερμικής εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας κυρίως για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης στα κτίρια καθώς και την θέρμανση των αντίστοιχων χώρων. Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί αντίστοιχα συστήματα για την κάλυψη των ψυκτικών φορτίων, τα οποία παρ' όλ' αυτά δεν είναι ακόμη τόσο διαδεδομένα στην Ευρώπη.

Επιπρόσθετα, η εξέλιξη της ιδέας της βιωσιμότητας στον κτιριακό τομέα πέρασε διάφορα στάδια ξεκινώντας από το μοντέλο της παραδοσιακής κατασκευής με βασικά κριτήρια το κόστος, την ποιότητα και το χρόνο ολοκλήρωσης των κατασκευών, στη συνέχεια αναπτύχθηκε η ιδέα της βιωσιμότητας αρχικά σε τοπική κλίμακα, εισάγοντας κριτήρια στο σχεδιασμό και στην κατασκευή που αφορούσαν στο χρήση πόρων, στις εκλυόμενες εκπομπές και στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο φυσικό οικοσύστημα. Τα κριτήρια αυτά ήρθαν να προστεθούν στα κριτήρια των παραδοσιακών κατασκευών και να εισαγάγουν την έννοια της περιβαλλοντικής διάστασης στον τομέα των κατασκευών. Στις μέρες μας, η ιδέα της βιωσιμότητας λαμβάνει πλέον παγκόσμια διάσταση στον τομέα των κατασκευών, όπου διερευνώνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε παγκόσμια κλίμακα, όπως για παράδειγμα η στην αλλαγή κλίματος, στη βιοποικιλότητα.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ενεργειακή διαχείριση, που αποτελεί ένα εξαιρετικά περίπλοκο ζήτημα ιδιαίτερα στα εμπορικά κτίρια, στην κατηγορία των οποίων συγκαταλέγονται και οι μεγάλες ξενοδοχειακές μονάδες. Η διαχείριση θα πρέπει να είναι ολοκληρωμένη και να περιλαμβάνει μέτρα και προτάσεις που στοχεύουν στην εξοικονόμηση ενέργειας, στην ορθολογική χρήση των υδάτινων πόρων, στην ποιότητα αέρα στο εσωτερικό των χώρων αλλά και στον προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τον κύκλο ζωής των δομικών υλικών.

Είναι διαθέσιμα αρκετά περιβαλλοντικά εργαλεία, πρότυπα πιστοποίησης αλλά και η σχετική ευρωπαϊκή ή και εθνική νομοθεσία, με κοινό στόχο την αξιολόγηση και βελτίωση της περιβαλλοντικής επίδοσης των κτιρίων. Ζητούμενο είναι οι συνέργειες αυτών των εργαλείων με κριτήρια όπως η ποιότητα ζωής των χρηστών καθώς και οι κοινωνικό-οικονομικές διαστάσεις της μη πρόσβασης σε ενέργεια, που οδηγούν στην ενεργειακή φτώχεια. Η βιωσιμότητα λοιπόν είναι ένα περίπλοκο ζήτημα, το οποίο αναμφισβήτητα επηρεάζει με τον ένα ή τον άλλο τρόπο μεγάλο μέρος του κοινωνικού συνόλου.

Στη λογική αυτή εστιάζεται και η συγκεκριμένη εργασία, της οποίας κύριος σκοπός είναι η περιβαλλοντική αξιολόγηση των θερμικών ηλιακών συστημάτων σε κτίρια ξενοδοχείων χρησιμοποιώντας την μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ). Στο πλαίσιο αυτό μελετήθηκε η ενεργειακή και περιβαλλοντική συμπεριφορά, μιας από τις πιο διαδεδομένες τεχνολογίες ΑΠΕ, των ηλιακών θερμικών συστημάτων συνδυασμένης λειτουργίας για την θέρμανση των χώρων και την παραγωγή Ζεστού Νερού Χρήσης (ΖΝΧ). Τα αποτελέσματα που θα αξιολογηθούν και θα παρουσιασθούν περιλαμβάνουν την ανάλυση της παραγωγικής διαδικασίας, την διάθεση και μεταφορά των υλικών και της ενέργειας που χρησιμοποιούνται στην φάση της κατασκευής των ενεργειακών συστημάτων. Το σύστημα που θα μελετηθεί περιλαμβάνει το ηλιακό θερμικό σύστημα συνδυασμένης λειτουργίας (ηλιακός συλλέκτης και όλα τα επιμέρους στοιχεία του) καθώς και τον λέβητα φυσικού αερίου που χρησιμοποιείται ως βοηθητική πηγή ενέργειας. Τέλος, η περιβαλλοντική

αξιολόγηση θα γίνει για δύο διαφορετικά είδη ηλιακών συλλεκτών (επίπεδο συλλέκτη και συλλέκτη κενού).

2. Η ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

Ο σχεδιασμός και η διαδικασία λήψης αποφάσεων είναι αλληλένδετες διεργασίες, κατά τις οποίες τα αποτελέσματα της μιας ανάλυσης τροφοδοτούν με δεδομένα μία άλλη. Αυτή η διαδικασία πολλές φορές οδηγεί στην απαίτηση περισσότερων πληροφοριών και τη συνεργασία περισσότερων από ένα εργαλείων. Τα περιβαλλοντικά εργαλεία στηρίζονται στις θεωρίες. Τα εργαλεία διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες στα «αναλυτικά εργαλεία» και στα «εργαλεία διεργασιών». Με τα αναλυτικά εργαλεία υπολογίζουμε τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις συγκεκριμένων προϊόντων, διεργασιών, ενώ τα εργαλεία διεργασιών εφαρμόζουν συγκεκριμένα βήματα και οδηγίες και βοηθούν τους οργανισμούς στη λήψη αποφάσεων με στόχο τη διαρκή βελτίωση της περιβαλλοντικής επίδοσης. Όλα τα εργαλεία υποστηρίζονται από τεχνικά στοιχεία π.χ. λογισμικά, μοντέλα, βάσεις δεδομένων κλπ., των οποίων η εφαρμογή και αξιοπιστία εξαρτάται από την εισαγωγή των αρχικών δεδομένων [3].

Οι σημαντικότερες και περισσότερο διαδεδομένες από πλευράς εφαρμογών μεθοδολογίες, στη δομή των οποίων στηρίζονται τα «αναλυτικά εργαλεία», είναι: η Ανάλυση Κύκλου Ζωής, ο Υπολογισμός Ροής Υλικών, η Εισροή Υλικών ανά Μονάδα Υπηρεσίας, η Αθροιστική Ανάλυση Ενεργειακών Αναγκών, η Ανάλυση Περιβαλλοντικών Εισροών/Εκροών, η Εκτίμηση Περιβαλλοντικού Κινδύνου, τα Εργαλεία για Οικολογικό Σχεδιασμό, η Εκτίμηση Κόστους Κύκλου Ζωής, ο Υπολογισμός Ολικού Κόστους και η Ανάλυση Κέρδους Κόστους.

Αντιστοίχως, οι πιο γνωστές μεθοδολογίες διεργασιών είναι: τα Συστήματα Περιβαλλοντικής Διαχείρισης, οι Περιβαλλοντικές Επιθεωρήσεις, η Αξιολόγηση Περιβαλλοντικής Επίδοσης, η Περιβαλλοντική Σήμανση, ο Οικολογικός Σχεδιασμός, η Πράσινη Προμήθεια, το Σύστημα Ολικής Ποιότητας και Περιβαλλοντικής Διαχείρισης, τα Συστήματα Αξιολόγησης [4].

Η μεθοδολογία που ορίζει το πλαίσιο εφαρμογής του περιβαλλοντικού αυτού εργαλείου έχει οριοθετηθεί από τον Οργανισμό Περιβαλλοντικής Τοξικολογίας και Χημείας. Ο οργανισμός αυτός ορίζει την ΑΚΖ ως «μια τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που συνδέονται με κάποιο προϊόν, διεργασία ή δραστηριότητα προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον, εκτιμώντας τις επιπτώσεις από τη χρήση ενέργειας και υλικών καθώς και από τη χρήση των αποβλήτων, αναγνωρίζοντας και εκτιμώντας τις δυνατότητες περιβαλλοντικών βελτιώσεων». Η ανάλυση περιλαμβάνει ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος, της διεργασίας ή της δραστηριότητας: εξαγωγή και επεξεργασία των πρώτων υλών, κατασκευή, συσκευασία, μεταφορά και διανομή, χρήση, επαναχρησιμοποίηση, συντήρηση, ανακύκλωση και τελική απόρριψη [5,6]. Τα πρότυπα ISO 14040-43 αναφέρονται στην ΑΚΖ ως εργαλείο περιβαλλοντικής διαχείρισης και περιγράφουν τα στάδια που εφαρμόζονται για την πλήρη διεξαγωγή μιας ΑΚΖ. Πιο συγκεκριμένα:

- ISO 14040: Αρχές και οριοθέτηση συστήματος [7]
- ISO 14041: Προσδιορισμός σκοπού και στόχου και απογραφή δεδομένων, [8]
- ISO 14042: Αποτίμηση των επιπτώσεων κύκλου ζωής [9]
- ISO 14043: Ερμηνεία αποτελεσμάτων [10]

Επιπλέον, η ΑΚΖ όπως και όλα τα εργαλεία περιβαλλοντικής αξιολόγησης βοηθούν στη δημιουργία δεικτών. Ο κύριος στόχος των δεικτών είναι να ποσοτικοποιήσουν, και επομένως να αξιοποιήσουν έννοιες, όπως οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που είναι δυσνόητες μεν, απαραίτητες δε στη λήψη αποφάσεων και στην επικοινωνία των αποτελεσμάτων προς τρίτους.

Η εφαρμογή της ΑΚΖ πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα της σειράς ISO 14040 και υποστηρίχθηκε από την χρήση του λογισμικού Gabi. Η ΑΚΖ είναι μια δημοφιλής, αλλά σαφώς και επιστημονικώς οριοθετημένη βάσει προτύπων, μεθοδολογία η οποία στοχεύει στην ποσοτικοποίηση των ροών ενέργειας και υλικών στο υπό μελέτη σύστημα. Η εκτίμηση επιπτώσεων είναι μια ποσοτική ή/και ποιοτική διαδικασία που χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει και να ερμηνεύσει τις αρνητικές συνέπειες των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προσδιορίστηκαν κατά το στάδιο της απογραφής. Γενικά, υλοποιείται μέσα από την εφαρμογή των ακόλουθων φάσεων:

1. Κατηγοριοποίηση

2. Χαρακτηρισμός

3. Κανονικοποίηση

4. Ομαδοποίηση

5. Στάθμιση

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι να αξιολογηθούν και να ποσοτικοποιηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του υπό μελέτη ενεργειακού συστήματος σε σχέση με τον χρόνο ζωής του. Στο υπό μελέτη σύστημα αξιολογήθηκαν οι ακόλουθες φάσεις: παραγωγή και μεταφορά ενέργειας και υλικών, παραγωγική διαδικασία, εγκατάσταση, συντήρηση, καθώς και μεταφορές που πραγματοποιούνται σε κάθε βήμα. Η προσέγγιση της ΑΚΖ στην παρούσα εργασία είναι πιο σωστό να αναφέρεται ως «οροθετημένη (streamlined)» καθώς δεν λαμβάνει υπόψη την ανακύκλωση των δομικών υλικών ή την διάθεση τους σε χώρους υγειονομικής ταφής.

3. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΗΛΙΟΘΕΡΜΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η ανάλυση και περιγραφή των συστημάτων αυτών θα γίνει με βάση το πεδίο εφαρμογής τους. Αρχικά, θα παρουσιαστούν τα ηλιοθερμικά συστήματα συνδυασμένης λειτουργίας που χρησιμοποιούνται για την θέρμανση των χώρων και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (Solar Combi Systems). Στα συστήματα αυτά η απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας γίνεται μέσω ηλιακών συλλεκτών που τοποθετούνται στην οροφή ή το δώμα του κτιρίου. Η ηλιακή ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα η οποία μεταφέρεται στο ρευστό που ρέει στους σωλήνες (συνήθως νερό), ενώ ένα ποσό χάνεται στο περιβάλλον. Μέσω ενός συστήματος σωληνώσεων, μια ποσότητα του ρευστού μεταφέρεται απευθείας στο σύστημα θέρμανσης ή ψύξης ενώ το υπόλοιπο διοχετεύεται στο δοχείο αποθήκευσης για μελλοντική χρήση [11].

Solar combi

Σε αυτά τα συστήματα, η επιφάνεια των ηλιακών συλλεκτών που εγκαθίστανται είναι μεγαλύτερη από αυτήν που υπάρχει όταν οι ηλιακοί συλλέκτες χρησιμοποιούνται μόνο για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης, καθώς πρέπει να καλυφθεί ένα μέρος των απαιτήσεων θέρμανσης. Συνήθως υπάρχει εκτός του ηλιακού συστήματος και μια βοηθητική πηγή θερμότητας (συνήθως πετρέλαιο, φυσικό αέριο ή ηλεκτρική ενέργεια) που χρησιμοποιείται είτε σε περίπτωση που δεν επαρκεί ο ήλιος, είτε επειδή δεν είναι οικονομοτεχνικά σκόπιμο να καλυφθεί το 100% του φορτίου ηλιακά. Λόγω των διαφορετικών θερμοκρασιών που απαιτούνται για το ζεστό νερό χρήσης και το νερό που τροφοδοτεί το σύστημα θέρμανσης, υπάρχουν δύο διαφορετικών θερμοκρασιών δοχεία αποθήκευσης τα οποία τροφοδοτούν το αντίστοιχο σύστημα, μέσω συστήματος ελέγχου. Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα να τοποθετηθεί ένα δοχείο και για τις δύο λειτουργίες όπου όμως απαιτείται προσεκτικός σχεδιασμός ώστε να μην αναπτυχθούν φαινόμενα μίξης. Στην συνέχεια θα περιγραφούν συνοπτικά τα υποσυστήματα [12].

Όπως αναφέρθηκε σε πρότερο σημείο της ανάλυσης αυτής, η τεχνολογία Solar Combi έχει την δυνατότητα κάλυψης των θερμικών αναγκών αλλά και της παροχής ζεστού νερού χρήσης. Τα απαραίτητα υποσυστήματα για τις λειτουργίες αυτές είναι το σύστημα απορρόφησης και αποθήκευσης θερμότητας και το σύστημα διανομής της. Πιο αναλυτικά το σύστημα απορρόφησης και αποθήκευσης θερμότητας αποτελείται από:

- Ηλιακός Συλλέκτης: Στο στοιχείο αυτό γίνεται η εκμετάλλευση της ενέργειας προερχόμενης από τον ήλιο μέσω ειδικά σχεδιασμένων διατάξεων. Η ενέργεια συλλέγεται μέσω του απορροφητή ενώ η βασική αρχή λειτουργίας του είναι η μετάδοση της ενέργειας αυτής σε ρευστό μέσο (νερό ή μίγμα νερού-γλυκερίνης) μέσω δικτύου σωληνώσεων. Η γεωμετρία των συλλεκτών ποικίλει λαμβάνοντας πάντα υπόψη την αποδοτικότητα, το διαθέσιμο χώρο αλλά και τους σκοπούς της εκάστοτε εφαρμογής (π.χ επίπεδοι ή παραβολικοί συλλέκτες). Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ η διαστασιολόγηση του συλλέκτη γίνεται πάντα με βάση τις ανάγκες για θέρμανση και παροχής ζεστού νερού χρήσης.

- Δοχείο αποθήκευσης θερμότητας: Το χαρακτηριστικό αυτό επεκτείνει τις δυνατότητες μίας διάταξης Solar Combi για την συνεχόμενη αποδοτική της λειτουργίας σε περιόδους έλλειψης της πηγής ενέργειας (ηλιακή ακτινοβολία). Επιπροσθέτως, διασφαλίζει την βέλτιστη αποδοτική λειτουργία των βοηθητικών συστημάτων κατά την διάρκεια λειτουργίας με μεσαία φορτία, εξασφαλίζοντας την συνολική απρόσκοπτη αλλά και αποδοτική της διάταξης. Τέλος αποτελεί σημαντικό πεδίο έρευνα και εξέλιξης για την επίτευξη συνεχούς ενεργειακής αυτονομίας (High Combi Systems).

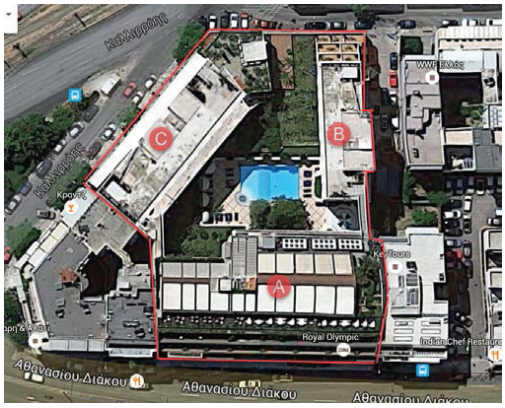
Από την φάση του σχεδιασμού και κατασκευής του συστήματος συλλογής και αποθήκευσης θερμότητας έπεται η διανομή αυτής για την κατάλληλη αξιοποίηση της. Αυτό επιτυγχάνεται από το σύστημα διανομής θερμότητας το οποίο και περιγράφεται σύμφωνα με το χρησιμοποιούμενο μέσο.

Στην παρούσα εφαρμογή, το εργαζόμενο μέσο είναι νερό, το οποίο μεταφέρει την παραγόμενη θερμότητα μέσω ενός κλειστού-κυκλώματος σωληνώσεων. Χρησιμοποιείται για σκοπούς θέρμανσης αλλά δεν μπορεί να καλύψει ανάγκες εξαερισμού ή αφύγρανσης χωρίς την προσθήκη κατάλληλου μηχανικού συστήματος.

4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Σαν κτίριο εφαρμογής της σχετικής μελέτης επιλέχθηκε το ξενοδοχείο «Royal Olympic Hotel Athens». Το εν λόγω ξενοδοχείο βρίσκεται στο κέντρο της πόλης των Αθηνών, τοποθεσία που ενδείκνυται για τη χρήση ηλιακών συστημάτων.

Το ξενοδοχείο αποτελείται από τρία κτίρια, τα οποία για τις ανάγκες των υπολογισμών διακρίθηκαν σε Α,Β και Γ, συνολικής δομικής επιφάνειας 12.058τ.μ. [m^2].



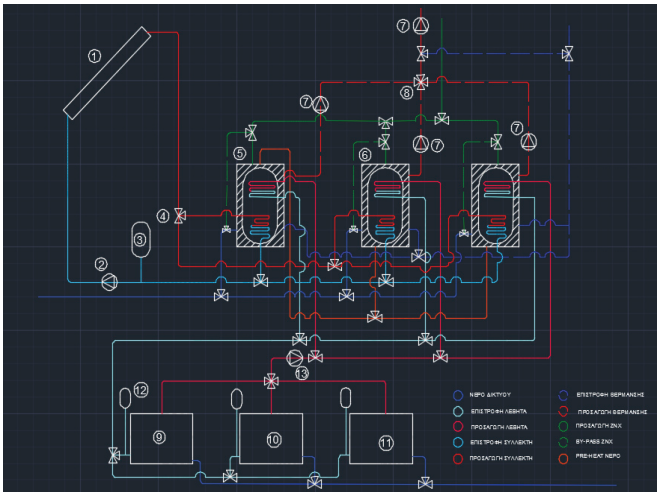
Εικόνα 1: Ξενοδοχείο Royal Olympic Athens

Τα κτίρια Α και Β εκτείνονται σε 6 ορόφους και το κτίριο Γ σε 5 ορόφους, ενώ όλα διαθέτουν ισόγειο. Συνολικά το ξενοδοχείο διαθέτει 311 δωμάτια και πολλές αίθουσες εκδηλώσεων και γραφείων. Το υπόγειο του κτιρίου λειτουργεί ως παρκινγκ και θεωρήθηκε γειτονικός μη θερμαινόμενος χώρος.

Πίνακας 1: Κατανομή ορόφων και δωματίων

Ονομασία κτιρίου	Πλήθος Ορόφων	Πλήθος Δωματίων
ΚΤΙΡΙΟ Α	6	186
ΚΤΙΡΙΟ Β	6	60
ΚΤΙΡΙΟ Γ	5	65
ΣΥΝΟΛΟ		311

Σύμφωνα με τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν, σχεδιάστηκε ένα πρότυπο ηλιοθερμικό σύστημα, υποβοηθούμενο από τρεις μεγάλους λέβητες φυσικού αερίου. Το σύστημα είναι ικανό να καλύψει τις απαιτήσεις του ξενοδοχείου σε θέρμανση και ΖΝΧ, ενώ οι λέβητες είναι διαστασιολογημένοι για τα φορτία σχεδιασμού, πράγμα που σημαίνει ότι μπορούν να καλύψουν τις μέγιστες συνολικές απαιτήσεις, σε περίπτωση που το ηλιακό σύστημα τεθεί για κάποιο λόγο εκτός λειτουργίας. Στα πλαίσια της εργασίας, μελετήθηκαν δύο διαφορετικά σενάρια. Στο ένα σενάριο μελετήθηκε η τοποθέτηση επίπεδων συλλεκτών ενώ στο δεύτερο η τοποθέτηση συλλεκτών κενού.
Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του ηλιοθερμικού συστήματος combi, σχεδιασμένο σε CAD καθώς και το υπόμνημα των εξαρτημάτων.



Εικόνα 2: Διάγραμμα Ροής Ηλιοθερμικού Συστήματος Combi.

Πίνακας 2: Υπόμνημα εξαρτημάτων ηλιακού συστήματος

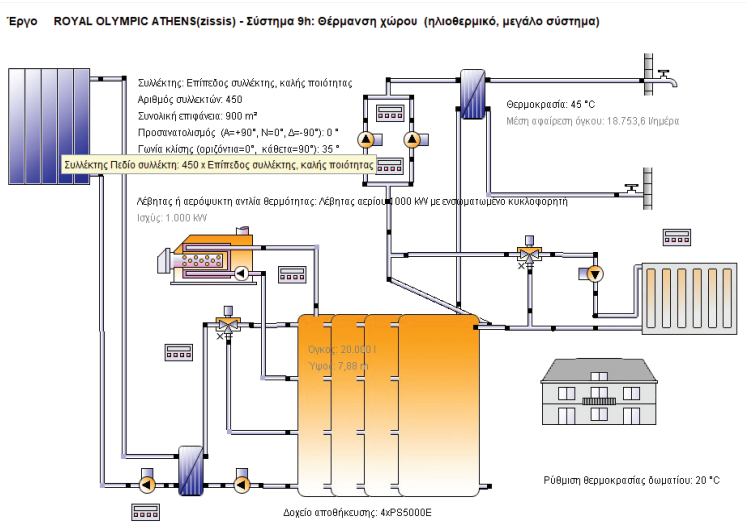
Α/Α	Ονομασία
1	Σύστημα Ηλιακών Συλλεκτών
2	Κυκλοφορητής Ηλιακού Κυκλώματος
3	Δοχείο Διαστολής Ηλιακού Κυκλώματος
4	Τρίοδη Βάνα
5	Θερμαντικό Δοχείο
6	Θερμαντικό Δοχείο
7	Κυκλοφορητής Θέρμανσης
8	Τετράοδη Βάνα
9	Λέβητας 1
10	Λέβητας 2
11	Λέβητας 3
12	Δοχείο Διαστολή Λέβητα
13	Κυκλοφορητής Κυκλώματος Λέβητα

5. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η ενεργειακή ανάλυση του συστήματος πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Polysun. Οι λέβητες που χρησιμοποιούνται ως βοηθητική πηγή σε περίπτωση ανεπάρκειας του ηλιακού συστήματος έχουν συνολική ισχύ 1000kW.

5.1. Σύστημα με Απλούς Επιλεκτικούς Επίπεδους Συλλέκτες

Το σύστημα που μελετήθηκε φαίνεται στην Εικόνα 3, όπως προκύπτει από το περιβάλλον του λογισμικού Polysun.



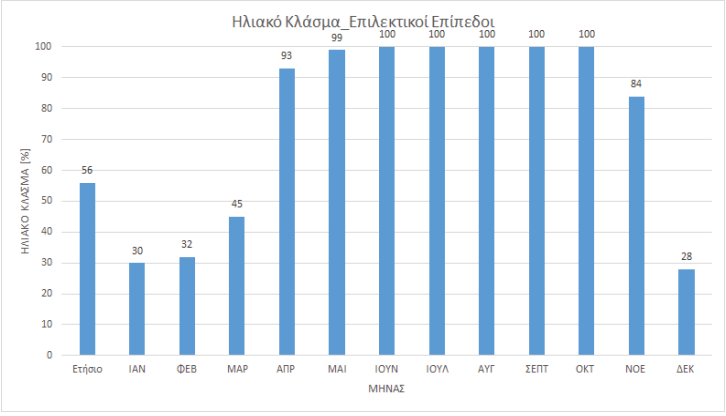
Εικόνα 3: Διάγραμμα Ροής Ηλιοθερμικού Συστήματος Combi.

Στον Πίνακα 3, αποτυπώνονται τα αποτελέσματα της ενεργειακής προσομοίωσης με δεδομένη συνολική εγκατεστημένη επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών 900m^2.

Πίνακας 3: Ηλιακό Κλάσμα_Επιλεκτικοί Επίπεδοι Συλλέκτες

Ολικό Ηλιακό Κλάσμα	56%
Ηλιακό Κλάσμα_Ζεστό Νερό Χρήσης	77,7%
Ηλιακό Κλάσμα_Θέρμανση	37,5%

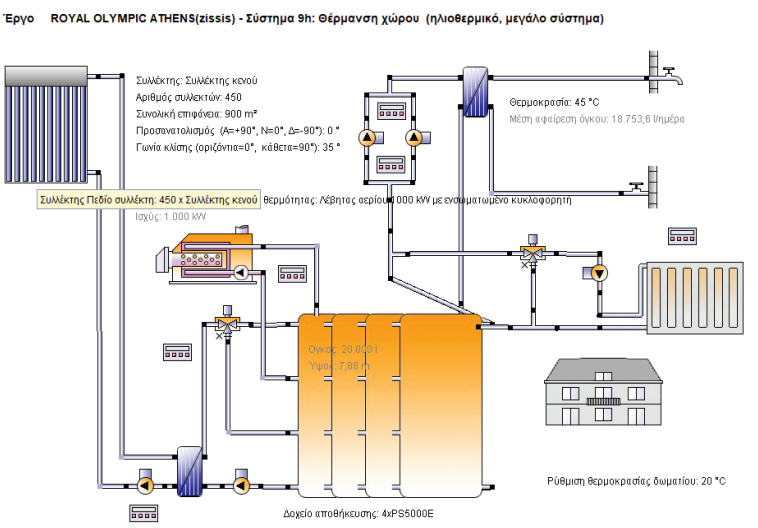
Στην συνέχεια, στην Εικόνα 4, παρουσιάζεται αναλυτικά ανά μήνα το ολικό ηλιακό κλάσμα.



Εικόνα 4: Κατανομή ολικού ηλιακού κλάσματος_Επιλεκτικοί Επίπεδοι Συλλέκτες

5.2. Σύστημα με Συλλέκτες Κενού

Στην Εικόνα 5, απεικονίζεται το σύστημα με τους συλλέκτες κενού όπως μελετήθηκε στο λογισμικό Polysun.



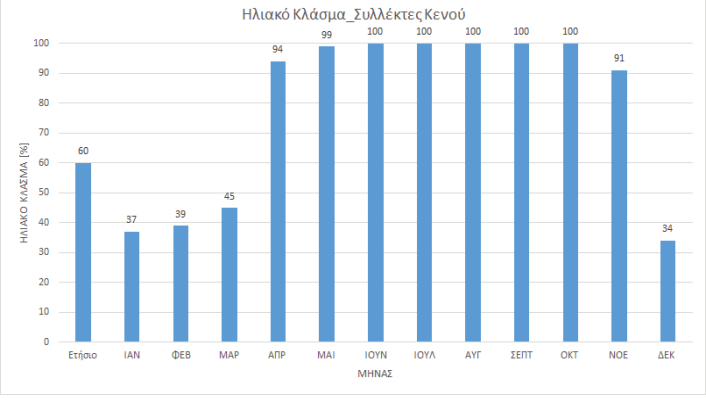
Εικόνα 5: Υπό μελέτη σύστημα με επιλεκτικούς επίπεδους συλλέκτες

Τα αποτελέσματα της ενεργειακής προσομοίωσης, με δεδομένη συνολική εγκατεστημένη επιφάνεια ηλιακών συλλεκτών 900m^2, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4 .

Πίνακας 4: Ηλιακό Κλάσμα_ Συλλέκτες Κενού

Ολικό Ηλιακό Κλάσμα	60%
Ηλιακό Κλάσμα_Ζεστό Νερό Χρήσης	80,3%
Ηλιακό Κλάσμα_Θέρμανση	43,3%

Ακολουθεί, στην Εικόνα 6, η ανά μήνα κατανομή του ολικού ηλιακού κλάσματος.



Εικόνα 6: Κατανομή ολικού ηλιακού κλάσματος_ Συλλέκτες Κενού

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

Η εφαρμογή της AKZ, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα της σειράς ISO 14040 και υποστηρίχθηκε από την χρήση του λογισμικού Gabi.

Το υπό μελέτη σύστημα περιλαμβάνει την ανάλυση της παραγωγικής διαδικασίας, τη διάθεση και μεταφορά των υλικών καθώς και την ενέργεια που χρησιμοποιείται στην φάση της κατασκευής των ενεργειακών συστημάτων. Το υπό μελέτη σύστημα περιλαμβάνει το ηλιακό θερμικό σύστημα συνδυασμένης λειτουργίας (ηλιακός συλλέκτης και όλα τα επιμέρους στοιχεία του) καθώς και τον λέβητα φυσικού αερίου που χρησιμοποιείται ως βοηθητική πηγή ενέργειας. Τέλος, η περιβαλλοντική αξιολόγηση θα γίνει για δύο διαφορετικά είδη ηλιακών συλλεκτών (επίπεδο συλλέκτη και συλλέκτη κενού). Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που θα μελετηθούν και θα ποσοτικοποιηθούν με κατάλληλους δείκτες είναι: το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η οξείνιση, ο ευτροφισμός, η δημιουργία φωτοχημικού όζοντος, το νέφος, το δυναμικό εξάντλησης αβιοτικών πόρων, η οικοτοξικότητα στο νερό και η ανθρώπινη τοξικότητα. Ο στόχος είναι να αξιολογηθούν και να ποσοτικοποιηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις του υπό μελέτη ενεργειακού συστήματος σε σχέση με τον χρόνο ζωής του [13,14].

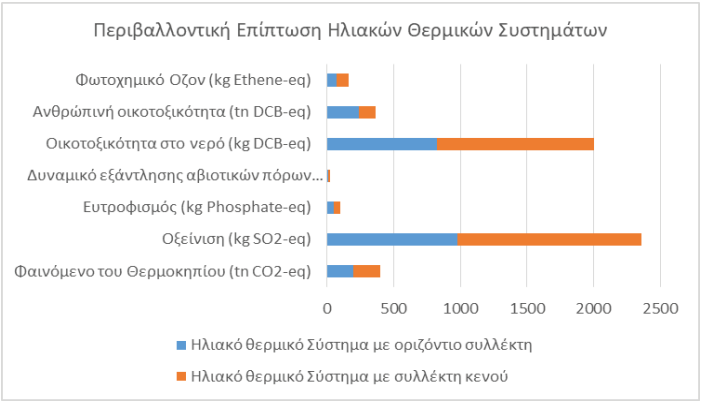
Ο βασικός στόχος είναι η ολοκληρωμένη περιβαλλοντική αξιολόγηση των θερμικών ηλιακών συστημάτων συνδυασμένης λειτουργίας καθώς και η σύγκριση διαφορετικών ειδών ηλιακού συλλέκτη, έτσι ώστε τελικά να συνυπολογισθεί το περιβαλλοντικό κριτήριο στην διαδικασία λήψης αποφάσεων ενεργειακών συστημάτων με εφαρμογές στα κτίρια ξενοδοχείων. Η βάση δεδομένων που χρησιμοποιηθηκε κατά την υλοποίησης της μεθοδολογιας της AKZ είναι η CML 2001. Το 2001 μία ομάδα επιστημόνων με την καθοδήγηση του Center of Environmental Science of Leiden University (CML) πρότεινε μία σειρά από κατηγορίες επιπτώσεων για το στάδιο της αξιολόγησης επιπτώσεων (Product Ecology Consultants (PRé Consultants), 2010c). Η βάση δεδομένων της CML περιλαμβάνει δείκτες κανονικοποιήσης ανάλογα με την χώρα αλλά και τα ιδιαίτερα δεδομένα κάθε χώρας σε ότι αφορά για παράδειγμα στο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής [14,15].

Όπως είναι φανερό από τον Πίνακα 5 και την εικόνα 7, οι σημαντικότερες επιπτώσεις από τον κύκλο ζωής των ηλιακών θερμικών συστημάτων τόσο με επίπεδο συλλέκτη όσο και με συλλέκτη κενού είναι το φαινομένου του θερμοκηπίου και το δυναμικό εξάντλησης των αβιοτικών πόρων στα ορυκτά καύσιμα. Σημαντική είναι και η επίπτωση της οξείνισης.

Επιπλέον, αυτό που παρατηρείται είναι πως παρόλο που οι διαφορές δεν είναι ιδιαιτέρως σημαντικές το ηλιακό θερμικό σύστημα με συλλέκτη κενού παρουσιάζει σημαντικότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Πίνακας 5: Περιβαλλοντική απόδοση ανά περιβαλλοντική πτυχή για ηλιακό σύστημα με επίπεδο συλλέκτη και με συλλέκτη κενού

Περιβαλλοντική επίπτωση (CML 2001)	Ηλιακό σύστημα με επίπεδο συλλέκτη	Ηλιακό σύστημα με συλλέκτη κενού
Φαινόμενο του Θερμοκηπίου (kg CO_2-eq)	197.000	204.000
Οξείνιση (kg SO_2-eq)	978	1380
Ευτροφισμός (kg Phosphate-eq)	46,9	54,3
Δυναμικό εξάντλησης αβιοτικών πόρων (kg Sb-eq)	6,95	17,3
Δυναμικό εξάντλησης αβιοτικών πόρων στα ορυκτά καύσιμα (MJ)	2.370.000	2.440.000
Οικοτοξικότητα στο νερό (kg DCB-eq)	822	1180
Ανθρώπινή οικοτοξικότητα (kg DCB-eq)	238.000	126.000
Φωτοχημικό Οζον (kg Ethene-eq)	72,3	89,6



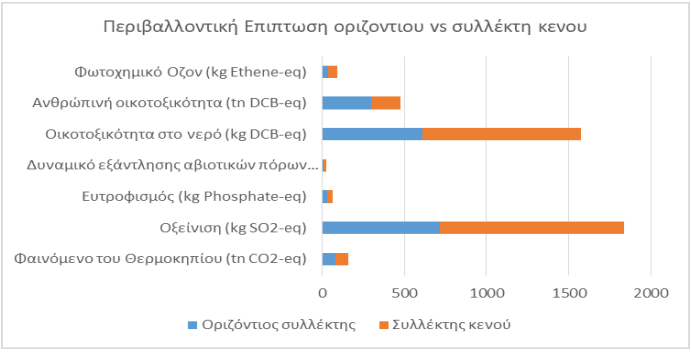
Εικόνα 7: Περιβαλλοντική απόδοση ανά περιβαλλοντική πτυχή για ηλιακό σύστημα με επίπεδο συλλέκτη και με συλλέκτη κενού.

Οι συλλέκτες κενού αποτελούν πιο πολύπλοκες κατασκευές και γι' αυτό το λόγο το ηλιακό θερμικό σύστημα με συλλέκτη κενού εμφανίζει σημαντικότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Στον πίνακα 6 και στην εικόνα 8, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της περιβαλλοντικής αξιολόγησης των δύο διαφορετικών τύπων συλλεκτών, του επίπεδου συλλέκτη και του συλλέκτη κενού.

Πίνακας 6: Περιβαλλοντική απόδοση ανά περιβαλλοντική πτυχή τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη και τον συλλέκτη κενού.

Περιβαλλοντική επίπτωση (CML 2001)	Επίπεδος συλλέκτης	Συλλέκτης κενού
Φαινόμενο του Θερμοκηπίου (kg CO_2-eq)	76.300	83.300
Οξείνιση (kg SO_2-eq)	715	1.120
Ευτροφισμός (kg Phosphate-eq)	26,3	33,7
Δυναμικό εξάντλησης αβιοτικών πόρων (kg Sb-eq)	5,78	16,2
Δυναμικό εξάντλησης αβιοτικών πόρων στα ορυκτά καύσιμα (MJ)	822.000	886.000
Οικοτοξικότητα στο νερό (kg DCB-eq)	608	968
Ανθρώπινή οικοτοξικότητα (kg DCB-eq)	299.000	175.000
Φωτοχημικό Οζον (kg Ethene-eq)	35,7	53

Η σημαντικότερη περιβαλλοντική επίπτωση αφορά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και στο δυναμικό εξάντλησης των αβιοτικών πόρων στα ορυκτά καύσιμα. Ο συλλέκτης κενού λόγω πολυπλοκότερης κατασκευής εμφανίζει σημαντικότερη περιβαλλοντική επίπτωση χωρίς ωστόσο η διαφορά να είναι μεγάλη. Καταλήγουμε λοιπόν, στο συμπέρασμα πως η περιβαλλοντική επίπτωση δε θα μπορούσε από μόνη της να αποτελεί κριτήριο για την επιλογή συλλέκτη σε ηλιακό θερμικό σύστημα αλλά θα πρέπει να συνυπολογιστεί και το κόστος τόσο της επένδυσης όσο και των λειτουργικών εξόδων από την κατανάλωση ενέργειάς των συστημάτων.



Εικόνα 8: Περιβαλλοντική απόδοση ανά περιβαλλοντική πτυχή τον επίπεδο ηλιακό συλλέκτη και τον συλλέκτη

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ενεργειακή και ευρωπαϊκή πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης διαδραματίζουν πρωτεύοντα ρόλο στην προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας, κυρίως για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης στα κτίρια καθώς και για την θέρμανση των αντίστοιχων χώρων, διαδραματίζουν ήδη από τη δεκαετία του 1970 πρωτεύοντα ρόλο στην κατεύθυνση αυτήν. Επιπροσθέτως, έχουν αναπτυχθεί και οι τεχνολογίες για την κάλυψη και των ψυκτικών φορτίων, που όμως παραμένουν σχετικά περιορισμένες, κυρίως λόγω υψηλού αρχικού κόστους. Τα ηλιοθερμικά συστήματα συνδυασμένης λειτουργίας για την θέρμανση και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (Solar Combi Systems), καθώς και τα πιο εξελιγμένα ηλιοθερμικά συστήματα συνδυασμένης λειτουργίας που καλύπτουν, εκτός από την θέρμανση και την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης αλλά και τις απαιτήσεις σε ψύξη, αποτελούν μια ιδιαίτερα ελκυστική λύση για την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών CO_2. Συνδυάζοντας τα συστήματα αυτά με συστήματα ελέγχου και αυτοματισμών υπάρχει η δυνατότητα να επιτευχθεί σε μεγάλο βαθμό ο στόχος των κτιρίων σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας. Παράλληλα, τα Solar Combi καθώς και τα Solar Combi+ προσφέρουν ιδιαίτερα υψηλή περιβαλλοντική επίδοση στο κτίριο.

Ωστόσο, η εφαρμογή τους δεν είναι ακόμη ιδιαίτερα διαδεδομένη στην Ελλάδα, λόγω του υψηλού κόστους εγκατάστασης. Προκύπτουν λοιπόν, μεγάλοι χρόνοι απόσβεσης (ιδιαίτερα για τα Solar Combi+), καθιστώντας την εφαρμογή τους μια οικονομικά μη σκόπιμη επένδυση, ειδικά όσον αφορά τα κτίρια κατοικιών. Απαιτούνται επομένως δράσεις και προγράμματα χρηματοδότησης για τη μείωση του αρχικού κόστους επένδυσης. Τέλος, ο στόχος των πολιτικών και των δράσεων στήριξης τεχνολογιών πρέπει πλέον να αποτελούν οι ολοκληρωμένες λύσεις, που συνδυάζουν τα ενεργειακά και περιβαλλοντικά οφέλη με την επίτευξη συνθηκών θερμικής άνεσης και ποιότητας ζωής των χρηστών, με ένα οικονομικό αποδεκτό κόστος .

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Anastaselos D., Oxizidis S., Manoudis A., Papadopoulos A.M., Environmental performance of energy systems of residential buildings: Towards Sustainable Communities. Journal of Sustainable Cities and Society 20, 96-108, (2016)

[2] Bare, J.C., G.A. Norris, D.W. Pennington, and T. McKone TRACI: The Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts. Journal of Industrial Ecology 6(3), pp. 49-78., (2003)

[3] Biswas W.K., Carbon footprint and embodied energy consumption assessment of building construction works in Western Australia. International Journal of Sustainable Built Environment, 3, 179-186, (2014)

[4] Filimonau V., Dickinson J., Robbins D., Huijbregts M.A.J., Reviewing the carbon footprint analysis of hotels: Life Cycle Energy Analysis (LCEA) as a holistic method for carbon impact appraisal of tourist accommodation, Journal of Cleaner Production 19: 1917-1930, (2011).

[5] Gabi Software, Life Cycle Analysis Software, http://www.gabi-software.com/international/index/ (2016)

[6] Giama, E., “Energy Performance of Buildings – Energy Efficiency and Built Environment in Temperate Climates.” In Chap. 6, Life Cycle vs Carbon Footprint Analysis for Construction Materials, edited by M. Santamouris, 95–106. New York: Springer Science & Business Media. ISBN 978-3-319-20830-5, ISBN 978-3319-20831-2 (eBook). doi:10.1007/978-3-319-20831-2., (2016)

[7] ISO 14040, Environmental management: life cycle assessment, principles and framework (1997)

[8] ISO 14041, Environmental management: life cycle assessment, principles and framework (1998)

[9] ISO 14042, Environmental management: life cycle assessment, life cycle impact assessment (2000)

[10] ISO 14043, Environmental management: life cycle assessment, life cycle interpretation (2000)

[11] Kyriaki E., Drosou V., Papadopoulos A.M., “Solar Thermal Systems For Low Energy Hotel Buildings: State Of The Art, Perspectives and Challenges”, Energy Procedia, pp. 1968-1973, 78C, DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.385., (2015)

[12] Martinopoulos G., Tsilingiridis G., Kyriakis N.:Life Cycle Analysis implementation for CO2 abatement in energy systems. The case of solar thermal systems. Lecturers Series on Computer and Computational Sciences, Vol. 7, 709-713, 2006.

[13] Tsilingiridis G. and Martinopoulos G.**,** "Thirty years of domestic solar hot water systems use in Greece – energy and environmental benefits - Future perspectives", *Renewable Energy 35, p. 490-497*, 2010.

[14] Guinée J.B., Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., Koning A. de; Oers L. van, Wegener Sleeswijk A., Suh S., Udo de Haes H.A., Bruijn H., de; Duin, R., van; Huijbregts, M.A.J. Handbook on life cycle assessment.

[15] Martinopoulos G., Tsilingiridis G., Kyriakis N.: Environmental Impact of different material use in solar collectors. A parametric analysis. E-Proceedings Int. Conf. ‘Restoration and Protection of Environment VIII’, P-316, Chania, Greece, July 3-7, 2006.

Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΤΟΥ ΤΡΙΤΟΓΕΝΟΥΣ ΤΟΜΕΑ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΤΟΥΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ: ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ

Δήμητρα Σαββαστάκη-Σεβαστάκη, Ευαγγελία Κτιστάκη, Χριστίνα Γιαρμά*

Εργαστήριο Οικοδομικής και Φυσικής των Κτιρίων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Α.Π.Θ. 541 24 Θεσσαλονίκη,
*e-mail: chgiarma@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων είναι μια από τις συνιστώσες της λειτουργίας τους με ιδιαίτερη σημασία για την περιβαλλοντική τους εικόνα και γενικότερα για τη βιωσιμότητα στον κτιριακό τομέα· πράγματι, η ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων και οι σχετικές μ' αυτή παράμετροι συνδέονται άρρηκτα με παράγοντες που σχετίζονται με την περιβαλλοντική (κατανάλωση ενέργειας, χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις κ.ά.), την οικονομική (κόστος τοποθέτησης και λειτουργίας ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων κ.ά.) και την κοινωνική (εξασφάλιση ικανοποιητικής ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος στα κτίρια κ.ά.) διάσταση της απόδοσής τους. Κατά συνέπεια, η ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων δεν θα μπορούσε παρά να κατέχει μια σημαντική θέση στις μεθόδους αξιολόγησης της περιβαλλοντικής απόδοσής τους και στα αντίστοιχα εργαλεία.

Σ' αυτή την εργασία παρουσιάζεται μια ανασκόπηση τεσσάρων ευρέως διαδεδομένων μεθόδων και εργαλείων για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής απόδοσης των κτιρίων (BREEAM, LEED, CASBEE και SBTool) ως προς τον τρόπο, με τον οποίο η ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων και οι σχετικοί μ' αυτή παράγοντες εντάσσονται στη δομή τους και λαμβάνονται υπόψη στην αξιολόγηση που πραγματοποιούν. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας εξετάζονται οι εκδοχές των τεσσάρων μεθόδων και εργαλείων που αναφέρονται σε νέα κτίρια του τριτογενούς τομέα. Συγκεκριμένα, μετά από μια σύντομη παρουσίαση των μελετώμενων εργαλείων αξιολόγησης, παρουσιάζονται συστηματικά οι παράμετροι που σχετίζονται με την ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων και περιλαμβάνονται σε κάθε ένα από αυτά (σ' αυτό το φάσμα παραμέτρων ανήκουν ζητήματα διαφορετικής φύσεως που εκτείνονται πέρα από τον υπολογισμό ενεργειακών καταναλώσεων). Επιπλέον, γίνεται αναφορά στα χρησιμοποιούμενα κριτήρια, στις απαιτούμενες επιδόσεις, σε στοιχεία που συνδέονται με τα σχετικά βάρη εξεταζόμενων παραμέτρων στο πλαίσιο των υπολογιστικών δομών των υπό μελέτη μεθόδων και εργαλείων και, όπου κρίνεται απαραίτητο, σε πρότυπα ή/και κανονιστικά πλαίσια που σχετίζονται με την βαθμολόγηση των κριτηρίων. Η ανασκόπηση που παρουσιάζεται στην εργασία καλύπτει ολόκληρο το φάσμα των παραμέτρων που σχετίζονται με την ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων· τα ζητήματα και τα κριτήρια που συνδέονται άμεσα με την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων (υπολογιστική προσέγγιση στο πλαίσιο κανονισμών και προτύπων, υπολογισμοί καταναλώσεων και αντιπαραβολή με μια κατάσταση / κτίριο αναφοράς κ.ά.), όπως εντάσσονται και αξιολογούνται στη δομή και στη διαδικασία αξιολόγησης καθενός από τα εξεταζόμενα εργαλεία, αναλύονται σε μεγαλύτερο βάθος.

Λέξεις Κλειδιά: ενεργειακή συμπεριφορά κτιρίων, περιβαλλοντική απόδοση κτιρίων, εργαλεία αξιολόγησης

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η περιβαλλοντική απόδοση των κτιρίων συντίθεται από ένα πλήθος παραμέτρων που αναφέρονται σε όλες τις συνιστώσες της κατασκευής, της λειτουργίας και του τέλους της ζωής τους και συνδέονται μεταξύ τους με πολύπλοκες σχέσεις. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να οργανωθούν σε μεγαλύτερα σύνολα που εκφράζουν τις διαφορετικές πλευρές της απόδοσης των κτιρίων (π.χ. ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος, οικονομικές και κοινωνικές παράμετροι, κατανάλωση πόρων, περιβαλλοντικά φορτία κ.ά.). Μια από τις πλευρές της λειτουργίας των κτιρίων με καθοριστική σημασία για τη συνολική περιβαλλοντική τους εικόνα είναι αυτή που σχετίζεται με την ενεργειακή τους συμπεριφορά. Στην παρούσα εργασία διερευνάται ο τρόπος, με τον οποίο η ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων και οι σχετικοί μ' αυτή παράγοντες εντάσσονται στη δομή τεσσάρων ευρέως διαδεδομένων μεθόδων και εργαλείων για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής απόδοσης των κτιρίων (BREEAM, LEED, CASBEE και SBTool). Οι εκδοχές των εργαλείων που εξετάζονται αναφέρονται σε νέα κτίρια του τριτογενούς τομέα. Στην ανάλυση που ακολουθεί και βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην [1] αναφέρονται διάφορα χαρακτηριστικά της αξιολόγησης των παραμέτρων που σχετίζονται με την ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων στο πλαίσιο των εξεταζόμενων μεθόδων (κριτήρια, στοιχεία που συνδέονται με τα σχετικά βάρη των υπό μελέτη παραγόντων, κανονιστικά πλαίσια κ.ά.). Τα ζητήματα και τα κριτήρια που αναφέρονται στην εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων στα υπό μελέτη εργαλεία αναλύονται σε μεγαλύτερο βάθος.

2. ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ

2.1. BREEAM

Η μέθοδος BREEAM (*BRE's Environmental Assessment Method*), η οποία δημοσιεύθηκε στην πρώτη της εκδοχή το 1990 από το *Building Research Establishment (BRE*) στην Μ. Βρετανία, είναι ένα εργαλείο εκτίμησης της περιβαλλοντικής απόδοσης των κτιρίων που πλέον μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για καινούργια όσο και για υφιστάμενα κτίρια και εξετάζει ένα ευρύ φάσμα ζητημάτων που σχετίζονται, μεταξύ άλλων, με το περιβάλλον και με την υγεία και την καθημερινότητα των χρηστών τους. Με τη χρήση της κατάλληλης εκδοχής του BREEAM μπορούν να αξιολογηθούν κτίρια διάφορων χρήσεων σε διαφορετικά στάδια του κύκλου ζωής τους. Μάλιστα, έχει δημιουργηθεί μια εκδοχή του BREEAM για την αξιολόγηση σε ευρύτερες κλίμακες (κοινότητα κ.ά.). Η περιβαλλοντική αξιολόγηση με την μέθοδο BREEAM βασίζεται στην απονομή μονάδων στο κτίριο με βάση την ικανοποίηση μιας σειράς κριτηρίων, τα οποία, στην έκδοση που μελετάται σ' αυτή την εργασία (*Πίνακας 1*), ομαδοποιούνται σε εννέα (ή, σε κάποιες περιπτώσεις αξιολογήσεων, δέκα) περιβαλλοντικές ενότητες (*Environmental Sections*). Επίσης, στη δομή της εξεταζόμενης μεθόδου εντάσσεται μία ακόμη ενότητα κριτηρίων, η «Καινοτομία» (*Innovation*), η αξιολόγηση της οποίας μπορεί να βελτιώσει τη βαθμολογία ενός κτιρίου, καθώς μέσω αυτής δίνεται η δυνατότητα συγκέντρωσης επιπλέον μονάδων (επιβραβεύεται η εφαρμογή καινοτόμων προϊόντων και διαδικασιών ή/και η υποδειγματική απόδοση του υπό μελέτη κτιρίου σε σχέση με ορισμένες ομάδες κριτηρίων και απαιτήσεων). Σε κάθε ενότητα κριτηρίων, ανάλογα με την σπουδαιότητα των εξεταζόμενων από αυτά παραγόντων, αντιστοιχεί ένα σχετικό βάρος που προσδιορίζει το ποσοστό της συνεισφοράς της στην τελική βαθμολογία του κτιρίου. Για την διεθνή έκδοση της μεθόδου BREEAM, η οποία μελετήθηκε στην παρούσα εργασία (*Πίνακας 1*), τα σχετικά βάρη των περιβαλλοντικών ενοτήτων διαφοροποιούνται ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου και το στάδιο της λειτουργικής ζωής του, στο οποίο αναφέρεται η αξιολόγηση [2]. Κάθε μία από τις ενότητες αποτελείται από επί μέρους ζητήματα, στα οποία αναλογεί ένας συγκεκριμένος αριθμός διαθέσιμων μονάδων. Η βαθμολογία κάθε ενότητας προκύπτει από τον λόγο του αριθμού των μονάδων που συγκεντρώθηκαν κατά την αξιολόγηση των ζητημάτων, από τα οποία αποτελείται, προς τον αριθμό των διαθέσιμων γι' αυτά τα ζητήματα μονάδων. Η τελική βαθμολογία για το υπό μελέτη κτίριο, προκύπτει από την ζυγισμένη άθροιση των βαθμολογιών των εννέα περιβαλλοντικών ενοτήτων (εφαρμογή των σχετικών βαρών), λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη τις μονάδες που προέρχονται από την ενότητα «Καινοτομία». Με βάση την τελική βαθμολογία το κτίριο εντάσσεται σε μια από τις έξι κατηγορίες κατάταξης που ορίζονται στη μέθοδο *(Πίνακας 1).* Σημειώνεται ότι, προκειμένου να διασφαλιστεί η ελάχιστη αποδεκτή απόδοση σε σχέση με κάποια σοβαρά περιβαλλοντικά ζητήματα, στο BREEAM ενσωματώνεται η απαίτηση για την επίτευξη ελάχιστων επιδόσεων στις σχετικές ενότητες κριτηρίων.

2.2. LEED

Το LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) αναπτύχθηκε το 1998 στις Η.Π.Α. από το *U.S. Green Building Council* (*USGBC*) και ξεκίνησε ως εθνικό πρότυπο για την κατασκευή φιλικών προς το περιβάλλον κτιρίων. Βασικός στόχος του είναι η βελτίωση της συμπεριφοράς των κτιρίων σε τομείς όπως η εξοικονόμηση ενέργειας και νερού, η μείωση εκπομπών CO_2, η βελτίωση της ποιότητας του εσωτερικού περιβάλλοντος, η σωστή διαχείριση των πόρων κ.ά. Το LEED μπορεί πλέον να εφαρμοστεί (με τη χρήση της κατάλληλης εκδοχής του) σε όλους τους τύπους κτιριακών έργων και σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής τους, στην Αμερική και σε παγκόσμια κλίμακα με τις κατάλληλες προσαρμογές και παραδοχές· σημειώνεται ότι υπάρχει έκδοση του LEED για την αξιολόγηση έργων διαφορετικής κλίμακας – π.χ. γειτονιά. Στην εκδοχή *LEED v4 for Building Design and Construction* [3], η οποία μελετήθηκε στην παρούσα εργασία, οι εξεταζόμενες παράμετροι ομαδοποιούνται σε οκτώ μεγάλες περιβαλλοντικές κατηγορίες (*Πίνακας 1*). Σ' αυτές τις κατηγορίες περιλαμβάνονται επί μέρους ζητήματα δύο ειδών: (α) αυτά, στο πλαίσιο των οποίων καθορίζονται απαιτήσεις και κριτήρια απόδοσης για την απονομή των αντίστοιχων διαθέσιμων μονάδων και (β) προαπαιτούμενα ζητήματα (η συμμόρφωση με τα τελευταία είναι υποχρεωτική για την ολοκλήρωση της αξιολόγησης, αλλά δεν συνεισφέρει μονάδες· η υποχρεωτική ικανοποίηση των απαιτήσεων των κριτηρίων αυτών των ζητημάτων στοχεύει στη εξασφάλιση της, κατά LEED, ελάχιστης αποδεκτής απόδοσης). Η μεθοδολογία αξιολόγησης στο LEED βασίζεται στην απόδοση μονάδων, η οποία πραγματοποιείται στο επίπεδο των ζητημάτων. Σε κάθε ζήτημα αντιστοιχεί ένα πλήθος διαθέσιμων μονάδων, το οποίο διαφοροποιείται ανάλογα με την χρήση του κτιρίου. Οι μονάδες που διατίθενται στην κατηγορία «Καινοτομία» (*Innovation*) αποδίδονται στο υπό μελέτη κτίριο με βάση είτε τη χρήση καινοτόμων λύσεων και στρατηγικών είτε την υποδειγματική συμμόρφωσή του με απαιτήσεις που ορίζονται σε συγκεκριμένα ζητήματα. Με βάση το άθροισμα των μονάδων που συγκεντρώνονται από τα επί μέρους ζητήματα όλων των περιβαλλοντικών κατηγοριών, το κτίριο κατατάσσεται σε ένα από τα τέσσερα επίπεδα πιστοποίησης του LEED (*Πίνακας 1*).

2.3. CASBEE

Το CASBEE (*Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency*) είναι μια μέθοδος αξιολόγησης της περιβαλλοντικής απόδοσης των κτιρίων, η οποία αναπτύχθηκε από το *Japan Sustainable Building Consortium (JSBC*), μια επιτροπή έρευνας που ιδρύθηκε το 2001 με τη συνεργασία διάφορων φορέων (ακαδημαϊκή κοινότητα, βιομηχανία, κρατικοί φορείς), και εφαρμόζεται κυρίως στην περιοχή της Ιαπωνίας. Με την εφαρμογή της κατάλληλης εκδοχής του CASBEE –η οικογένεια των εργαλείων του CASBEE περιλαμβάνει εφαρμογές για διαφορετικές περιπτώσεις αξιολογήσεων– δίνεται η δυνατότητα αξιολόγησης κτιρίων οποιασδήποτε χρήσης σε όλα τα στάδια κύκλου ζωής τους ·μάλιστα, κάποιες εφαρμογές αναφέρονται στην κλίμακα της αστικής περιοχής ή της πόλης, ενώ παράλληλα, έχουν δημιουργηθεί εργαλεία που σχετίζονται με ειδικά θέματα, π.χ. με το φαινόμενο της θερμικής νησίδας. Η φιλοσοφία και η δομή της αξιολόγησης της περιβαλλοντικής απόδοσης των κτιρίων στο CASBEE διαφέρει σε σχέση με τα άλλα εργαλεία που εξετάζονται σ' αυτή την εργασία. Συγκεκριμένα, στο πλαίσιο αυτής της μεθόδου ορίζονται δύο «χώροι», ο εσωτερικός και ο εξωτερικός· αυτοί οι δύο χώροι διαχωρίζονται με ένα υποθετικό όριο. Σε κάθε έναν από τους δύο χώρους αντιστοιχίζεται ένας παράγοντας (στην ουσία ένας άξονας γύρω από τον οποίο οργανώνονται οι σχετικές περιβαλλοντικές παράμετροι). Αυτοί οι δύο παράγοντες είναι οι εξής:

– «Περιβαλλοντική ποιότητα κτιρίου» (*Q. Environmental quality of building*), στο πλαίσιο του οποίου αποτιμάται η ποιότητα διαβίωσης των χρηστών του κτιρίου (εσωτερικός χώρος) και

– «Μείωση περιβαλλοντικών φορτίων του κτιρίου» (*LR. Environmental load reduction of building*) που αφορά στη μείωση των περιβαλλοντικών φορτίων του κτιρίου στον εξωτερικό, περιβάλλοντα χώρο [4].

Κάθε ένας από τους παράγοντες *Q* και *LR* περιλαμβάνει τρεις περιβαλλοντικές ενότητες (*Πίνακας 1*), οι οποίες στην συνέχεια αναλύονται σε επί μέρους ζητήματα και κριτήρια. Σε κάθε μία από αυτές τις ενότητες, αλλά και στα επί μέρους ζητήματα και κριτήρια, αποδίδεται ένα σχετικό βάρος, η τιμή του οποίου διαφοροποιείται για διαφορετικές χρήσεις κτιρίων [5]. Η βαθμολόγηση στο CASBEE πραγματοποιείται στην μικρότερη ενότητα αξιολόγησης (ζήτημα ή κριτήριο) με την απονομή επιπέδων απόδοσης («*level*»), τα οποία κυμαίνονται από 1 έως 5 ανάλογα με το εάν και σε ποιο βαθμό πληρούνται κάποιες καλά ορισμένες συνθήκες που σχετίζονται με κάθε ζήτημα / κριτήριο. Η τελική βαθμολογία των παραγόντων *Q* και *LR* προκύπτει από τις επί μέρους ζυγισμένες αθροίσεις (λαμβάνονται υπόψη τα σχετικά βάρη) των βαθμών των ενοτήτων αξιολόγησης, από τις οποίες αποτελούνται. Η τελική περιβαλλοντική απόδοση του κτιρίου προσδιορίζεται με την εκτίμηση του δείκτη BEE (*Built Environment Efficiency*) συναρτήσει των τιμών των παραγόντων *Q* και *LR*. Ανάλογα με την τιμή του δείκτη BEE το κτίριο κατατάσσεται σε μια από τις πέντε κατηγορίες που παρουσιάζονται στον *Πίνακα 1*. Αξίζει, τέλος, να σημειωθεί ότι το CASBEE προσφέρει μία ξεχωριστή

διαδικασία αξιολόγησης και πιστοποίησης που σχετίζεται αποκλειστικά με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η οποία όμως δεν αποτελεί μέρος ανάλυσης της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 1: Παρουσίαση βασικών χαρακτηριστικών των μελετώμενων εργαλείων αξιολόγησης της περιβαλλοντικής απόδοσης κτιρίων

	BREEAM	LEED	CASBEE	SBTool
Εξεταζόμενη έκδοση του εργαλείου	BREEAM International New Construction, 2016 [2]	LEED v4 for Building Design and Construction [3]	CASBEE for Building (New Construction), 2014 [4]	SBTool 2015 Generic Max Dsn 20Jun15 [6]
Περιβαλλοντικές κατηγορίες*[1]	Περιβαλλοντικές ενότητες *(Environmental sections)*	Περιβαλλοντικές κατηγορίες *(Environmental categories)*	Παράγοντες *Q* και *LR* και ενότητες καθενός από αυτούς	Ζητήματα απόδοσης *(Performance Issues)*
	-Διαχείριση -Υγεία και ευζωία -Ενέργεια -Μεταφορές -Κατανάλωση και επάρκεια νερού -Υλικά -Απόβλητα -Χρήση γης και οικολογία -Μόλυνση -Καινοτομία -Κίνδυνοι (αξιολογείται ως ξεχωριστή ενότητα υπό συνθήκες)	-Τοποθεσία και μεταφορές -Βιώσιμες περιοχές / πεδία -Επάρκεια νερού -Ενέργεια και ατμόσφαιρα -Υλικά και πόροι -Ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος -Καινοτομία -Προτεραιότητα στην περιοχή	*Q*: Περιβαλλοντική ποιότητα κτιρίου *Q1.* Εσωτερικό περιβάλλον *Q2.*Ποιότητα υπηρεσιών *Q3.*Εξωτερικό περιβάλλον στο πεδίο *LR:* Μείωση περιβαλλοντικών φορτίων του κτιρίου *LR1.*Ενέργεια *LR2.*Πόροι και υλικά *LR3.*Περιβάλλον έξω από το πεδίο	-*A.* Επιλογή πεδίου, αστικός σχεδιασμός και σχεδιασμός του έργου -*B.* Ενέργεια και κατανάλωση πόρων -*C.* Περιβαλλοντικά φορτία -*D.* Ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος -*E.* Ποιότητα υπηρεσιών -*F.* Κοινωνικά, πολιτιστικά και αντιληπτικά ζητήματα -*G.* Κόστος και οικονομικά ζητήματα
Σχετικά βάρη	Στο επίπεδο των περιβαλλοντικών ενοτήτων	Η σχ. βαρύτητα των κατηγοριών προκύπτει έμμεσα, μέσω των διαθέσιμων μονάδων	Σε πολλά επίπεδα της δομής του εργαλείου –για κάθε ενότητα, ζήτημα και κριτήριο χωριστά	Σχετικά βάρη στο επίπεδο των κριτηρίων απόδοσης
Έκφραση απόδοσης του κτιρίου	Επί τοις εκατό ποσοστό (%)	Αριθμός συγκεντρωμένων μονάδων	Δείκτης BEE	Βαθμός απόδοσης (στην κλίμακα του SBTool)
Επίπεδα κατάταξης κτιρίων	Outstanding, Excellent, Very good, Good, Pass,Unclassified	Platinum, Gold, Silver, Certified	S(Excellent), A, B+, B, C (Poor)	A, B, C, D, E, F, G (A: βέλτιστη απόδοση)

*1 Σημειώνεται ότι: (α) με τον όρο «περιβαλλοντικές κατηγορίες» σ' αυτόν τον πίνακα και στις επόμενες ενότητες του κειμένου περιγράφονται οι βασικές ενότητες κριτηρίων κάθε εργαλείου· παρότι στη δομή κάθε μεθόδου η ονομασία αυτών των ενοτήτων είναι διαφορετική (βλ. γραμμή 3 του Πίνακα), επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί σ' αυτή την εργασία ένας ενιαίος όρος γι' αυτό το επίπεδο αξιολόγησης προκειμένου να διευκολυνθεί η ανάλυση που ακολουθεί και (β) οι τίτλοι των περιβαλλοντικών κατηγοριών στην αγγλική γλώσσα (από τη μετάφραση των οποίων προέρχονται οι ονομασίες που παρατίθενται σ' αυτό τον πίνακα) μπορούν να αναζητηθούν στις αντίστοιχες πηγές [2]-[4] και [6].

2.4. SBTool

Το SBTool (*Sustainable Building Tool*) είναι το υπολογιστικό εργαλείο της μεθόδου SB method (*Sustainable Building method*), η οποία αναπτύσσεται και εξελίσσεται συνεχώς με τη συνεισφορά οργανισμών και ερευνητών από ολόκληρη την υφήλιο υπό την ευθύνη, από το 2002, της iiSBE

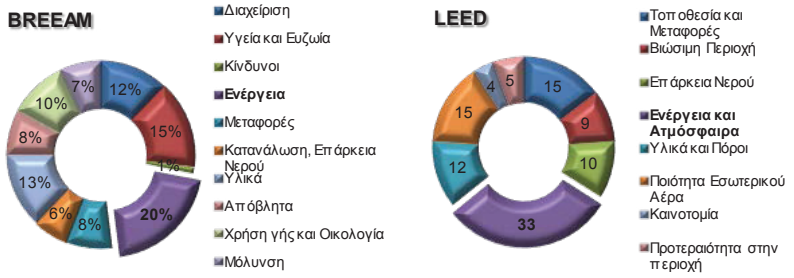
(*international initiative for a Sustainable Built Environment*). Αυτό το εργαλείο, το οποίο είναι η μετεξέλιξη του παλαιότερου GBTool (υπολογιστική εφαρμογή της *Green Building Challenge method,* η οποία εμφανίστηκε στην πρώτη της εκδοχή το 1996), αποτελεί στην ουσία μια πλατφόρμα, ένα πλαίσιο για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής απόδοσης των κτιρίων που λειτουργεί σε περιβάλλον λογιστικών φύλλων και μπορεί να τροποποιηθεί ώστε να προσαρμοστεί στις τοπικές συνθήκες, σε διάφορους τύπους κτιρίων, καθώς και σε οποιοδήποτε στάδιο του κύκλου ζωής τους. Αυτή η τροποποίηση μπορεί να επιτευχθεί με, μεταξύ άλλων, την προσαρμογή των σχετικών βαρών των επί μέρους κριτηρίων με βάση τις τοπικές ιδιαιτερότητες, καθώς και με την διαμόρφωση της βαθμολογικής κλίμακας ανάλογα με τους εθνικούς κανονισμούς και με τα ισχύοντα πρότυπα στην εκάστοτε περιοχή (π.χ. «εθνικές» εκδοχές του SBTool στην Πορτογαλία και σε άλλες χώρες). Το SBTool διαρθρώνεται σε δύο διασυνδεμένα αρχεία· στο ένα από αυτά τα αρχεία διαμορφώνεται το πλαίσιο της αξιολόγησης (καθορισμός των κριτηρίων που θα ληφθούν υπόψη, διαμόρφωση βαθμολογικής κλίμακας για κάθε κριτήριο κ.ά.), ενώ στο άλλο περιλαμβάνονται κατά κύριο λόγο δεδομένα για το υπό μελέτη κτίριο. Οι παράμετροι που αξιολογούνται στο πλαίσιο της μεθόδου ταξινομούνται σε επτά περιβαλλοντικές ενότητες *(Performance Issues)* (*Πίνακας 1*), οι οποίες απαρτίζονται από υποενότητες και αυτές με τη σειρά τους από επί μέρους κριτήρια. Σημειώνεται ότι όταν η αξιολόγηση πραγματοποιείται για τη φάση πριν το σχεδιασμό λαμβάνεται υπόψη μόνο μια, διαφοροποιημένη, ενότητα κριτηρίων. Η αξιολόγηση πραγματοποιείται στο επίπεδο των κριτηρίων απόδοσης (που μπορεί να είναι περιγραφικά ή ποσοτικά), στα οποία αντιστοιχεί ένα σχετικό βάρος. Η κλίμακα βαθμολόγησης κυμαίνεται από -1 έως 5 σε όλα τα κριτήρια (-1: απόδοση χαμηλότερη από την απαιτούμενη, 5: βέλτιστη πρακτική). Εξαίρεση αποτελούν ορισμένα κριτήρια που χαρακτηρίζονται ως υποχρεωτικά (γι' αυτά ορίζεται ένα διαφορετικό εύρος βαθμολόγησης, π.χ. 3 έως 5). Η ζυγισμένη άθροιση, με βάση τα σχετικά βάρη, των βαθμών των κριτηρίων οδηγεί στον υπολογισμό των βαθμών των μεγαλύτερων ενοτήτων αξιολόγησης στη δομή του εργαλείου και, τελικά, στο βαθμό του κτιρίου, με βάση τον οποίο το τελευταίο κατατάσσεται σε μια από τις οριζόμενες από τη μέθοδο κατηγορίες απόδοσης *(Πίνακας 1)*.

3. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΣΤΑ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ

Για μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση της περιβαλλοντικής απόδοσης κτιριακών έργων απαιτείται η συνολική διερεύνηση πολλών και διαφορετικών παραγόντων, ορισμένοι από τους οποίους εκτείνονται πέρα από τα όρια της «στενής» μελέτης της κατασκευής και της λειτουργίας των κτιρίων (δίκτυα μεταφορών στην περιοχή κ.ά.). Ωστόσο, η ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων παραμένει ένας βασικός άξονας της περιβαλλοντικής τους απόδοσης. Αυτό το γεγονός απεικονίζεται με σαφήνεια στη σχετική βαρύτητα που αποδίδεται στα ζητήματα ενεργειακής συμπεριφοράς στο πλαίσιο των μεθόδων αξιολόγησης της περιβαλλοντικής απόδοσης των κτιρίων. Από αυτό τον κανόνα δεν εξαιρούνται τα εργαλεία που μελετώνται σ' αυτή την εργασία.

Όπως θα διαφανεί στην ανάλυση που ακολουθεί, τα ζητήματα που σχετίζονται με την ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου οργανώνονται με διαφορετικό τρόπο στο πλαίσιο καθεμιάς από τις εξεταζόμενες μεθόδους, ανάλογα με την δομή της και την προσέγγιση που υιοθετεί. Έτσι, στη μέθοδο BREEAM αυτά τα ζητήματα περιλαμβάνονται στην περιβαλλοντική κατηγορία «Ενέργεια» *(Energy),* ενώ στο LEED εντάσσονται στην κατηγορία «Ενέργεια και Ατμόσφαιρα» *(Energy and Atmosphere).* Στο CASBEE η κατηγορία *LR1 «*Ενέργεια» (*Energy*) εντάσσεται στην ομάδα κριτηρίων *LR* «Μείωση περιβαλλοντικών φορτίων» (*Environmental load reduction of building*), ενώ στο SBTool παράμετροι που σχετίζονται με τη ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου αναλύονται σε περισσότερες από μία περιβαλλοντικές κατηγορίες, οι οποίες ωστόσο περιλαμβάνουν και κριτήρια διαφορετικού περιεχομένου (*B.* «Ενέργεια και κατανάλωση πόρων»*, C.* «Περιβαλλοντικά φορτία» *και E.* «Ποιότητα υπηρεσιών»). Σε όλα τα μελετώμενα εργαλεία η σχετική βαρύτητα των ενοτήτων αξιολόγησης που συνδέονται με παραμέτρους ενεργειακής συμπεριφοράς είναι αυξημένη. Έτσι, στο πλαίσιο της αξιολόγησης που πραγματοποιείται από τη μελετώμενη έκδοση του συστήματος BREEAM, το σχετικό βάρος της ενότητας «Ενέργεια» στη συνολική αξιολόγηση είναι 20%, ενώ στο LEED η βαθμολόγηση της κατηγορίας «Ενέργεια και Ατμόσφαιρα» μπορεί να αποδώσει έως και 33 από τις συνολικά 110 διαθέσιμες μονάδες της αξιολόγησης *(Εικόνα 1).* Σημειώνεται ότι η κατανομή των μονάδων του LEED που εμφανίζεται στην *Εικόνα 1* αντιστοιχεί στα κτίρια του τριτογενούς τομέα πλην ορισμένων χρήσεων –π.χ. σχολικών κτιρίων κ.ά.– για τα οποία υπάρχουν διαφοροποιήσεις [7]. Με δεδομένο ότι στο CASBEE η μεθοδολογία που αξιολογεί την περιβαλλοντική απόδοση των κτιρίων διαφέρει σε σχέση με αυτή του BREEAM και του LEED, προκύπτει ότι τα σχετικά βάρη που αποδίδονται στις παραμέτρους που συνδέονται άμεσα με την ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων στο πλαίσιο αυτής της μεθοδολογίας δεν είναι ευθέως συγκρίσιμα με τα ποσοστά συμμετοχής που παρουσιάζονται στην

Εικόνα 1. Ως ένδειξη για τη μεγάλη συμμετοχή αυτών των παραμέτρων στη συνολική αξιολόγηση αναφέρεται ότι το σχετικό βάρος που αντιστοιχεί στην κατηγορία *LR1* στο πλαίσιο της αξιολόγηση του παράγοντα *LR* του CASBEE είναι 40%. Τέλος, στο SBTool ο καθορισμός των σχετικών βαρών καθορίζεται μερικώς από εξουσιοδοτημένες αρχές της περιοχής του υπό μελέτη έργου, ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν, επομένως δεν υπάρχει μια ενιαία, συγκεκριμένη τιμή για το κάθε σύνολο κριτηρίων. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι στην γενική πλατφόρμα του εργαλείου που μελετήθηκε (*Πίνακας 1*) για νέα κτίρια γραφείων (μεγάλα έργα, με το μέγιστο εύρος των κριτηρίων να εξετάζονται στη φάση του σχεδιασμού), σε κάθε μία από τις περιβαλλοντικές κατηγορίες Β και C αντιστοιχεί σχετικό βάρος γύρω στο 25% στη συνολική αξιολόγηση του κτιρίου.



Εικόνα 1: Σχετικά βάρη περιβαλλοντικών κατηγοριών (ενοτήτων) στο BREEAM και κατανομή διαθέσιμων μονάδων στις επί μέρους περιβαλλοντικές κατηγορίες στο LEED

3.1. BREEAM

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας μελετήθηκε η διεθνής έκδοση του BREEAM για νέες κατασκευές, *(Πίνακας 1)*, και η μελέτη επικεντρώθηκε σε κτίρια του τριτογενούς τομέα. Η προσέγγιση του BREEAM σε ό,τι αφορά στην εκτίμηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου εξετάζεται σε 8 διαφορετικά ζητήματα (πρώτη στήλη του *Πίνακα 2)*, από τα οποία αποτελείται η περιβαλλοντική κατηγορία «Ενέργεια» της μεθόδου. Ειδικότερα, στον *Πίνακα 2* παρουσιάζεται για κάθε ζήτημα ο βασικός άξονας της αξιολόγησής του (εξεταζόμενες παράμετροι, απαιτήσεις απόδοσης κ.ά.) και το είδος των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγησή του· στην τελευταία στήλη του *Πίνακα 2* αναγράφονται τεχνικές οδηγίες, πρότυπα και αναφορές, στα οποία βασίζεται η εξέταση όλων αυτών των ζητημάτων.

Στις βασικές επιδιώξεις του BREEAM εντάσσεται η ελαχιστοποίηση των ενεργειακών απαιτήσεων, της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας και των εκπομπών CO_2 που συνδέονται με τις λειτουργικές ανάγκες του κτιρίου. Η αξιολόγηση των παραπάνω παραμέτρων πραγματοποιείται στο πλαίσιο του ζητήματος «Μείωση ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών CO_2» (*Ene 01*) με δύο εναλλακτικές μεθόδους. Σημειώνεται ότι η ικανοποίηση των απαιτήσεων αυτού του ζητήματος μπορεί να αποδώσει στο κτίριο μέχρι και 15 ή 10 μονάδες (εάν εφαρμοστεί η πρώτη ή δεύτερη μέθοδος αντίστοιχα, όπως αναλύεται παρακάτω), επί συνόλου 33 μονάδων που είναι διαθέσιμες στην κατηγορία «Ενέργεια» [2].

Στο πλαίσιο της πρώτης μεθόδου προσδιορίζεται η τιμή του δείκτη EPR_{INC} (*Energy Performance Ratio for International In New Construction*), με βάση τον οποίο καθορίζεται η απόδοση του κτιρίου σε σχέση με την ενεργειακή του απαίτηση / κατανάλωση και με τις εκπομπές CO_2. Η τιμή του δείκτη για νέα κτίρια του τριτογενούς τομέα κυμαίνεται από 0,06 έως 0,9 και οι αντίστοιχες διαθέσιμες μονάδες από 1 έως 15. Για τον προσδιορισμό του δείκτη εισάγονται σε λογισμικό του BREEAM (*scoring and reporting tool*), για τρεις εκδοχές του υπό μελέτη κτιρίου («θεωρητικό κτίριο», «πραγματικό κτίριο» και «βέλτιστη πρακτική» (κατά BREEAM)), τα εξής δεδομένα: ενεργειακή απαίτηση (MJ/m^2), κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας (kWh/m^2) και εκπομπές CO_2 ($kgCO_2/m^2$), τα οποία λαμβάνονται από κατάλληλο, εγκεκριμένο λογισμικό προσομοίωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η δημιουργία ενός «θεωρητικού κτιρίου» (*notional building*), το οποίο συμμορφώνεται με τα ελάχιστα όρια (από κανονισμούς) που ορίζονται από το εργαλείο, αποτελεί προαπαιτούμενο για την αξιολόγηση του ζητήματος. Ακόμη, το BREEAM δίνει την δυνατότητα επιβράβευσης της εξαιρετικά καλής ενεργειακής απόδοσης με έως και 5 επιπλέον μονάδες (κατηγορία «Καινοτομία» (*Innovation*))· συγκεκριμένα, αυτή η πριμοδότηση προϋποθέτει, μεταξύ άλλων, την συγκέντρωση από το κτίριο και των 15 διαθέσιμων μονάδων του ζητήματος *Ene 01*. Η απονομή των μονάδων καινοτομίας καθορίζεται ανάλογα με το ισοδύναμο ποσοστό της ενεργειακής κατανάλωσης για συγκεκριμένες λειτουργικές ανάγκες του

κτιρίου, το οποίο παράγεται από συστήματα χαμηλής ή μηδενικής εκπομπής άνθρακα (*Low and zero carbon systems, LZC*) και χρησιμοποιείται για τη λειτουργία μόνο των συστημάτων εξοπλισμού του

Πίνακας 2: Παρουσίαση ζητημάτων που συνθέτουν την κατηγορία «Ενέργεια» στο BREEAM.

Ζητήματα*[2]	**Βασικός άξονας**	**Είδος κριτηρίων αξιολόγησης**	**Κανονιστικό πλαίσιο**
Ene 01. Μείωση ενεργειακής κατανάλωσης & εκπομπών CO_2	Δυνατότητα βελτίωσης ενεργειακής απόδοσης και μείωσης εκπομπών CO_2	Μέθοδος 1: μέθοδος προσομοίωσης, δείκτης EPR_{INC} Μέθοδος 2: χρήση λίστας ποσοτικών και ποιοτικών κριτηρίων	− *Εθνικά πρότυπα* − *ASHRAE Energy Standard 90.1 (2013)* − *UK's National Calculation Methodology* − *CIBSE TM54 (2013)* − *GIL 65: Metering energy use in new non-domestic buildings* − *California Energy Code* − *EN 13779 (2007)* − *EN 1886 (2007)* − *ASHRAE Standard 62.1 (2010): Ventilation for acceptable indoor air quality* − *ASHRAE 90.1 (2007): Energy standard for buildings* − *CIBSE TM39 Building energy Metering* − *Directive No. 2009/28/EC* − *ECA Energy Technology Product List (ETPL)* − *ISO/DIS 25745 Energy performance of lifts, escalators & moving walks* − *CIBSE TM46 Energy benchmarks*
Ene 02. Παρακολούθηση της ενέργειας (όχι σε κατοικίες)	Εγκατάσταση μετρητών ενέργειας σε συστήματα σημαντικής ενεργειακής κατανάλωσης	Περιγραφικά και ποσοτικά (προδιαγραφές συστημάτων παρακολούθησης και διαχείρισης ενέργειας)	
Ene 03. Εξωτερικός φωτισμός	Εγκατάσταση αποδοτικού συστήματος εξωτερικού φωτισμού	Περιγραφικά και ποσοτικά (απαιτήσεις συστήματος φωτισμού)	
Ene 04. Σχεδιασμός για χαμηλές εκπομπές CO_2	Αξιοποίηση τεχνικών παθητικού σχεδιασμού και προώθηση τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας με χαμηλές ή μηδενικές εκπομπές CO_2 (*LZC technologies*)	Περιγραφικά (ανάλυση χώρου και αναγνώριση ορθών τεχνικών παθητικού σχεδιασμού, φυσικού δροσισμού και αποδοτικών τεχνολογιών (*LZC*)) και ποσοτικά (εκτίμηση ποσοστού βελτίωσης ενεργειακής απόδοσης)	
Ene 05. Ενεργειακά αποδοτικό σύστημα ψύξης	Εγκατάσταση ενεργειακά αποδοτικών συστημάτων ψύξης με στόχο την μείωση εκπομπών αέριων θερμοκηπίου	Περιγραφικά (διασφάλιση ενός αποδοτικού συστήματος ψύξης) και ποσοτικά (εκτίμηση έμμεσης συμβολής του ψυκτικού μέσου, TEWI -kgCO_2)	
Ene 06. Αποδοτικά συστήματα μετακίνησης (στο κτίριο)	Επιλογή αποδοτικότερου συστήματος μετακίνησης μέσα στο κτίριο και περιγραφή προδιαγραφών λειτουργίας του	Περιγραφικά και ποσοτικά (δυνατότητα ανίχνευσης χρηστών και αυτοματοποίηση λειτουργιών, απόδοση λαμπτήρων κ.ά.)	
Ene 07. Αποδοτικά συστήματα εργαστηρίου	Εγκατάσταση αποδοτικών συστημάτων αερισμού – εξαερισμού, εξασφάλιση υγείας και ασφάλειας των χρηστών, ελαχιστοποίηση εκπομπών CO_2 και μείωση καταναλώσεων σε χώρους εργαστηρίων	Περιγραφικά (προδιαγραφές συστήματος αερισμού – εξαερισμού από λίστα κριτηρίων) και ποσοτικά (ποσοστό εξοικονόμησης ενέργειας και συμμόρφωση με καθορισμένα όρια βαθμού απόδοσης των συστημάτων)	
Ene 08. Αποδοτικά συστήματα εξοπλισμού	Αναγνώριση συστημάτων εξοπλισμού με σημαντική ενεργειακή κατανάλωση και επιδίωξη ουσιαστικής μείωσης της ενεργειακής απαίτησης	Περιγραφικά (προδιαγραφές συστημάτων εξοπλισμού (π.χ. εξοπλισμός κουζίνας, υπολογιστές κ.ά.) – υπάρχουν και ποσοτικά στοιχεία)	

*[2] (α) σε κάθε ζήτημα αναφέρεται η κωδικοποίησή του όπως εμφανίζεται στο εγχειρίδιο της μεθόδου (*Ene 01*, κ.ά.)
(β) στους Πίνακες 2-4, ο όρος «ζητήματα» χρησιμοποιείται για να εκφράσει με ενιαίο τρόπο τους θεματικούς άξονες των εξεταζόμενων παραμέτρων, οι οποίοι αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα επίπεδα αξιολόγησης στη δομή των τριών εργαλείων· σημειώνεται ότι οι ονομασίες που χρησιμοποιούνται γι' αυτά τα επίπεδα αξιολόγησης στα τρία εργαλεία, όπως αυτές καταγράφονται στα αντίστοιχα εγχειρίδια [2]-[4], δεν ταυτίζονται.

κτιρίου (κυλιόμενες σκάλες, ανελκυστήρες, ηλεκτρονικές συσκευές κ.ά.). Για παράδειγμα, σε ισοδύναμο ποσοστό 10% αντιστοιχεί 1 μονάδα (*Innovation credit*), ενώ για ποσοστό ίσο με 80% απονέμονται 4 μονάδες (οι 5 μονάδες καινοτομίας αποδίδονται όταν η ενέργεια που παράγεται από συστήματα *LZC* είναι περισσότερη από την ενέργεια που απαιτείται για τις λειτουργικές ανάγκες του κτιρίου). Στο πλαίσιο της δεύτερης μεθόδου, η διαδικασία αξιολόγησης του ζητήματος *Ene 01* πραγματοποιείται με την χρήση μιας λίστας κριτηρίων (*Checklist A5*), η οποία περιλαμβάνει έξι βασικές παραμέτρους που σχετίζονται με την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Κάθε επί μέρους παράμετρος εξετάζεται με βάση ένα σύνολο κριτήριων και η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις κάθε κριτηρίου βαθμολογείται με έναν αντίστοιχο αριθμό μονάδων. Οι έξι παράμετροι που περιλαμβάνονται στη λίστα και εξετάζονται με τη βοήθεια πολυάριθμων κριτηρίων είναι (α) ο φωτισμός (φωτιστική απόδοση λαμπτήρων, αυτοματοποίηση συστήματος φωτισμού και συμμόρφωση με τεχνικές οδηγίες), (β) τα συστήματα ζεστού νερού χρήσης (αποδοτικότητα συστήματος, συμμόρφωση με πρότυπα), (γ) τα συστήματα χαμηλής ή μηδενικής εκπομπής άνθρακα (ποσοστό συνολικής ζήτησης σε ηλεκτρισμό / θέρμανση / ψύξη που παράγεται από τα παραπάνω συστήματα), (δ) το κέλυφος του κτιρίου (ποσοστό βελτίωσης συντελεστή θερμοπερατότητας και μείωση διείσδυσης αέρα), (ε) τα συστήματα θέρμανσης (απόδοση και προδιαγραφές συστημάτων, αυτοματοποίηση λειτουργιών κ.ά.) και (στ) τα συστήματα ψύξης και αερισμού (απόδοση και προδιαγραφές συστημάτων που ορίζονται από τεχνικές οδηγίες, αυτοματοποίηση λειτουργιών κ.ά.). Οι διαθέσιμες μονάδες για την αξιολόγηση του ζητήματος, όταν επιλέγεται η εφαρμογή της δεύτερης μεθόδου, είναι 10.

3.2. LEED

Στο LEED, όπως προαναφέρθηκε, οι παράμετροι που σχετίζονται με την ενεργειακή συμπεριφορά και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου αναλύονται στην κατηγορία «Ενέργεια και Ατμόσφαιρα» και ταξινομούνται σε έντεκα επί μέρους ζητήματα, τέσσερα από τα οποία (πρώτες σειρές του *Πίνακα 3*) είναι προαπαιτούμενα. Τα υποχρεωτικά (προαπαιτούμενα) κριτήρια που θέτει το εργαλείο για την αξιολόγηση της εκάστοτε περιβαλλοντικής κατηγορίας ομαδοποιούνται σε ξεχωριστά ζητήματα (*EA Prerequisite*) και δεν εκφράζονται ως ελάχιστη αποδεκτή απόδοση στο πλαίσιο κάποιων από τα συνολικά εξεταζόμενα κριτήρια (όπως π.χ. στο BREEAM). Στον *Πίνακα 3,* σε αντιστοιχία με τον *Πίνακα 2,* παρουσιάζονται κάποια στοιχεία για την κατηγορία «Ενέργεια και Ατμόσφαιρα» του LEED.

Η αξιολόγηση του ζητήματος «Βελτιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης» (*EA Credit: Optimize Energy Performance*), η οποία επικεντρώνεται στην βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου, συνδέεται άμεσα με το προαπαιτούμενο ζήτημα «Ελάχιστη ενεργειακή απόδοση» (*EA Prerequisite: Minimum Energy Performance*). Η συμμόρφωση με τις απαιτήσεις που ορίζονται στο τελευταίο πραγματοποιείται με τρεις εναλλακτικές μεθόδους. Η πρώτη μέθοδος προϋποθέτει την χρήση λογισμικού προσομοίωσης για την μοντελοποίηση του κτιρίου σχεδιασμού και του κτιρίου αναφοράς (σχετικά στοιχεία καθορίζονται από τεχνικές οδηγίες) και στοχεύει στην επίτευξη ενός ποσοστού βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης (λαμβάνεται υπόψη και η οικονομική διάσταση της ενεργειακής εξοικονόμησης) του κτιρίου σχεδιασμού σε σχέση με το κτίριο αναφοράς κατά τουλάχιστον 5%. Η δεύτερη και η τρίτη εναλλακτικές μέθοδοι βασίζονται σε συμμόρφωση με απαιτήσεις που ορίζονται σε τεχνικές οδηγίες και διεθνή πρότυπα για την εξασφάλιση των ελάχιστων επιπέδων ενεργειακής απόδοσης που υιοθετούνται από το LEED.

Αναφορικά με την αξιολόγηση του ίδιου του ζητήματος «Βελτιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης», παρέχονται δύο εναλλακτικές μέθοδοι υπολογισμού. Στο πλαίσιο της πρώτης μεθόδου εκτιμάται το ποσοστό βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου (όπως περιγράφηκε στην πρώτη μέθοδο του σχετικού προαπαιτούμενου), εφαρμόζοντας διαφορετικά σενάρια για το κτίριο σχεδιασμού, τα οποία αφορούν στα συστήματα ψύξης / θέρμανσης / αερισμού, ζεστού νερού χρήσης και φωτισμού, με στόχο τη μείωση του ενεργειακού φορτίου και επομένως την αύξηση της απόδοσής του. Το πλήθος των αποδιδόμενων μονάδων καθορίζεται με βάση το ποσοστό βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου σχεδιασμού σε σχέση με το κτίριο αναφοράς και διαφέρει ανάλογα με την χρήση του κτιρίου. Για κτίρια σχολείων, οι διαθέσιμες μονάδες είναι 1 έως 16 για ποσοστά βελτίωσης 6% έως 42% αντίστοιχα· στο πλαίσιο της αξιολόγησης κτιρίων νοσοκομείων, σε ποσοστά 6% έως 50% αντιστοιχούν 3 έως 20 μονάδες, ενώ για τα υπόλοιπα κτίρια του τριτογενούς τομέα τα ίδια ποσοστά βελτίωσης αποδίδουν από 1 έως 18 μονάδες (ενδεικτικό στοιχείο για τη συμμετοχή αυτού του ζητήματος στη συνολική αξιολόγηση είναι ότι στην τελευταία περίπτωση οι διαθέσιμες μονάδες ολόκληρης της κατηγορίας «Ενέργεια και Ατμόσφαιρα» είναι 33). Η αξιολόγηση με την εφαρμογή της δεύτερης μεθόδου, πραγματοποιείται με βάση την ικανοποίηση ή μη καθορισμένων απαιτήσεων και κριτηρίων που αναγράφονται στην τεχνική οδηγία *ASHRAE 50% Advanced Energy Design Guide* για τις εξής παραμέτρους: αδιαφανή δομικά στοιχειά του κτιριακού κελύφους και διαφανή δομικά στοιχειά του κτιριακού κελύφους, εσωτερικός φωτισμός (φυσικός και τεχνητός φωτισμός), εξωτερικός φωτισμός

και συστήματα εξοπλισμού. Οι διαθέσιμες μονάδες για κτίρια του τριτογενούς τομέα είναι 5 (με εξαίρεση τα εμπορικά κτίρια – διαθέσιμες μονάδες: 6).

Πίνακας 3: Ζητήματα που συνθέτουν την κατηγορία «Ενέργεια και Ατμόσφαιρα» στο LEED.

Ζητήματα	Βασικός άξονας	Είδος κριτηρίων αξιολόγησης	Κανονιστικό πλαίσιο
Στοιχειώδης λειτουργικός έλεγχος και παραλαβή (Λ.Ε.Π.)	Ορισμός ομάδας συμβούλων για Λ.Ε.Π. και ανάπτυξη πλάνου διαχείρισης των λειτουργιών & των εργασιών συντήρησης των εγκαταστάσεων του κτιρίου	Περιγραφικά (απαιτήσεις και προδιαγραφές μιας ολοκληρωμένης διαδικασίας έλεγχου και παραλαβής)	– *ASHRAE Guideline 0-2005* – *ASHRAE Guideline 1.1-2007* – *(NIBS) Guideline 3-2012* – *ANSI/* – *ASHRAE/ IESNA Standard 90.1–2010* – *COMNET Modeling Guidelines and Procedures* – *USGBC-approved equivalent standard* – *ASHRAE 50% Advanced Energy Design Guide* – *Advanced Buildings™ Core Performance Guide* – *U.S. Department of Energy's Commercial Buildings Energy Consumption Survey (CBECS)* – *Montreal Protocol*
Ελάχιστη ενεργειακή απόδοση	Διασφάλιση ελάχιστων απαιτήσεων ενεργειακής απόδοσης σύμφωνα με κανονιστικά πρότυπα – αποφυγή εκτεταμένου περιβαλλοντικού και οικονομικού κόστους από την κατανάλωση ενέργειας	Μέθοδος 1: μέθοδος προσομοίωσης, εξασφάλιση ποσοστού βελτίωσης ενεργειακής απόδοσης Μέθοδοι 2 και 3: συμμόρφωση με απαιτήσεις κανονιστικών πλαισίων	
Μέτρηση ενέργειας στο κτίριο	Εγκατάσταση συστήματος παρακολούθησης & μέτρησης ενεργειακών καταναλώσεων	Περιγραφικά (απαιτήσεις του συστήματος παρακολούθησης)	
Βασική διαχείριση ψυκτικών μέσων	Αποφυγή χρήσης ψυκτικών μέσων με βάση τους χλωροφθοράνθρακες (CFCs)	Περιγραφικά (αποφυγή χρήσης ή σταδιακή αντικατάσταση ψυκτικών με βάση CFCs στα λειτουργικά συστήματα του κτιρίου)	
Βελτιωμένος Λ.Ε.Π.	Εφαρμογή βελτιωμένων προτάσεων στον Λ.Ε.Π. για την διασφάλιση της αποδοτικής λειτουργίας του κτιρίου	Περιγραφικά (απαιτήσεις μιας βελτιωμένης διαδικασίας Λ.Ε.Π.)	
Βελτιστοποίηση ενεργειακής απόδοσης	Βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου σχεδιασμού σε σύγκριση με το κτίριο αναφοράς – μείωση περιβαλλοντικού και οικονομικού κόστους από την κατανάλωση ενέργειας	Μέθοδος 1: μέθοδος προσομοίωσης, εκτίμηση ποσοστού βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης Μέθοδος 2: συμμόρφωση με απαιτήσεις κανονιστικών πλαισίων	
Βελτίωση του συστήματος παρακολούθησης ενέργειας	Εφαρμογή βελτιωμένων μεθόδων μέτρησης καταναλώσεων των διάφορων μορφών ενέργειας και εγκατάσταση μετρητών σε συστήματα σημαντικής κατανάλωσης	Περιγραφικά (προδιαγραφές βελτίωσης συστήματος παρακολούθησης)	
Ανταπόκριση στη ζήτηση	Προώθηση προγραμμάτων ζήτησης-ανταπόκρισης για καλύτερη παραγωγή και διανομή ενέργειας και μικρότερη παραγωγή εκπομπών GHG	Περιγραφικά (μείωση απαίτησης σε ηλεκτρική ενέργεια, αυτοματοποίηση λειτουργιών κ.ά. (υπάρχουν και ποσοτικά στοιχεία))	
Παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας	Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για μείωση οικονομικού & περιβαλλοντικού κόστους από χρήση ορυκτών καυσίμων	Ποσοτικά (εκτίμηση ποσοστού εξοικονόμησης από την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ))	

Πίνακας 3 (συνέχεια): Ζητήματα που συνθέτουν την κατηγορία «Ενέργεια και Ατμόσφαιρα» στο LEED.

Ζητήματα	Βασικός άξονας	Είδος κριτηρίων αξιολόγησης	Κανονιστικό πλαίσιο
Αποτελεσματική διαχείριση ψυκτικών μέσων	Χρήση ψυκτικών μέσων σε συστήματα θέρμανσης /ψύξης/αερισμού φιλικών προς το περιβάλλον	Περιγραφικά (ψυκτικά μέσα χαμηλών περιβαλλοντικών επιπτώσεων) ή ποσοτικά (εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων ψυκτικού μέσου)	*καλύπτονται από όσα αναφέρονται στο προηγούμενο τμήμα του Πίνακα 3*
Πράσινη ενέργεια	Χρήση «πράσινης ισχύος» για την κάλυψη λειτουργικών απαιτήσεων του κτιρίου	Ποσοτικά (ποσοστό συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης που παράγεται από ΑΠΕ)	

3.3. CASBEE

Στο CASBEE οι παράμετροι που σχετίζονται με την ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου αξιολογούνται στο πλαίσιο της κατηγορίας *LR1 «Ενέργεια»*. Οι σχετικές παράμετροι ταξινομούνται σε τέσσερα επί μέρους ζητήματα που αναγράφονται και περιγράφονται στον *Πίνακα 4* (το κανονιστικό πλαίσιο της αξιολόγησης είναι το: *Energy Conservation Law, 2013 (energy conservation standards)*).

Πίνακας 4: Παρουσίαση ζητημάτων που συνθέτουν την κατηγορία LR1 «Ενέργεια» στο CASBEE.

Ζητήματα[*3]	Βασικός άξονας	Είδος κριτηρίων αξιολόγησης
LR1.1 Θερμικά φορτία στην εξωτερική επιφάνεια	Μείωση θερμικού φορτίου στο κτίριο με χρήση ορθών τεχνικών (θερμομόνωση κτιριακού κελύφους, συστήματα σκίασης κ.ά.)	Μέθοδος 1: υπολογισμός ετήσιου θερμικού φορτίου μέσω του δείκτη BPI Μέθοδος 2: μέθοδος προσομοίωσης, υπολογισμός δείκτη BPIm
LR1.2 Αξιοποίηση καθαρής ενέργειας	Εφαρμογή τεχνικών αξιοποίησης «καθαρής» ενέργειας (χωρίς μετατροπή) για φυσικό αερισμό, φωτισμό, δροσισμό κ.ά.	Περιγραφικά και ποσοτικά (αναγνώριση και αξιολόγηση τεχνικών αξιοποίησης «καθαρής» ενέργειας στο κτίριο (π.χ. φωταγωγός, αίθριο, ηλιακή καμινάδα))
LR1.3 Αποδοτικότητα των λειτουργικών συστημάτων του κτιρίου	Αξιολόγηση ενεργειακής απόδοσης μέσω εκτίμησης της καταναλισκόμενης ενέργειας για τις λειτουργικές ανάγκες του κτιρίου	Μέθοδος 1: υπολογισμός δείκτη BEI Μέθοδος 2: μέθοδος προσομοίωσης, υπολογισμός δείκτη BEIm
LR1.4 Αποτελεσματική λειτουργία	Παρακολούθηση / καταγραφή ενεργειακών καταναλώσεων (μορφές & ποσότητες) και εφαρμογή προγραμμάτων διαχείρισης ενέργειας που διασφαλίζουν την αποδοτική λειτουργία των συστημάτων και την επίτευξη τιμών-στόχων για ετήσιες καταναλώσεις	Περιγραφικά (εξελιγμένα συστήματα καταγραφής και παρακολούθησης της καταναλισκόμενης ενέργειας, προδιαγραφές ενός ολοκληρωμένου προγράμματος διαχείρισης ενέργειας)

[*3]: σε κάθε ζήτημα αναφέρεται η κωδικοποίησή του όπως εμφανίζεται στο εγχειρίδιο της μεθόδου (*LR1.1*, κ.α.) [4]

Στο πλαίσιο του ζητήματος «Αποδοτικότητα των Λειτουργικών Συστημάτων του κτιρίου» (*LR1.3*), στο οποίο αντιστοιχίζεται σχετικό βάρος ίσο με 50% στη συνολική βαθμολογία του *LR1* (προκαθορισμένη-default τιμή στο [5], η οποία διαφοροποιείται για βιομηχανικά κτίρια), δίνεται η δυνατότητα εκτίμησης της ενεργειακής απόδοσης των λειτουργικών συστημάτων του κτιρίου με δύο εναλλακτικές μεθόδους.

Η πρώτη μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό της τιμής του δείκτη BEI (*Building Energy Index*) που εκφράζεται από τον λόγο της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας των ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων του κτιρίου σχεδιασμού προς την αντίστοιχη ενεργειακή κατανάλωση «αναφοράς», με τους υπολογισμούς να πραγματοποιούνται σύμφωνα με τα σχετικά πρότυπα του 2013 (*Energy Conservation Law, 2013 (energy conservation standards)*). Στον αριθμητή του κλάσματος εισάγονται οι καταναλώσεις πρωτογενούς ενέργειας του κτιρίου σχεδιασμού για θέρμανση, ψύξη, μηχανικό αερισμό, ζεστό νερό χρήσης, φωτισμό, κατακόρυφη μετακίνηση (π.χ. ανελκυστήρες), καθώς και για άλλα συστήματα, ενώ παράλληλα συνυπολογίζεται και η μείωση των καταναλώσεων λόγω ενεργειακά αποδοτικών εγκαταστάσεων (π.χ. εγκαταστάσεις παραγωγής ηλιακής ενέργειας). Αντίστοιχα, στον παρανομαστή εισάγονται οι καταναλώσεις αναφοράς πρωτογενούς ενέργειας των παραπάνω συστημάτων, οι οποίες παρέχονται από το κανονιστικό πλαίσιο *Energy Conservation Law, 2013*. Τιμές του δείκτη BEI μικρότερες ή ίσες με 0,7 αντιστοιχούν σε επίπεδο επίδοσης 5 (*level 5*), με το χαμηλότερο επίπεδο (*level 1*) να αναλογεί σε τιμές μεγαλύτερες ή ίσες με 1,10.

Η δεύτερη εναλλακτική μέθοδος βασίζεται στη χρήση συγκεκριμένης μεθοδολογικής προσέγγισης ("Model Building Method") κατά τον υπολογισμό της κατανάλωσης της πρωτογενούς ενέργειας με βάση τα σχετικά πρότυπα και είναι διαθέσιμη μόνο για κτίρια (πλην κατοικιών) με συνολικό εμβαδόν μικρότερο από 5000m^2. Στο πλαίσιο αυτής της μεθόδου προσδιορίζεται ο δείκτης BEIm (το m δηλώνει ότι ο δείκτης έχει υπολογιστεί με τη συγκεκριμένη μέθοδο υπολογισμού), διαιρώντας την τιμή σχεδιασμού με την τιμή «αναφοράς» (standard value), όπως αυτές προκύπτουν από τον προαναφερθέντα υπολογισμό. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην τιμή του δείκτη BEIm συνυπολογίζεται η μείωση των ενεργειακών καταναλώσεων που προκύπτουν μόνο από εγκαταστάσεις παραγωγής ηλιακής ενέργειας· η συνεισφορά άλλων, διαφορετικών, ενεργειακά αποδοτικών εγκαταστάσεων δεν μπορεί να εκτιμηθεί. Όταν χρησιμοποιείται αυτή η μέθοδος, ως μέγιστο επίπεδο επίδοσης καθορίζεται το 4 (*level 4*) και αντιστοιχεί σε τιμή του BEIm μικρότερη ή ίση με 0,9, ενώ σε τιμή μεγαλύτερη ή ίση με 1,05 αντιστοιχεί το *level 1*.

3.4. SBTool

Στον *Πίνακα 5* παρουσιάζονται τα κριτήρια του SBTool, τα οποία σχετίζονται άμεσα με την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου και ανήκουν στην περιβαλλοντική κατηγορία *Β*. «Ενέργεια και κατανάλωση πόρων» του εργαλείου. Σημειώνεται ότι στο SBTool η σύγκριση με το κτίριο / κατάσταση αναφοράς είναι ενσωματωμένη στη βαθμολογική του κλίμακα, υπό την έννοια ότι σε κάθε κριτήριο, όταν υπάρχουν σχετικοί κανονισμοί, ο βαθμός 0 αντιστοιχεί στην ελάχιστη αποδεκτή απόδοση του κτιρίου σε σχέση με αυτό το κριτήριο.

Πίνακας 5: Παρουσίαση κριτηρίων που σχετίζονται άμεσα με την κατανάλωση ενέργειας στο SBTool.

Κριτήρια	Βασικός άξονας	Είδος κριτηρίων αξιολόγησης
B1.3 Κατανάλωση ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές	Παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές	Ποσοτικά (υπολογισμός ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ με χρήση κατάλληλου, αποδεκτού λογισμικού)
B1.4 Κατανάλωση ενέργειας που προέρχεται από μη ανανεώσιμες πηγές	Μείωση ενεργειακής κατανάλωσης που προέρχεται από μη ανανεώσιμες πηγές	Ποσοτικά (εκτίμηση ενεργειακής κατανάλωσης για τις λειτουργικές ανάγκες του κτιρίου με χρήση κατάλληλου, αποδεκτού λογισμικού)
B2.1 Μέγιστη απαίτηση (απαίτηση αιχμής) ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία του κτιρίου	Μείωση της μέγιστης απαίτησης σε ηλεκτρική ενέργεια	Ποσοτικά (εκτίμηση μεγίστης μηνιαίας απαίτησης ηλεκτρικής ενέργειας (απαίτηση αιχμής) με χρήση κατάλληλου, αποδεκτού λογισμικού)

Συγκεκριμένα, στο κριτήριο *B1.3* αξιολογείται η ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και καταναλώνεται από το κτίριο (π.χ. από ανεμογεννήτριες ή φωτοβολταϊκά), η οποία εκφράζεται σε kWh/m^2/year και συγκρίνεται με τις επιτρεπτές τιμές που διαμορφώνουν την κλίμακα βαθμολόγησης, ώστε να αποδοθεί ο ανάλογος βαθμός. Οι επιτρεπτές τιμές λαμβάνονται από ισχύοντα εθνικά πρότυπα και οι ποσότητες αυτής της ενέργειας εκτιμώνται μέσω κάποιου αποδεκτού

λογισμικού προσομοίωσης. Με την ίδια μεθοδολογία αξιολογείται στο κριτήριο *B1.4* η παραγόμενη ενέργεια (kWh/m^2/year) από μη ανανεώσιμες πηγές. Τέλος, στο κριτήριο *B2.1* εκτιμάται η μέγιστη μηνιαία απαίτηση (απαίτηση αιχμής) ηλεκτρικής ισχύος (σε W/m^2) κυρίως σε περιόδους με μεγάλη επιβάρυνση (π.χ. κατανάλωση για κλιματισμό τους θερινούς μήνες), η οποία, ομοίως, συγκρίνεται με τις επιτρεπτές τιμές για την απονομή του ανάλογου βαθμού. Με δεδομένο ότι τόσο οι επιδόσεις που αντιστοιχούν στα επίπεδα της κλίμακας βαθμολόγησης, όσο και τα σχετικά βάρη που αναλογούν στα διάφορα κριτήρια είναι προσαρμόσιμα στις τοπικές προτεραιότητες και συνθήκες, δεν κρίνεται σκόπιμη η παράθεση συγκεκριμένων τιμών γι' αυτά τα μεγέθη στην παρούσα εργασία. Ως ενδεικτικό στοιχείο για την σημασία της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας στο πλαίσιο και αυτής της μεθόδου αναφέρεται ότι στα κριτήρια *B1.3* και *B1.4* η κλίμακα βαθμολόγησης κυμαίνεται από 3 έως 5 στην έκδοση που μελετήθηκε [6] (απαιτείται δηλαδή αυξημένη απόδοση). Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, ζητήματα που σχετίζονται με την ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων και με τα σχετικά λειτουργικά συστήματα περιλαμβάνονται και σε άλλες περιβαλλοντικές κατηγορίες κριτηρίων του SBTool (κατηγορία *C*. «Περιβαλλοντικά φορτία», με τα κριτήρια «Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από την πρωτογενή ενέργεια που χρησιμοποιείται» (*C1.3)* και «Εκπομπές αερίων που καταστρέφουν το όζον» (*C2.1)* και κατηγορία *E*. «Ποιότητα υπηρεσιών» με τα κριτήρια «Αποτελεσματικότητα του συστήματος διαχείρισης» (*E3.1*), «Δυνατότητα για μερική ρύθμιση λειτουργιών των συστημάτων» (*E3.2)*, «Λειτουργικότητα και αποτελεσματικότητα βασικών συστημάτων εγκατάστασης» (*E5.1*) και «Έγγραφα της κατασκευής» (*E5.6)*). Αυτά τα κριτήρια δεν αναλύονται σε μεγαλύτερο βάθος στην παρούσα εργασία λόγω του περιορισμένου διαθέσιμου χώρου και του ότι δεν εντάσσονται στην ενότητα κριτηρίων του εργαλείου που αναφέρεται ευθέως στην ενέργεια.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΑ ΣΧΟΛΙΑ

Σ' αυτή την εργασία μελετήθηκαν τέσσερα ευρέως αποδεκτά εργαλεία αξιολόγησης της περιβαλλοντικής απόδοσης των κτιρίων (εξετάστηκαν οι εκδοχές των εργαλείων για τα νέα κτίρια του τριτογενούς τομέα) ως προς τον τρόπο με τον οποίο παράμετροι που σχετίζονται με την ενεργειακή συμπεριφορά των κτιρίων εντάσσονται στη δομή τους και στη διαδικασία της αξιολόγησης που πραγματοποιούν. Από την ανάλυση που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες διαπιστώνονται ομοιότητες και διαφορές μεταξύ των εξεταζόμενων εργαλείων τόσο σε σχέση με γενικά χαρακτηριστικά της προσέγγισής της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων που υιοθετούν (π.χ. μεγάλη συμμετοχή των σχετικών παραμέτρων στη συνολική αξιολόγηση και συνυπολογισμός όχι μόνο καταναλώσεων αλλά και ζητημάτων που συνδέονται με την ορθή διαχείριση σε όλα τα εργαλεία, διαφοροποιήσεις στο είδος και το πλήθος των κριτηρίων που χρησιμοποιούνται κ.ά.), όσο και σε ειδικότερα ζητήματα (π.χ. κανονιστικά πλαίσια και πρότυπα, μεθοδολογικές προσεγγίσεις των απαιτούμενων υπολογισμών κ.ά.).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Κτιστάκη, Ευαγγ., και Σαββαστάκη-Σεβαστάκη, Δ., 2017, «Παράμετροι που σχετίζονται με την ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος και την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων σε μεθόδους / εργαλεία αξιολόγησης της περιβαλλοντικής απόδοσής τους», διπλωματική εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

[2] BRE, 2016, "BREEAM International New Construction 2016, technical manual SD233 1.0."

[3] U.S.G.B.C., 2016, "LEED v4 for BUILDING DESIGN AND CONSTRUCTION".- *https://new.usgbc.org/leed*

[4] Japan's Institute for Building Environment and Energy Conservation, 2014, "CASBEE for Building (New Construction), technical manual 2014 edition", IBEC.- *http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/downloadE.htm*

[5] CASBEE for Building (New Construction), assessment software 2014 edition, version: CASBEE-BD_NCe_2014(v2.1) (βιβλίο εργασίας excel)- *http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/downloadE.htm*

[6] SBTool_2015_Generic_Max_Dsn_20jun15. (βιβλία εργασίας excel)-*http://iisbe.org/node/140*

[7] LEED v4 for BUILDING DESIGN AND CONSTRUCTION, Project checklist. - *https://www.usgbc.org/resources/leed-v4-building-design-and-construction-checklist*

ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΠΙΔΟΣΕΩΝ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΚΟΙΝΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΙΩΣΙΜΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΔΟΜΗΜΕΝΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ (CESBA MED)

Κωνσταντίνος Α. Μπαλαράς*, Καλλιόπη Γ. Δρούτσα, Έλενα Γ. Δασκαλάκη, Σίμων Κοντογιαννίδης

Ομάδα Εξοικονόμησης Ενέργειας, Ινστιτούτο Ερευνών Περιβάλλοντος & Βιώσιμης Ανάπτυξης, Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών
e-mail: costas@noa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανακαίνιση κτιρίων προσφέρει σημαντικές ευκαιρίες για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, τη βελτίωση της ποιότητας εσωτερικού περιβάλλοντος των κτιρίων και γενικότερα της λειτουργικότητάς τους. Η θεώρηση συνδυασμένων παρεμβάσεων σε ομάδες κτιρίων επιτρέπει μια ολιστική και πιο ευέλικτη προσέγγιση από τις αντίστοιχες προσπάθειες σε επίπεδο κτιρίου. Στα πλαίσια του προγράμματος Ευρωπαϊκής Εδαφικής Συνεργασίας στη Μεσόγειο (Interreg MED) βρίσκεται σε εξέλιξη το έργο CESBA MED Βιώσιμες Πόλεις της Μεσογείου. Το έργο στοχεύει στον συνδυασμό δεικτών επίδοσης από υφιστάμενες μεθοδολογίες αξιολόγησης και περιβαλλοντικής πιστοποίησης σε μια νέα διαδικασία λήψης αποφάσεων που θα υποστηρίζει τους χρήστες στην αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας των δράσεων μεγάλης κλίμακας και θα διευκολύνει τις συνέργειες στην ανάπτυξη επιτυχημένων, οικονομικά αποδοτικών αναπτυξιακών σχεδίων ενεργειακής απόδοσης με την ανακαίνιση γειτονικών δημόσιων κτιρίων και βιώσιμης τοπικής αστικής ανάπτυξης. Μεταξύ των άλλων βασικών στόχων του έργου είναι το «Διαβατήριο MED» σε επίπεδο κτιρίου και γειτονιάς, η δημιουργία μιας εργαλειοθήκης με τοπικά προσαρμοσμένα συστήματα αξιολόγησης της αειφορίας και η προετοιμασία εκπαιδευτικού υλικού για διάφορους χρήστες. Η μεθοδολογία περιλαμβάνει τις βασικές ενότητες με τους κατάλληλους δείκτες μέτρησης και καταγραφής επιδόσεων, αποδοτικότητας και γενικότερα βιώσιμης ανάπτυξης όπως τις αστικές υποδομές, την ενέργεια, το περιβάλλον, τους φυσικούς πόρους, την οικονομία, τις κοινωνικο-πολιτισμικές πτυχές, το κόστος και την οικονομία. Στην εργασία γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση 14 υφιστάμενων μεθόδων και συστημάτων περιβαλλοντικής πιστοποίησης που χρησιμοποιούν 216 δείκτες και μια πρώτη παρουσίαση της δομής του CESBA MED, της μεθοδολογίας, των προτεινόμενων βασικών δεικτών και της προσέγγισης για την ανάπτυξη των τοπικών εργαλείων.

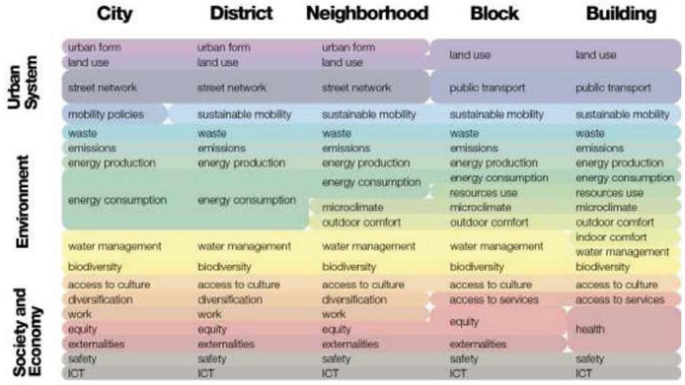
Λέξεις Κλειδιά: CESBA MED Βιώσιμες Πόλεις, Δείκτες επιδόσεων, Διαδικασία λήψης αποφάσεων, Αξιολόγηση αειφορίας, Ανακαινίσεις δημόσιων κτιρίων, Βιώσιμη τοπική αστική ανάπτυξη

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο τομέας των κτιρίων είναι από τις βασικότερες καταβόθρες φυσικών πόρων στην Ευρώπη και με σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, καταναλώνοντας περίπου 40% της τελικής ενέργειας, τις μισές πρώτες ύλες, το ένα τρίτο της κατανάλωσης νερού και συμβάλει στο ένα τρίτο της παραγωγής αποβλήτων. Το δομημένο περιβάλλον αποτελεί βασικό στόχο των πολιτικών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την κυκλική οικονομία δηλαδή ενός συστήματος που ελαχιστοποιεί την κατανάλωση πόρων και ενέργειας. Ήδη, με την εφαρμογή της Ευρωπαϊκής Οδηγίας για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων (EPBD 2010/31/EC) έχει δοθεί έμφαση στην ολιστική αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς στη διάρκεια ολόκληρου του κύκλου ζωής των κτιρίων.

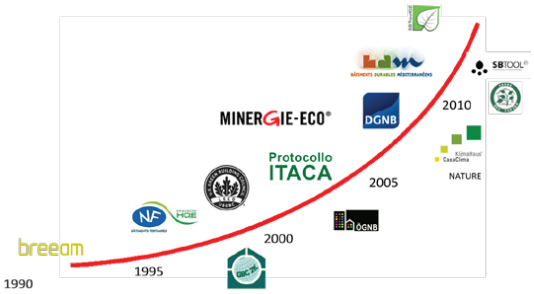
Επιπλέον, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή πρόσφατα δημοσιοποίησε την πρότασή της για ένα κοινό ευρωπαϊκό πλαίσιο δεικτών επίδοσης για την αξιολόγηση και τη βελτίωση της αειφορίας των κτιρίων – Level(s) [1] στα πλαίσια εφαρμογής της απόφασης ΕΕ COM (2014) 445. Το Level(s) είναι ένα εθελοντικό πλαίσιο αναφοράς που αναπτύχθηκε με βάση τα υπάρχοντα πρότυπα, παρέχοντας μια κοινή ευρωπαϊκή προσέγγιση για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιδόσεων στο δομημένο περιβάλλον. Κάθε δείκτης συνδέει επιμέρους χαρακτηριστικά και επιπτώσεις του κτιρίου με τις προτεραιότητες της αειφορίας, διευκολύνοντας τους χρήστες στην θεώρηση βασικών εννοιών και δεικτών σε επίπεδο κτιρίου. Στην πιλοτική φάση, η μεθοδολογία αναφέρεται σε κτίρια κατοικίας και γραφείων.

Ειδικότερα, η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων αποτελεί βασικό άξονα της ευρωπαϊκής στρατηγικής για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κτιρίων. Ωστόσο, τα συνήθη σχέδια ενεργειακής απόδοσης δεν εκμεταλλεύονται πλήρως το μεγαλύτερο δυναμικό που προκύπτει εξετάζοντας πιθανές συνέργειες για μεγαλύτερα σύνολα και ομάδες κτιρίων σε αστική κλίμακα. Η εφαρμογή μέτρων μεγάλης κλίμακας για την ενεργειακή απόδοση σε επίπεδο πόλης, συνοικίας, γειτονιάς ή οικοδομικών τετραγώνων (π.χ. τηλεθέρμανση και τηλεψύξη, φωτοβολταϊκά και ηλιακές θερμικές εγκαταστάσεις) έχει αποδείξει ότι η κλίμακα κτιρίου δεν αποτελεί βέλτιστη προσέγγιση για την επίτευξη σημαντικών και οικονομικά αποδοτικών λύσεων. Από την άλλη πλευρά, οι διαδικασίες λήψης αποφάσεων για το σχεδιασμό και την αξιολόγηση μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας στα πλαίσια ανακαινιστικών παρεμβάσεων ή νέου σχεδιασμού, είναι πιο πολύπλοκες σε μεγαλύτερες κλίμακες. Ο βαθμός πολυπλοκότητας αυξάνεται ακόμη περισσότερο αν λάβουμε υπόψη τις διάφορες άλλες πτυχές της αειφορίας που δυνητικά μπορούν να εξεταστούν (Εικόνα 1).



Εικόνα 1: Θέματα βιωσιμότητας σε διαφορετικές κλίμακες [2].

Από το 1990 έχουν αναπτυχθεί διάφορα συστήματα περιβαλλοντικής πιστοποίησης κτιρίων (π.χ. BREEAM, LEED) σε διάφορες χώρες (Εικόνα 2). Οι βασικές κατηγορίες που συνήθως περιλαμβάνονται είναι η διαχείριση – αειφορία για την επιλογή της θέσης του κτιρίου και τη χρήση γης, η ενεργειακή αποδοτικότητα του κτιρίου, η ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος, η διαχείριση νερού και αποβλήτων, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις (ρύπανση), η χρήση υλικών και πόρων, η προσβασιμότητα (μεταφορές) στο κτίριο, οι οικονομικές παράμετροι, η καινοτομία της κατασκευής κ.α. Εκτιμάται ότι στην Ευρώπη χρησιμοποιούνται περισσότερα από 60 συστήματα.



Εικόνα 2: Εξέλιξη αντιπροσωπευτικών συστημάτων και μεθοδολογιών [Πηγή: A. Moro, iiSBE Italia].

Οι μεθοδολογίες πολλαπλών κριτηρίων συναξιολογούν διάφορες παραμέτρους, προσδιορίζουν ελάχιστες προδιαγραφές και απαιτήσεις, και αποδίδουν μονάδες με τη χρήση συντελεστών βαρύτητας σε επιμέρους κριτήρια και δείκτες ανά κατηγορία ώστε να προκύψει μια συνολική κατάταξη που εκφράζεται με μια βαθμολογία ή άλλη σήμανση (π.χ. πιστοποιημένο/καλό/πολύ καλό/άριστο/εξαιρετικό κατά BREEAM, πιστοποιημένο/ασημένιο/χρυσό/πλατινένιο κατά LEED, ή χάλκινο/ασημένιο/χρυσό κατά DGNB κ.α.).

Όλες οι μεθοδολογίες και τα συστήματα περιλαμβάνουν διάφορους δείκτες επίδοσης που χρησιμοποιούνται για να ποσοτικοποιήσουν και να καθορίσουν πόσο καλά επιτυγχάνονται οι στόχοι για επιμέρους κριτήρια στις διάφορες κατηγορίες που αφορούν τις γενικές ενότητες αειφορίας που λαμβάνονται υπόψη. Οι δείκτες πρέπει να παρέχουν ένα απλό και αξιόπιστο μέσο για τη μέτρηση ώστε να επιτρέπουν τον χαρακτηρισμό της επίδοσης ενός κτιρίου ή μιας περιοχής σε σχέση με τα επιμέρους κριτήρια. Επίσης διευκολύνουν την συγκριτική αξιολόγηση και τη λήψη αποφάσεων για το κατά πόσο πληρούνται συγκεκριμένες απαιτήσεις ή κατά πόσο υπάρχει συμμόρφωση με τους κανονισμούς, ή άλλα πιθανά όρια και καλές πρακτικές. Υπάρχουν πολλοί πιθανοί δείκτες που χρησιμοποιούνται σε επιμέρους στάδια της διαδικασίας αξιολόγησης οι οποίοι μπορούν να εκφραστούν με

- ποσοτικές παραμέτρους των οποίων οι αριθμητικές τιμές προέρχονται από μέτρηση ή υπολογισμό και μπορούν να εκφραστούν με κατάλληλες μονάδες που συνήθως κανονικοποιούνται, για παράδειγμα, η κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα επιφανείας δαπέδου του κτιρίου (kWh/m^2), έτσι ώστε να είναι δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση της ενεργειακής αποδοτικότητας διαφορετικών κτιρίων, η ημερήσια κατανάλωση νερού ανά κάτοικο (lt/άτομο.ημέρα) κ.α., ή πηλίκα και ποσοστά για αδιάστατες παραμέτρους, για παράδειγμα, το ποσοστό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που καλύπτει τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ή θερμότητας (%), το ποσοστό αποβλήτων που ανακυκλώνεται (%), το ποσοστό κατοίκων που χρησιμοποιεί τα μαζικά μέσα μεταφοράς για τις μετακινήσεις του (%) κ.α.
- ποιοτικές παραμέτρους που εκφράζουν την επίδοση σε σχέση με κάποιο σενάριο αναφοράς, για παράδειγμα, η κακή/μέτρια/καλή υποκειμενική εκτίμηση της ασφάλειας των πολιτών σε δημόσιους χώρους όπως καθορίζεται από ένα δείγμα πολιτών, η μικρή/μέτρια/μεγάλη αλλαγή της φυτικής ή ζωικής βιοποικιλότητας της περιοχής τα τελευταία χρόνια, η μικρή/μέτρια/μεγάλη φωτορύπανση που γίνεται αντιληπτή εξαιτίας του εξωτερικού δημόσιου φωτισμού κ.α.

Οι απόψεις ποικίλλουν ως προς το ποιος είναι ο πιο σημαντικός δείκτης επίδοσης, αφού αυτό εξαρτάται από τις προτεραιότητες της εφαρμογής και του χρήστη. Προφανώς, μπορούν να επιλεγούν διαφορετικοί δείκτες ανάλογα με τους στόχους των διαφορετικών συστημάτων, τις διαφορετικές θεματικές ενότητες, τις κατηγορίες και τα κριτήρια αξιολόγησης που λαμβάνονται υπόψη προκειμένου να υποστηρίξουν τη διαδικασία που προβλέπει κάθε μεθοδολογία. Από την άλλη πλευρά, η ύπαρξη διαφορετικών συστημάτων αξιολόγησης είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα, προσφέροντας ευελιξία στην επιλογή της πλέον κατάλληλης μεθοδολογίας που ικανοποιεί τις απαιτήσεις του χρήστη, που μπορεί να γίνει με βάση με την αναγνωρισιμότητά τους στην αγορά, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος εφαρμογής τους, την πολυπλοκότητά τους, τη διαθεσιμότητα δεδομένων κ.α. Όμως η διαφορετική σήμανση ή βαθμολόγηση δεν επιτρέπει την άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφόρων συστημάτων, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε σύγχυση.

Αναγνωρίζοντας το πρόβλημα, έχουν ξεκινήσει διάφορες προσπάθειες εναρμόνισης των δεικτών περιβαλλοντικών επιδόσεων. Για παράδειγμα, στα πλαίσια συνεργασίας των μεγάλων εμπορικών

συστημάτων αξιολόγησης κτιρίων (π.χ. BREEAM, HQE, DGNB, SB Tool, LEED) δημιουργήθηκε μια συμμαχία γνωστή ως SBA - Sustainable Building Alliance (www.sballiance.org) με σκοπό την ανάπτυξη ενός εναρμονισμένου πλαισίου κοινών μετρήσεων που επικεντρώνονται σε τέσσερις δείκτες ανάλυσης κύκλου ζωής: κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας από συμβατικές πηγές, εκπομπές CO_2, κατανάλωση νερού και παραγωγή αποβλήτων (καθώς και μέτρα για την προστασία του περιβάλλοντος), θερμική άνεση και ποιότητα εσωτερικού αέρα.

Προς την κατεύθυνση της ενοποίησης κινείται και η ευρωπαϊκή προσπάθεια στα πλαίσια του κοινού ευρωπαϊκού πλαισίου δεικτών επίδοσης Level(s) [1], ορίζοντας έξι θεματικές ενότητες με διάφορους δείκτες. Για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου για όλο τον κύκλο ζωής του κτιρίου, η ανάλυση βασίζεται στην κατανάλωση ενέργειας και το δυναμικό συνεισφοράς στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Για τις πρώτες ύλες και τον κύκλο ζωής των υλικών απαιτείται ο κατάλογος ποσοτήτων των υλικών, η διάρκεια ζωής τους και τα δομικά απόβλητα που παράγονται από τις φάσεις κατασκευής, επισκευής και κατεδάφισης. Η αποδοτική χρήση των υδάτινων πόρων βασίζεται στην κατανάλωση νερού. Η αξιολόγηση της υγιεινής και των συνθηκών άνεσης στους εσωτερικούς χώρους βασίζεται στην ποιότητα αέρα και στον χρόνο εκτός θερμικής άνεσης. Η προσαρμοστικότητα και η ανθεκτικότητα στην κλιματική αλλαγή πρέπει να αξιολογείται με υπολογισμούς για τον κύκλο ζωής του κτιρίου, με διαφορετικά σενάρια μελλοντικών κλιματικών συνθηκών.

Επίσης, η διεθνής πρωτοβουλία iiSBE - International Initiative for a Sustainable Built Environment (www.iisbe.org) για ένα βιώσιμο δομημένο περιβάλλον δραστηριοποιείται πάρα πολλά χρόνια στην προώθηση και υιοθέτηση πολιτικών, μεθόδων και εργαλείων για την επιτάχυνση της μετάβασης προς ένα παγκόσμιο βιώσιμο δομημένο περιβάλλον. Στα πλαίσια του iiSBE έχει αναπτυχθεί ένα διεθνές δίκτυο παραρτημάτων (σε Αυστρία, Ισπανία, Ιταλία, Καναδά, Μάλτα, Νότια Κορέα, Πορτογαλία, Ταϊβάν, Τσεχία), διαφόρων ομάδων και επαγγελματιών (μεταξύ των οποίων στην Ελλάδα με το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης) που υποστηρίζουν τις κοινές δράσεις (πχ ενημέρωσης και διοργάνωσης συνεδρίων). Ένα από τα σημαντικότερα αποτελέσματα αυτής της διεθνούς συνεργασίας είναι το εργαλείο SBTool για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίδοσης των κτιρίων. Το γενικό πλαίσιο της μεθοδολογίας προσφέρει τη δυνατότητα προσαρμογής του εργαλείου σε ένα τοπικό σύστημα αξιολόγησης.

Μια νέα σημαντική συλλογική ευρωπαϊκή κίνηση που εστιάζει στα δημόσια συστήματα αξιολόγησης, είναι το δίκτυο CESBA - Common European Sustainable Built Environment Assessment (www.cesba.eu). Το CESBA έχει ως στόχο την εναρμόνιση των διαδικασιών και εργαλείων αξιολόγησης της αειφορίας του δομημένου περιβάλλοντος στα πλαίσια συνεργειών διαφόρων ευρωπαϊκών προγραμμάτων και άλλων πρωτοβουλιών, υπό την καθοδήγηση δημόσιων και τοπικών αρχών. Με τον τρόπο αυτό κεφαλαιοποιούνται τα αποτελέσματα προγενέστερων και εν εξελίξει ευρωπαϊκών προγραμμάτων, διευκολύνεται η ένταξή τους σε δημόσιες και τοπικές πολιτικές, ενισχύονται οι συνέργειες μεταξύ των τοπικών φορέων ακολουθώντας ένα κοινό σύστημα αξιολόγησης που θα προσφέρει συγκρίσιμα αποτελέσματα και τη δυνατότητα εντοπισμού των ευκαιριών συνεργασίας.

Οι βασικοί δείκτες επιδόσεων που αποτελούν τη βάση για την αξιολόγηση των κτιρίων στα πλαίσια της φιλοσοφίας CESBA περιλαμβάνουν την: κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, εκπομπές CO_2, επαναχρησιμοποιούμενα / ανακυκλωμένα υλικά, κατανάλωση νερού, στερεά απόβλητα, κόστος κύκλου ζωής, υγεία & ευεξία (ποιότητα εσωτερικού αέρα και θερμική άνεση), παρακολούθηση και βελτιστοποίηση της λειτουργίας των κτιρίων. Απώτερος στόχος της κίνησης CESBA είναι η εναρμόνιση των Ευρωπαϊκών μεθοδολογιών αξιολόγησης της αειφορίας του αστικού περιβάλλοντος, που αναμένεται ότι θα διευκολύνει την υιοθέτηση των συστημάτων αξιολόγησης και δυνητικά την αύξηση του αριθμού των πιστοποιημένων κτιρίων και αστικών περιοχών.

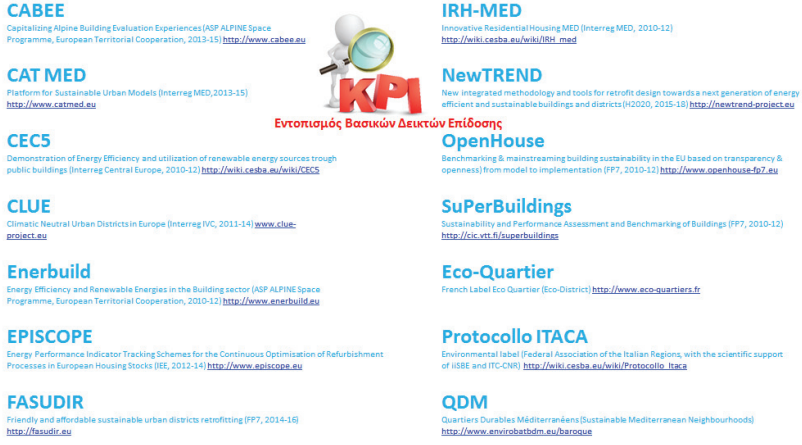
Από τα νέα προγράμματα που έχουν ενταχθεί στην κίνηση CESBA είναι το έργο CESBA MED Βιώσιμες Πόλεις της Μεσογείου που έχει σαν στόχο την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος αξιολόγησης πολλαπλής κλίμακας (Αστικό περιβάλλον-Γειτονιά & Κτίριο) για την υποστήριξη των διαδικασιών λήψης αποφάσεων. Το σύστημα αξιολόγησης CESBA MED σκοπεύει να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα και τον αντίκτυπο των πολιτικών, των σχεδίων δράσης και των δραστηριοτήτων σχεδιασμού (νέων ή υφιστάμενων) κτιρίων και αστικής ανάπλασης, στα πλαίσια της αειφόρου ανάπτυξης. Η προσέγγιση του CESBA MED ξεκίνησε με την καταγραφή όλων των δεικτών επίδοσης που έχουν προταθεί και χρησιμοποιούνται από υφιστάμενες μεθοδολογίες ευρωπαϊκών προγραμμάτων και δημόσιων συστημάτων αξιολόγησης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην ενότητα 2. Στη συνέχεια, γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση της δομής της μεθόδου CESBA MED και ανασκόπηση των διαφόρων παραδοτέων του προγράμματος.

2. ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΕΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΕΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Ένας μεγάλος αριθμός δεικτών επίδοσης έχει ήδη οριστεί και χρησιμοποιείται από διάφορες μεθοδολογίες και συστήματα που έχουν αναπτυχθεί στα πλαίσια Ευρωπαϊκών προγραμμάτων και συστημάτων αξιολόγησης για την δημόσια διοίκηση. Ως πρώτο βήμα στα πλαίσια του CESBA MED, καταγράφηκαν και ομαδοποιήθηκαν οι υφιστάμενοι δείκτες επίδοσης από 14 επιλεγμένες μεθοδολογίες και συστήματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 3 με αλφαβητική σειρά. Συνολικά προέκυψαν 216 δείκτες που καλύπτουν διάφορες κατηγορίες και βασικές ενότητες που θεωρούνται πυλώνες της αειφόρου ανάπτυξης. Σκοπός ήταν να προετοιμαστεί ένας αρχικός κατάλογος με τους υφιστάμενους δείκτες, οι οποίοι στη συνέχεια θα αξιολογηθούν για να επιλεγούν αυτοί που θεωρούνται οι πλέον δημοφιλείς, πρακτικοί, αξιόπιστοι και επαρκείς, καλύπτοντας τους συναφείς στόχους του CESBA MED. Για κάθε δείκτη έγινε αναλυτική παρουσίαση [3] που περιλαμβάνει την

- Σύντομη παρουσίαση των προγραμμάτων ή των εργαλείων και των επιμέρους στόχων τους,
- Τυποποιημένη παρουσίαση του κάθε δείκτη (πχ όνομα, μονάδες, συσχέτιση με τις επιμέρους θεματικές ενότητες, κατηγορίες, κριτήρια), σύντομη περιγραφή του αντικειμένου του, την κλίμακα αναφοράς (κτίριο, αστική-γειτονιά, ή και τα δυο) και τον τύπος των απαιτούμενων υπολογισμών για τον προσδιορισμό κάθε δείκτη (πχ Βασικοί - απλοί υπολογισμοί που γίνονται χρησιμοποιώντας τιμές από τη βιβλιογραφία και μέσους όρους αναφοράς, Τυποποιημένοι υπολογισμοί που βασίζονται σε πρότυπα ή απλά εργαλεία ή απλές μετρήσεις, Σύνθετοι υπολογισμοί που απαιτούν την χρήση δυναμικών προσομοιώσεων).

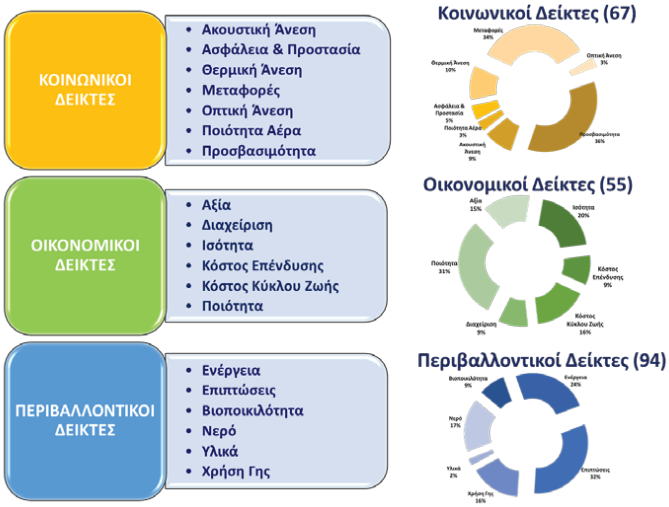
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά των δεικτών επίδοσης που προέκυψαν από την ανάλυση των διαθέσιμων πληροφοριών.



Εικόνα 3: Υφιστάμενες μεθοδολογίες και συστήματα με αλφαβητική σειρά.

2.1. Δείκτες Επίδοσης

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης των διαθέσιμων πληροφοριών αναδεικνύουν χρήσιμες και πρακτικές πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των δεικτών επίδοσης που χρησιμοποιούνται από τα υφιστάμενα διακρατικά προγράμματα και συστήματα. Στόχος ήταν να οργανωθούν οι βασικοί πυλώνες των οικονομικών, των περιβαλλοντικών και των κοινωνικών δεικτών (Εικόνα 4), ώστε να αναδειχθούν τα πιο δημοφιλή κριτήρια και να εντοπιστούν οι κοινές τάσεις για τις προσεγγίσεις υπολογισμού, διαφοροποιώντας όπου χρειάζεται τις δυο κλίμακες για το Κτίριο και την Αστική περιοχή-Γειτονιά. Το τελικό αποτέλεσμα αποτελεί το υπερσύνολο των δεικτών επίδοσης, από τους οποίους τελικά αντλούνται οι συγκεκριμένοι Βασικοί (Κύριοι) Δείκτες Επίδοσης (KPIs – Key Performance Indicators) που θα αποτελούν την ραχοκοκαλιά του συστήματος αξιολόγησης CESBA MED, σε συνδυασμό με κάποιους άλλους δείκτες ως συνιστώμενους και τους υπόλοιπους ως προαιρετικούς.



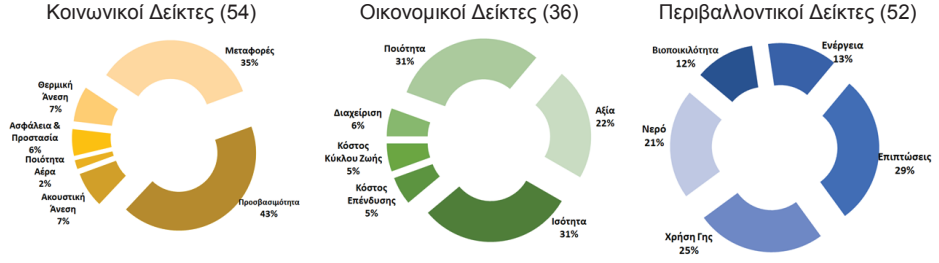
Εικόνα 4: Ανασκόπηση βασικών κατηγοριών και κριτηρίων στις υφιστάμενες μεθοδολογίες και συστήματα που αξιολογήθηκαν, με αλφαβητική σειρά.

Η κατανομή των δεικτών βάσει της χωρικής κάλυψης περιλαμβάνει (Εικόνα 5):

- 24 δείκτες (11% του συνόλου) μόνο σε κλίμακα κτιρίου (Εικόνα 5α)
- 142 δείκτες (66% του συνόλου) μόνο σε αστική κλίμακα γειτονιάς (Εικόνα 5β)
- 50 κοινοί δείκτες (23% του συνόλου) που καλύπτουν και τις δύο κλίμακες, κτιρίου και γειτονιάς (Εικόνα 5γ).



(α) Κλίμακα Κτιρίου (24 δείκτες)



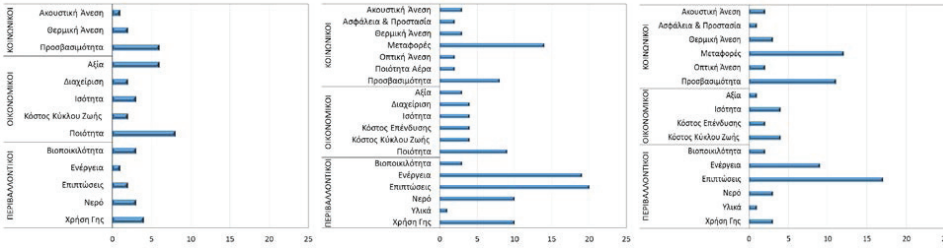
(β) Κλίμακα Αστική-Γειτονιάς (142 δείκτες)



(γ) Κλίμακα Κτιρίου & Αστική-Γειτονιάς (50 δείκτες)

Εικόνα 5: Κατανομή δεικτών στις επιμέρους κατηγορίες και κριτήρια, ανά χωρική κάλυψη.

Αναφορικά με τον τρόπο υπολογισμού των δεικτών, γίνονται απλοί υπολογισμοί για 21 οικονομικούς δείκτες, 13 περιβαλλοντικούς και 9 κοινωνικούς δείκτες (Σχήμα 6α). Τυποποιημένοι υπολογισμοί πραγματοποιούνται για 28 οικονομικούς, 63 περιβαλλοντικούς και 34 κοινωνικούς δείκτες (Σχήμα 6β), ενώ αναλυτικοί υπολογισμοί για 11, 35 και 31 δείκτες, αντίστοιχα (Εικόνα 6γ). Μερικοί δείκτες υπολογίζονται με περισσότερους από έναν τρόπους.



(α) Απλοί υπολογισμοί *(β) Τυποποιημένοι υπολογισμοί* *(γ) Σύνθετοι υπολογισμοί*

Εικόνα 6: Κατανομή του τρόπου υπολογισμού των δεικτών στις επιμέρους κατηγορίες και κριτήρια.

Από πρακτική άποψη, πρέπει να επιλεγεί ένας εύχρηστος αριθμός δεικτών οι οποίοι θα υποστηρίζουν τις διαφορετικές ανάγκες και προτεραιότητες των δημόσιων αρχών, των υπευθύνων για τη χάραξη πολιτικής και άλλων δημόσιων και ιδιωτικών τεχνικών φορέων (π.χ. πολεοδόμοι, επενδυτές, μικρομεσαίες επιχειρήσεις, διαχειριστές επιχορηγήσεων, ιδιοκτήτες, κατασκευαστικές εταιρείες), που στοχεύουν στη βελτίωση των κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών επιδόσεων των κτιρίων και του δομημένου περιβάλλοντος. Η σαφήνεια των δεικτών είναι κρίσιμη, προκειμένου να μπορούν να χρησιμοποιηθούν με ευκολία και να διευκολύνουν τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων, χωρίς να απαιτείται διεξοδική κατάρτιση για την υιοθέτησή τους. Αυτή είναι η τάση και η τρέχουσα πρακτική που ακολουθείται σε διάφορες μεθοδολογίες και εργαλεία, όπως το ENERBUILD (www.enerbuild.eu) και το NewTREND (http://newtrend-project.eu) που περιλαμβάνουν 16 KPIs, ενώ το FADUSIR (http://fasudir.eu) περιλαμβάνει 20 KPIs για να καλύψουν τις θεματικές ενότητες και τα κριτήρια αξιολόγησης που λαμβάνουν υπόψη.

Επιπλέον, οι βασικοί δείκτες πρέπει να βασίζονται σε αξιόπιστους υπολογισμούς που παρέχουν σαφή αποτελέσματα, τα οποία μπορούν εύκολα να δημοσιοποιούνται και να γίνονται κατανοητά από τους ενδιαφερόμενους. Η απλότητα και η επαναληψιμότητα δεν πρέπει να αντιμάχονται την ανάγκη για ικανοποιητική ακρίβεια των υπολογισμών. Οι αυξημένες απαιτήσεις που ενδέχεται να προκύψουν από χρονοβόρες διαδικασίες για τη συλλογή των δεδομένων εισόδου για τους υπολογισμούς των δεικτών ή προϋποθέτουν πολύπλοκες προσομοιώσεις, μπορεί να επιβαρύνουν άσκοπα τις διαδικασίες και ενδέχεται να περιορίσουν την εφαρμογή τους.

3. Η ΜΕΘΟΔΟΣ CESBA MED

Το σύστημα αξιολόγησης CESBA MED βασίζεται σε ένα γενικό πλαίσιο (CESBA MED GF Generic Framework) και σε τοπικά προσαρμοσμένα εργαλεία αξιολόγησης της αειφορίας μιας γειτονιάς (CESBA MED SNTools Sustainable Neighborhoods) που αντανακλούν τις συγκεκριμένες προτεραιότητες και πρακτικές αειφορίας μιας περιοχής. Το γενικό πλαίσιο λειτουργεί ως μια κοινή διεθνής γλώσσα. Η μεθοδολογία αναφοράς που υιοθετήθηκε είναι το εργαλείο για βιώσιμα κτίρια (SBTool) του iiSBE που δίνει τη δυνατότητα συνολικής προσαρμογής στις τοπικές συνθήκες. Το εργαλείο αξιολόγησης SBTool, που αναπτύχθηκε αρχικά για την κλίμακα κτιρίου, προσαρμόστηκε και για εφαρμογές σε αστική κλίμακα (πχ μιας γειτονιάς). Η πολυπαραμετρική μεθοδολογία αξιολόγησης CEBA MED συνδέει τα αποτελέσματα της αξιολόγησης σε κλίμακα κτιρίου και γειτονιάς. Η έννοια της γειτονιάς μπορεί να περιλαμβάνει την μικρή αστική κλίμακα (πχ ένα συγκρότημα κτιρίων που περιλαμβάνει 5 - 15 κτίρια σε συνεχή δόμηση ή γύρω από ένα κοινό εσωτερικό κοινόχρηστο χώρο) ή την μεγάλη αστική κλίμακα που καλύπτει μια έκταση 200-400 m την οποία μπορεί να διασχίσει πεζός σε 10-15 λεπτά και περιλαμβάνει 200-1500 κατοίκους.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι πλήρως συμβατά επειδή βασίζονται στην ίδια κοινή μεθοδολογία και μπορούν να ερμηνευθούν με παρόμοιο τρόπο. Η τελική βαθμολογία αντιπροσωπεύει πόσο καλή είναι η επίδοση μιας αστικής περιοχής ή ενός κτιρίου σε σχέση με τις ελάχιστες αποδεκτές επιδόσεις της περιοχής. Η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων αξιολόγησης διασφαλίζεται από το Διαβατήριο CESBA MED και τους βασικούς δείκτες (KPIs).

Οι δείκτες επίδοσης CESBA MED σε αστική κλίμακα θα επιτρέπουν την εκτίμηση της αειφορίας για:

- Ανάπλαση υφιστάμενων περιοχών, λαμβάνοντας υπόψη την πραγματική εκτίμηση των επιδόσεων προκειμένου να αξιολογηθούν την δεδομένη χρονική στιγμή τα χαρακτηριστικά της περιοχής έτσι ώστε να αναδειχθούν οι κρίσιμες πτυχές της αειφορίας που δεν ικανοποιούνται, στη συνέχεια να εκτιμηθούν οι επιδόσεις με την εφαρμογή διαφορετικών σεναρίων αναβάθμισης προκειμένου να αναδειχτεί το βέλτιστο σενάριο, και τελικά να είναι εφικτή η παρακολούθηση της εξέλιξης των παρεμβάσεων που έγιναν προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητά τους για την ανάπλαση των αστικών περιοχών και την επίτευξη των στόχων για τις επιμέρους και συνολικές επιδόσεις.
- Ανάπτυξη νέων περιοχών, λαμβάνοντας υπόψη την δυνητική αποτελεσματικότητα εναλλακτικών σεναρίων σχεδιασμού, προκειμένου να προσδιοριστούν οι πιο αποδοτικές και βιώσιμες επιλογές, και μελλοντικά να διευκολυνθεί η παρακολούθηση της εξέλιξης των νέων περιοχών και η επίτευξη των επιμέρους και συνολικών στόχων.

3.1. Δομή Μεθόδου

Η γενική προσέγγιση είναι δομημένη ως εξής (Εικόνα 7):

- Θεματικές ενότητες: περιλαμβάνονται οι γενικές ενότητες που θεωρούνται σημαντικές για την αξιολόγηση της αειφορίας ενός κτιρίου ή μιας αστικής περιοχής. Για παράδειγμα, στην κλίμακα Γειτονιάς: Αστικές Υποδομές, Οικονομία, Ενέργεια, Εκπομπές, Μη-Ανανεώσιμοι Φυσικοί Πόροι, Περιβάλλον, Κοινωνικές Πτυχές.
- Κατηγορίες: αφορούν συγκεκριμένες πτυχές της κάθε ενότητας. Για παράδειγμα, στις 7 θεματικές ενότητες για την κλίμακα Γειτονιάς περιλαμβάνονται 22 κατηγορίες. Συγκεκριμένα, η ενότητα «Ενέργεια» περιλαμβάνει 2 κατηγορίες: Συμβατικές Πηγές Ενέργειας, Ανανεώσιμες & Καθαρές Πηγές Ενέργειας.
- Κριτήρια: αναλύουν τις συγκεκριμένες πτυχές της κάθε κατηγορίας. Αντιπροσωπεύουν τις βασικές καταχωρήσεις αξιολόγησης που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό κάθε κτιρίου ή αστικής περιοχής από την αρχή της διαδικασίας αξιολόγησης. Για παράδειγμα, η κατηγορία «ΑΠΕ» περιλαμβάνει 5 κριτήρια: Ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ σε δημόσιες ή ιδιωτικές εκτάσεις, Ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ που εξάγεται από την περιοχή, Συνολική χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στην περιοχή.
- Δείκτες: κάθε κριτήριο περιγράφεται από ένα δείκτη που επιτρέπει την ποσοτικοποίηση των επιδόσεων του κτιρίου ή της περιοχής. Η μεθοδολογία υπολογισμού του κάθε δείκτη επιτρέπει τον χαρακτηρισμό (όχι απαραίτητα με αριθμητική τιμή) της επίδοσης του κτιρίου ή της περιοχής σε σχέση με το αντίστοιχο κριτήριο. Για παράδειγμα, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (MWh/έτος).



Εικόνα 7: Δομή γενικού πλαισίου (κλίμακα γειτονιάς).

Όπως φαίνεται και στο ένθετο διάγραμμα στην Εικόνα 7, για κάθε θεματική ενότητα υπάρχουν διάφορες κατηγορίες, οι οποίες αναλύονται σε επιμέρους κριτήρια που περιγράφονται από έναν δείκτη. Στην μέθοδο CESBA MED, κάθε κριτήριο συνδέεται με έναν μόνο δείκτη.

Μερικά παραδείγματα για την δομή του γενικού πλαισίου της μεθόδου παρουσιάζονται στη συνέχεια:

Ενότητα: 'Β-Οικονομία', Κατηγορία: 'Β2-Οικονομική Δραστηριότητα', Κριτήριο: 'Β2.3-Συμμετοχή στην αγορά εργασίας', Δείκτης: 'Β2.3-% απασχολούμενων ατόμων '

Ενότητα: 'Γ-Ενέργεια', Κατηγορία: 'Γ1-Συμβατικές Πηγές Ενέργειας', Κριτήριο: 'Γ1.1-Πρωτογενής Ενέργεια για Θέρμανση', Δείκτης: 'Γ1.1-kWh/m^{2}'

Ενότητα: 'Ζ-Κοινωνικές Πτυχές', Κατηγορία: 'Ζ2-Κυκλοφορία & Υπηρεσίες Κινητικότητας', Κριτήριο: 'Ζ2.1-Δημόσιες συγκοινωνίες', Δείκτης: 'Ζ2.1-Ημερήσιες επιβιβάσεις ανά κάτοικο'

3.1.1. Κλίμακα Κτιρίου και Γειτονιάς

Το γενικό πλαίσιο της μεθοδολογίας (CESBA MED GF) είναι προσαρμοσμένο σε δυο κλίμακες:

- Κτιρίου: μέτρηση της επίδοσης ενός δημόσιου κτιρίου λαμβάνοντας υπόψη επτά βασικές ενότητες: Ανάπλαση & Ανάπτυξη Περιοχής (Αστικός Σχεδιασμός & Υποδομές), Ενέργεια & Πόροι, Επιβάρυνση Περιβάλλοντος, Ποιότητα Εσωτερικού Περιβάλλοντος, Ποιότητα Υπηρεσιών, Κοινωνικο-πολιτισμικές πτυχές, Κόστος & Οικονομία. Περιλαμβάνονται περισσότερα από 190 κριτήρια αξιολόγησης και σχετικοί δείκτες που οργανώνονται σε 21 κατηγορίες.
- Γειτονιάς: μέτρηση της επίδοσης μιας αστικής περιοχής (γειτονιά ή συγκρότημα κτιρίων) λαμβάνοντας υπόψη επτά βασικές ενότητες: Αστικές Υποδομές, Οικονομία, Ενέργεια, Εκπομπές, Μη-Ανανεώσιμοι Φυσικοί Πόροι, Περιβάλλον, Κοινωνικές Πτυχές. Περιλαμβάνονται περισσότερα από 150 κριτήρια αξιολόγησης και σχετικοί δείκτες που οργανώνονται σε 22 κατηγορίες.

3.2. Ανάπτυξη τοπικών εργαλείων

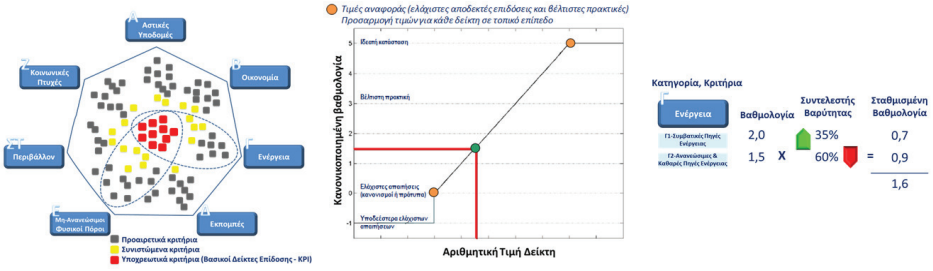
Η προσαρμογή των τοπικών εργαλείων αξιολόγησης (CESBA MED SNTools) γίνεται μέσω της επιλογής επιθυμητών κριτηρίων αξιολόγησης τα οποία κανονικοποιούνται για να είναι δυνατή η αντιστοίχησή τους σε μια κοινή κλίμακας βαθμολόγησης για κάθε ένα από τα κριτήρια και τελικά την επιλογή συντελεστών βαρύτητας που προσαρμόζει το τελικό αποτέλεσμα στις συγκεκριμένες πολιτικές και προτεραιότητες της περιοχής.

Η μέθοδος αξιολόγησης για την βαθμολόγηση και την εξαγωγή του τελικού αποτελέσματος αειφορίας ακολουθεί τα εξής βήματα:

- Βήμα 1 - Επιλογή κριτηρίων & δεικτών: Ποσοτικοποίηση των τιμών για κάθε δείκτη που έχει επιλεγεί για τα συγκεκριμένα κριτήρια (πχ kWh/m^2 σε κλίμακα κτιρίου, kWh/κάτοικο σε κλίμακα

γειτονιάς). Η επιλογή των κριτηρίων (Εικόνα 8α) πρέπει να περιλαμβάνει κατ'ελάχιστο τους βασικούς δείκτες (KPIs) που αντιπροσωπεύουν διεθνώς ανεγνωρισμένες προτεραιότητες για την εκτίμηση της αειφορίας. Η επιλογή κάποιων επιπλέον συνιστώμενων ή προαιρετικών κριτηρίων για κάθε θεματική ενότητα, προσφέρει τη δυνατότητα δημιουργίας διαφορετικών προσεγγίσεων που προσαρμόζονται στις τοπικές προτεραιότητες και εμπειρίες μιας περιοχής σχετικά με την αειφορία.

- Βήμα 2 - Κανονικοποίηση: Οι τιμές των δεικτών μετατρέπονται σε αδιάστατες παραμέτρους και μετασχηματίζονται σε μια νέα κοινή κλίμακα αναφοράς, που ονομάζεται διάστημα κανονικοποίησης (κλίμακα βαθμολόγησης). Η εξομάλυνση συνίσταται στην αντιστοίχηση μιας βαθμολογίας στην τιμή του δείκτη. Για την συγκριτική αξιολόγηση της επίδοσης ορίζεται μια κλίμακα βαθμολόγησης για κάθε επιλεγμένο κριτήριο. Το κριτήριο αναφοράς είναι η ποσοτικοποίηση του δείκτη που αντιστοιχεί στην ελάχιστη αποδεκτή επίδοση και εκείνη που θεωρείται η καλύτερη σε περιφερειακό επίπεδο (Εικόνα 8β). Τα κριτήρια αναφοράς δεν μπορούν να είναι τα ίδια με αυτά σε εθνικό ή διεθνές επίπεδο, διότι οι τοπικές συνθήκες κάθε περιοχής είναι διαφορετικές (κλίμα, οικοδομική πρακτική, πρότυπα, εμπειρία σε θέματα αειφορίας κλπ). Η κλίμακα βαθμολόγησης κυμαίνεται από 0 (ελάχιστες αποδεκτές επιδόσεις) έως 5 (άριστες-ιδεατές μελλοντικές επιδόσεις και στόχοι). Όλες οι περιπτώσεις που δεν καλύπτουν τις ελάχιστες απαιτήσεις αντιστοιχίζονται στην τιμή -1.
- Βήμα 3 - Σύνθεση: Οι κανονικοποιημένες επιδόσεις συνδυάζονται για τον προσδιορισμό της τελικής βαθμολογίας, προσφέροντας την δυνατότητα προσδιορισμού και χρήσης διαφορετικών συντελεστών βαρύτητας (Εικόνα 8γ) ανάλογα με τις τοπικές περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές προτεραιότητες και τα υπό μελέτη σενάρια. Η στάθμιση της βαθμολογίας γίνεται με την χρήση συντελεστών βαρύτητας που εκφράζονται ως ποσοστό σε κάθε κριτήριο ή δείκτη.



(α) (β) (γ)

Εικόνα 8: (α) Απεικόνιση της επιλογής κριτηρίων, (β) Κλίμακα βαθμολόγησης για την κανονικοποίηση των αριθμητικών δεικτών-κριτηρίων, (γ) Παράδειγμα σταθμισμένης βαθμολογίας κριτηρίου.

3.3. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Μέσω του γενικού πλαισίου CESBA MED όλες οι περιοχές μοιράζονται μια κοινή μεθοδολογία αξιολόγησης, με συγκεκριμένα κριτήρια και δείκτες. Με τον τρόπο αυτό είναι σαν να μιλάμε την ίδια γλώσσα και τα αποτελέσματα όλων των τοπικών αξιολογήσεων θα έχουν το ίδιο νόημα, διευκολύνοντας την επικοινωνία και συνεργασία σε εθνικό και διεθνές επίπεδο. Ταυτόχρονα, η χρήση των τιμών αναφοράς για την συγκριτική αξιολόγηση των επιδόσεων και η χρήση των συντελεστών βαρύτητας, επιτρέπουν την προσαρμογή των αποτελεσμάτων στις τοπικές συνθήκες και προτεραιότητες.

Για να μπορεί όμως να γίνει μια αντικειμενική σύγκριση των βασικών επιδόσεων των αστικών περιοχών και κτιρίων σε διαφορετικές περιοχές, αυτή θα πρέπει να βασίζεται σε πρωτογενή δεδομένα που δεν έχουν υποστεί προσαρμογές (πχ μέσω των συντελεστών βαρύτητας ή την χρήση τοπικών ελάχιστων απαιτήσεων) και για τις ίδιους βασικούς δείκτες (KPIs). Αυτό θα είναι εφικτό με την συγκέντρωση όλων των πρωτογενών δεδομένων για τα KPIs στο «Διαβατήριο CESBA MED». Στην παρούσα φάση, οι βασικοί δείκτες για τις επιμέρους κλίμακες κτιρίου και αστικών περιοχών συνοψίζονται στην Εικόνα 9. Η επιλογή τους προέκυψε από την συνεργασία των συμμετεχόντων στο πρόγραμμα, λαμβάνοντας υπόψη τους δείκτες που χρησιμοποιούνται στις υφιστάμενες μεθόδους-εργαλεία, το ευρωπαϊκό πλαίσιο δεικτών επίδοσης Level(s) και την ανάλυση που έγινε από ομάδα εμπειρογνωμόνων εννέα ευρωπαϊκών προγραμμάτων στα πλαίσια του διεθνούς εργαστηρίου για την

αειφορία στα κτίρια και τις γειτονιές [4]. Όλη η διαδικασία και οι επιμέρους δείκτες θα επαναξιολογηθούν και θα επικαιροποιηθούν ανάλογα με τα αποτελέσματα και τις εμπειρίες που θα προκύψουν από τις πιλοτικές εφαρμογές.

KPIs ΚΤΙΡΙΟΥ	Μονάδες
Πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας	kWh/m²/y
Κατανάλωση θερμικής & ηλεκτρικής ενέργειας	kWh/m²/y
Κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ	kWh/m²/y
Εμπεριεχόμενη (ενσώς) ενέργεια σε οικοδομικά υλικά	kWh/m²/y
Εκπομπές CO_2	kg CO_2 eq./m²/y
Ποιότητα εσωτερικού αέρα	Υλικά κτιρίου: Πτητικά οργανικά VOCs – mg/m³
	Υλικά κτιρίου: Φορμαλδεΰδη - mg/m³
	Επίπεδα CO_2 – ppm
Θερμική άνεση	Θερμοκρασία λειτουργίας °C (χειμ/θ HVAC)
	Σχετική υγρασία – PMV / PPD (μη HVAC)
	Ποσοστό χρόνου (%) εκτός ζώνης άνεσης (χειμώνα & καλοκαίρι)
Κόστος κύκλου ζωής κτιρίου (ενέργεια & νερό)	€/m²/y
Επαναχρησιμοποίηση/Ανακύκλωση υλικών	Ποσότητα υλικών εκτί του συνόλου (%)
Οικοδομικά απόβλητα από κατασκευές & κατεδαφίσεις	kg/m²
Κατανάλωση νερού	m³/ένοικο/y
Στερεά απόβλητα	Ποσοστό επί του συνόλου που συγκεντρώνονται και ανακυκλώνονται (%)
Συμμετοχή ενοίκων	Ποιοτική αξιολόγηση

KPIs ΓΕΙΤΟΝΙΑΣ	Μονάδες
Πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας (κατοικίες, τριτογενής)	kWh/m²/y
Κατανάλωση θερμικής & ηλεκτρικής ενέργειας	kWh/m²/y
Ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ στη συνολική κατανάλωση ενέργειας	kWh/m²/y
Συνολικές εκπομπές CO_2 (κτίρια, μεταφορές κ.α.)	kg CO_2 eq./m²/y
Εξωτ. ποιότητα αέρα (10ppm) αριθμός ημερών εκτός ορίων	Ημέρες/y
Δημόσιες συγκοινωνίες	Αριθμός δρομολογίων/κάτοικο
Εναλλακτικές μετακινήσεις – πεζόδρομοι & ποδηλατόδρομοι	m/κάτοικο
Διατηρητέα κτίρια & ανακαινίσεις	Ποσοστό επί του συνόλου (%)
Επαναχρησιμοποίηση/Ανακύκλωση υλικών	Ποσότητα υλικών για κατασκευές ή ανακαινίσεις επί του συνόλου (%)
Συνολική κατανάλωση νερού	Λίτρα/κάτοικο/y
Συλλογή απορριμμάτων και ανακύκλωση	kg/κάτοικο/y
Προσβασιμότητα προς βασικές δημόσιες υπηρεσίες	Ποσοστό πληθυσμού σε απόσταση <500μ (%)
Κόστος κύκλου ζωής (ενεργειακό κόστος)	€
Οικονομική προσιτότητα μίσθωσης κατοικιών	Ποσοστό του καθ'υστερού μισθού που χρησιμοποιείται για ενοίκιο (%)
Διηθητικότητα του εδάφους σε όμβρια ύδατα	Ποσοστό εκροής στο υπέδαφος (%) μέσω διαπερατών καλύψεων
Χρήση γης	Ποσοστό ελεύθερων χώρων επί του συνόλου (%)

Εικόνα 9: Προτεινόμενοι βασικοί δείκτες επιδόσεων για τα κτίρια και τις γειτονιές.

3.4. Πιλοτικές εφαρμογές

Η πιλοτική εφαρμογή των τοπικών εργαλείων θα πραγματοποιηθεί προσομοιώνοντας τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων με στόχο ανάδειξη του καλύτερου σεναρίου αναβάθμισης δημόσιων κτιρίων μιας γειτονιάς σε 9 Μεσογειακές περιοχές σε έξι χώρες (Γαλλία, Ελλάδα, Ισπανία, Ιταλία, Κροατία και Μάλτα). Η διαδικασία ξεκινάει με την προετοιμασία για την συλλογή των δεδομένων από διαφορετικές πηγές που πιθανώς διαθέτουν τα απαιτούμενα στοιχεία. Σε πολλές περιπτώσεις αυτό προϋποθέτει το νοικοκύρεμα των διαφορετικών υπηρεσιών που μπορεί να διαθέτουν τις πρωτογενείς πληροφορίες, για παράδειγμα, τις υπηρεσίες του κτηματολογίου, τις πολεοδομίες, τους ιδιοκτήτες κτιρίων και υποδομών, τα πιστοποιητικά ενεργειακής απόδοσης, τους ενεργειακούς παρόχους, τις υπηρεσίες κοινής ωφέλειας, τα γεωγραφικά δεδομένα και ηλεκτρονικούς χάρτες (πχ Google Earth, OpenStreetMap), διάφορες πηγές και βάσεις δεδομένων από τα αποτελέσματα ερευνητικών & αναπτυξιακών προγραμμάτων, κ.α.

Το επόμενο βήμα είναι η διάγνωση της υφιστάμενης κατάστασης, δηλαδή μια αξιολόγηση της αειφορίας και της επίδοσης της αστικής περιοχής και των δημόσιων κτιρίων που εξετάζονται, χρησιμοποιώντας το εργαλείο CESBA SNTool. Σκοπός της διάγνωσης είναι να καθοριστούν οι επιμέρους στόχοι επιδόσεων της περιοχής και των δημόσιων κτιρίων, να προσδιοριστούν τα πλεονεκτήματα και οι βασικές αδυναμίες σε σχέση με την αειφορία, να διερευνηθούν οι δυνατότητες εκμετάλλευσης ΑΠΕ, να αναλυθούν και να αξιολογηθούν οι ενεργειακές υποδομές και οι υπάρχουσες συνέργειες και αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κτιρίων εντός της περιοχής (πχ χώρο-χρονική ανάλυση της ζήτησης θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας). Για τον καλύτερο στρατηγικό σχεδιασμό των σεναρίων που θα μελετηθούν, πρέπει καταρχάς να καθοριστούν με σαφήνεια οι μετρήσιμοι στόχοι που θα πρέπει να επιτευχθούν και να προσδιοριστεί το φάσμα των πιθανών περιορισμών που να ληφθούν υπόψη.

Οι στόχοι θα πρέπει να είναι έξυπνοι, δηλαδή, συγκεκριμένοι, μετρήσιμοι, εφικτοί, συναφής, με συγκεκριμένους χρονικούς περιορισμούς. Επίσης θα πρέπει να καλύπτουν όλες τις βασικές ενότητες που άπτονται της αειφόρου ανάπτυξης, λαμβάνοντας υπόψη,

- το περιβάλλον, με τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, τη μείωση εκπομπών, την αύξηση του ποσοστού διείσδυσης ΑΠΕ, τη χρήση περιβαλλοντικά φιλικών υλικών, την αύξηση βελτίωση των χώρων πρασίνου πράσινων χώρων κ.α.,
- την κοινωνία, με την αποφυγή κοινωνικών μεταλλάξεων «εξευγενισμού» μετά την ενεργειακή ανάπλαση των κτιρίων και γενικότερα της περιοχής, τη βελτίωση της προσβασιμότητας και των συγκοινωνιακών υποδομών, την ενίσχυση της συμμετοχικότητας των πολιτών στις κοινές δράσεις, τη βελτίωση της ασφάλειας και της προστασίας των πολιτών κ.α.
- την οικονομία, με την αύξηση της ανταποδοτικότητας της επένδυσης, την μείωση της περιόδου αποπληρωμής, τη διατήρηση της αξίας των ακινήτων και της γης, κ.α.

Επίσης θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τυχόν εμπόδια και περιορισμοί ώστε να προσαρμοστούν και να οριοθετηθούν κατάλληλα τα πιθανά σενάρια επεμβάσεων. Για παράδειγμα, εξαιτίας νομικών περιορισμών (πχ οικοδομικοί κανονισμοί, προστασία της πολιτιστικής κληρονομιάς), τεχνικών και περιβαλλοντικών περιορισμών (πχ κεντρικών δικτύων, κλιματικών συνθηκών, μορφολογία περιοχής), διαθεσιμότητας οικονομικών πόρων κ.α.

Η διαδικασία αξιολόγησης των παρεμβάσεων που θα εξεταστούν θα έχει μια ολιστική προσέγγιση ακολουθώντας τα εξής βασικά βήματα: α) επιλογή και βελτιστοποίηση των ενεργειακών παρεμβάσεων

σε κλίμακα κτιρίου και γειτονιάς, ξεκινώντας με τη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων, αύξηση της αποδοτικότητας του ενεργειακού εφοδιασμού δίνοντας προτεραιότητα σε κεντρικά ενεργειακά δίκτυα έναντι των μεμονωμένων λύσεων, και στη συνέχεια την ένταξη ΑΠΕ σε συνδυασμό με κατάλληλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και/ή έξυπνων δικτύων, β) θεώρηση άλλων παρεμβάσεων (κυκλοφοριακό, κινητικότητα, πράσινοι χώροι, υποδομές), γ) εξέταση επιχειρηματικών μοντέλων και συστημάτων χρηματοδότησης, δ) τελική επιλογή και έγκριση επιθυμητού σεναρίου.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το πρόγραμμα CESBA MED έχει ως στόχο την ανάπτυξη ολοκληρωμένου συστήματος αξιολόγησης πολλαπλής κλίμακας (Αστικό περιβάλλον-Γειτονιά & Κτίριο) για την υποστήριξη των διαδικασιών λήψης αποφάσεων αξιολόγησης αναπλάσεων υφιστάμενων υποδομών ή σχεδιασμού νέων, με έμφαση στην βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων. Οι θεματικές ενότητες καλύπτουν τις βασικές πτυχές βιώσιμης ανάπτυξης όπως τις αστικές υποδομές, την ενέργεια, το περιβάλλον, τους φυσικούς πόρους, την οικονομία, τις κοινωνικο-πολιτισμικές πτυχές, το κόστος και την οικονομία. Το γενικό εργαλείο θα προσαρμοστεί και θα δοκιμαστεί σε 9 Μεσογειακές περιοχές, μεταξύ των οποίων και στην Ελλάδα. Η διαδικασία αυτή θα επιτρέψει την αξιολόγηση των εργαλείων CESBA MED στις διαδικασίες λήψης αποφάσεων διάφορων Μεσογειακών δήμων. Επίσης, η κοινή μεθοδολογία θα προσφέρει τη δυνατότητα σύγκρισης των βασικών δεικτών μέσω του Διαβατηρίου CESBA MED. Τέλος, θα προετοιμαστεί ένα πολύγλωσσο ηλεκτρονικό εκπαιδευτικό υλικό που θα παρουσιαστεί σε εθνικά εκπαιδευτικά σεμινάρια τα οποία θα οργανωθούν στις χώρες που συμμετέχουν στο πρόγραμμα. Με την ολοκλήρωση των πιλοτικών εφαρμογών θα επαναξιολογηθεί η όλη διαδικασία και η επιλογή των βασικών δεικτών επίδοσης, λαμβάνοντας υπόψη τις πρακτικές δυσκολίες στη συλλογή πρωτογενών δεδομένων και του υπολογισμού των, έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι η μεθοδολογία και τα εργαλεία CESBA MED θα μπορούν να εφαρμοστούν στην πράξη με ευκολία και επιτυχία.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το έργο CESBA MED Βιώσιμες Πόλεις της Μεσογείου (https://cesba-med.interreg-med.eu) υλοποιείται την περίοδο 2016-2019 με τη συγχρηματοδότηση του προγράμματος Ευρωπαϊκής Εδαφικής Συνεργασίας στη Μεσόγειο (Interreg MED). Συντονιστής του έργου είναι η Πόλη του Τορίνο και συμμετέχουν από την Αυστρία: Association of Common European Sustainable Built Environment Assessment (CESBA), την Γαλλία: Envirobat BDM, Auvergne-Rhône-Alpes Énergie Environnement, Urban Community of Marseille Metropolitan Province, την Ελλάδα: Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών, την Ισπανία: Government of Catalonia, Municipality Sant Cugat del Vallès, την Ιταλία: City of Torino, iiSBE Italia R&D srl, Municipality of Udine, την Κροατία: Energy Institute Hrvoje Požar και την Μάλτα: University of Malta. Για περισσότερες πληροφορίες: https://cesba-med.interreg-med.eu/ Το περιεχόμενο της εργασίας δεν αντικατοπτρίζει απαραίτητα τη γνώμη της ΕΕ. Οι συγγραφείς κατέβαλαν κάθε δυνατή προσπάθεια για την προετοιμασία της εργασίας προς όφελος του κοινού με τις διαθέσιμες πληροφορίες. Το πρόγραμμα Interreg MED και η ΕΕ δεν φέρουν ευθύνη για οποιαδήποτε χρήση των πληροφοριών που παρουσιάζονται.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Dodd, N., Cordella, M., Traverso, M., and Donatello, S., 2017, Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings, Part 3: How to make performance assessments using Level(s), Draft Beta v1.0, Joint Research Centre, European Commission.

[2] Barbano, G., Eßig, N., Mittermeier, P., Orova, M., Beagon, P., Claudi, L., Gómez-Salcedo, J.F., and Kiedaisch, F., 2016, Definition of sustainable Key Performance Indicators, NEWTREND Project, H2020 Program, European Commission.

[3] Balaras, C.A, Dascalaki, E.G, Droutsa, K.G., Morro, A., Barbano, G., Chanussot, L., Cazas, J., Zidar, M., Bačan, I., Martí i Ragué, X., Borg, R.P., and Presotto, A., 2017, CESBA MED D3.1.1 Transnational Indicators and Assessment Methods for Buildings and Urban areas, CESBA MED Consortium, Marsaille. https://cesba-med.interreg-med.eu/results/deliverables/

[4] CESBA Sprint Workshop, Bezau, Austria, September 18-20, 2017.
http://wiki.cesba.eu/wiki/CESBA_SPRINT_WORKSHOP

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΠΑΡΚΑ ΑΝΑΨΥΧΗΣ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΜΗΤΡΟΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ "ΑΝΤΩΝΗΣ ΤΡΙΤΣΗΣ"

Γ. Τζάνες[1], Π. Κτενίδης[1], Αιμ. Κονδύλη[2], Ι.Κ. Καλδέλλης[1]*

[1]Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., ΑΕΙ Πειραιά Τ.Τ.
[2]Εργαστήριο Αριστοποίησης Παραγωγικών Συστημάτων,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., ΑΕΙ Πειραιά Τ.Τ.
Τ.Θ. 41046, Αθήνα 12201, jkald@puas.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το μητροπολιτικό πάρκο "Αντώνης Τρίτσης", όπως και το σύνολο των πάρκων αναψυχής, εμφανίζουν συνήθως σημαντικές ενεργειακές καταναλώσεις, οι οποίες συχνά οδηγούν σε υψηλά λειτουργικά κόστη. Η ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) μπορεί να συνεισφέρει στην κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών μειώνοντας το κόστος, προωθώντας παράλληλα τη βιώσιμη ανάπτυξη. Ως εκ τούτου, οι ΑΠΕ αποτελούν, σε πολλές περιπτώσεις, βασική επιλογή κατά τον ενεργειακό σχεδιασμό πάρκων αναψυχής.

Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, στην παρούσα εργασία εξετάζεται η δυνατότητα αξιοποίησης του ηλιακού δυναμικού στο μητροπολιτικό πάρκο "Αντώνης Τρίτσης", το οποίο βρίσκεται στη Δυτική Αθήνα, περιοχή που παρουσιάζει υψηλό ηλιακό δυναμικό. Για το σκοπό αυτό επιχειρείται η ποσοτικοποίηση των οικονομικών ωφελειών που απορρέουν από την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών (Φ/Β) μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, σε μια προσπάθεια αρωγής του Πάρκου, αναφορικά με τα προβλήματα (οικονομικά, περιβαλλοντικά, κ.α.) που αντιμετωπίζει, καθώς και σε μία γενικότερη προσπάθεια ανάδειξης των πλεονεκτημάτων της αξιοποίησης των ΑΠΕ σε αντίστοιχους χώρους.

Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία διερευνήθηκαν οι καταλληλότερες τοποθεσίες εγκατάστασης Φ/Β μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, με κριτήριο τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας και την ελαχιστοποίηση της οπτικής όχλησης. Μετά από λεπτομερή καταγραφή των πιθανών θέσεων εγκατάστασης Φ/Β μονάδων και λαμβάνοντας υπόψη την ενεργειακή παραγωγή που προκύπτει για κάθε μία από αυτές, συμπεραίνεται ότι στο Πάρκο υπάρχει η δυνατότητα χωροθέτησης μέχρι και 355 kW_p.

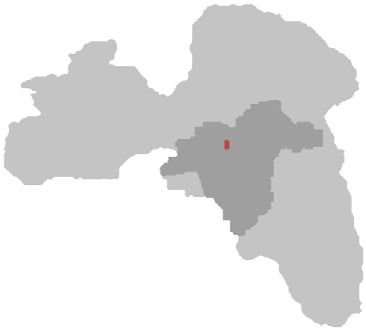
Η παρούσα εργασία αποτελεί τμήμα μιας ολοκληρωμένης μελέτης για την αντιμετώπιση των προβλημάτων του Πάρκου, σχετικά με τη διαχείριση υδάτων, το κτιριακό δυναμικό, το φωτισμό, κ.α. Στα πλαίσια αυτά, διαμορφώθηκε ένα σπονδυλωτό πλάνο στη βάση του ετήσιου ενεργειακού συμψηφισμού (Net-Metering) και των πρόσθετων ηλεκτρικών αναγκών που προκύπτουν από τις προτεινόμενες παρεμβάσεις για την επίλυση των προβλημάτων αυτών.

Λέξεις Κλειδιά: Φωτοβολταϊκά Πλαίσια, Ηλιακή Ακτινοβολία, "Net Metering", Ανάλυση Κόστους-Οφέλους, Πράσινη Ενέργεια

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η λειτουργία μεγάλων δημόσιων χώρων απαιτεί σημαντικές ποσότητες ενέργειας που οδηγούν σε αυξημένα λειτουργικά κόστη. Η αξιοποίηση των ΑΠΕ για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μπορεί να οδηγήσει στη μείωση των λειτουργικών εξόδων, ενώ παράλληλα προωθεί τη βιώσιμη ανάπτυξη. Σε αυτά τα πλαίσια, η αξιοποίησή τους αποτελεί κατευθυντήρια οδηγία αστικών πρωτοβουλιών, όπως το Ευρωπαϊκό Σύμφωνο των Δημάρχων [1], και νομοθετημάτων [2], σχετικά με το σχεδιασμό μακροχρόνιων πλάνων ανάπτυξης. Με βάση τα ανωτέρω, η παρούσα εργασία εστιάζει στην εφαρμογή μίας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας για τη διερεύνηση της αξιοποίησης των ΑΠΕ σε πάρκα αναψυχής, και ειδικότερα στο πάρκο "Αντώνης Τρίτσης".

Το μητροπολιτικό πάρκο "Αντώνης Τρίτσης" έχει έκταση περίπου 1.200 στρ., περίπου έξι φορές μεγαλύτερη από τον Εθνικό Κήπο και βρίσκεται στη Δυτική Αθήνα (σχήμα 1), σε απόσταση 8 χλμ. από το κέντρο της πόλης (Πλατεία Ομονοίας). Το Πάρκο δημιουργεί έντονη αντίθεση σε αυτό το αστικό περιβάλλον, καθώς χαρακτηρίζεται από πλούσια βιοποικιλότητα, φιλοξενώντας περισσότερα από 160 διαφορετικά είδη πτηνών, τα οποία βρίσκουν τροφή σε έξι τεχνητές λίμνες.

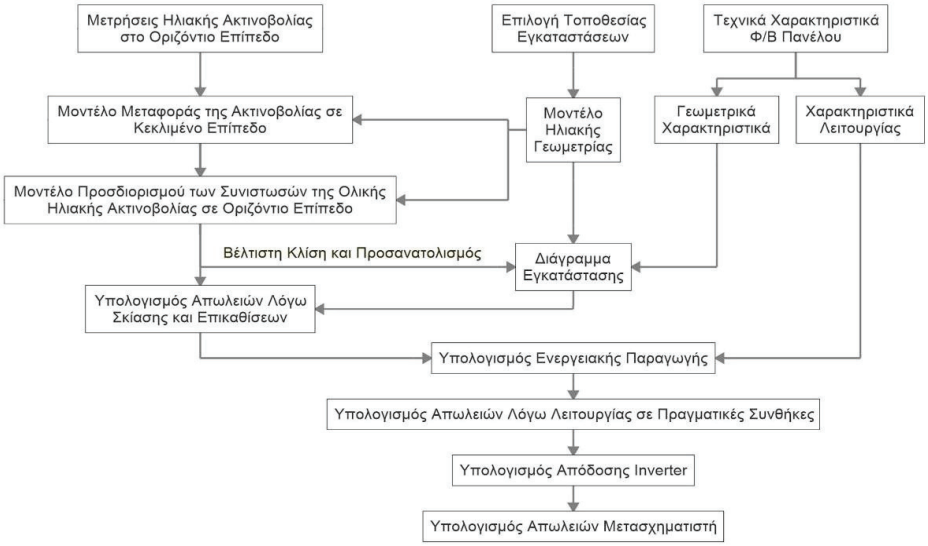


Σχήμα 1: Η γεωγραφική θέση του Πάρκου στην Αττική [3]

Λόγω των παραπάνω, το Πάρκο έχει χαρακτηριστεί υπερτοπικός πόλος έλξης, προσελκύοντας κατά μέσο όρο 15 χιλ. επισκέπτες τα Σαββατοκύριακα. Ωστόσο, η ελλιπής χρηματοδότηση έχει οδηγήσει στη μη επαρκή συντήρηση του Πάρκου, με συνέπεια τη σταδιακή υποβάθμισή του. Ενδεικτικά προβλήματα που έχουν προκύψει είναι η συνεχής πτώση της στάθμης των λιμνών του Πάρκου, 85 cm/y, και ο ελλιπής φωτισμός. Η επίλυση των προβλημάτων του Πάρκου αποτελεί αντικείμενο μιας ολοκληρωμένης μελέτης, που έχει εκπονηθεί από το εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας και Προστασίας Περιβάλλοντος, περιλαμβάνοντας 6 διαφορετικούς τομείς παρεμβάσεων: Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας μέσω ΑΠΕ, Διαχείριση Υδάτων, Διαχείριση Κτιριακού Δυναμικού, Φωτισμός, Ασφάλεια και Μετακινήσεις. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα ερευνητικά αποτελέσματα των ενεργειακών παρεμβάσεων που προτείνονται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του Πάρκου.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η συγκεκριμένη εργασία περιλαμβάνει το σχεδιασμό Φ/Β μονάδων στο Πάρκο, σε τοποθεσίες που καλύπτουν κριτήρια όπως ενεργειακή αποδοτικότητα, ελάχιστη οπτική όχληση, κ.α. Για την επιλογή θέσεων εγκατάστασης και τη διαστασιολόγηση των Φ/Β μονάδων χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από μετεωρολογικό σταθμό πλησίον της περιοχής, ενώ παράλληλα έγινε αναλυτική καταγραφή των διαθέσιμων επιφανειών των κτηρίων του Πάρκου. Στη συνέχεια, με τη μέθοδο της αριθμητικής προσομοίωσης και με κριτήριο τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής παραγωγής προσδιορίστηκαν οι θέσεις και η ισχύς των μονάδων. Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της διαδικασίας που εφαρμόστηκε για το σχεδιασμό και την προσομοίωση της λειτουργίας κάθε Φ/Β μονάδας.

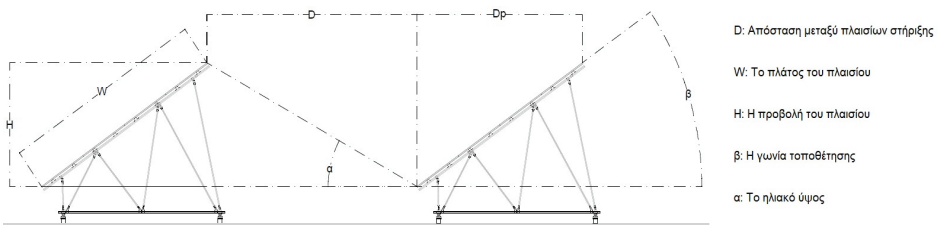


Σχήμα 2. Διάγραμμα ροής σχεδιασμού Φ/Β εγκατάστασης

Με την ολοκλήρωση της ενεργειακής προσομοίωσης, πραγματοποιήθηκε οικονομική αξιολόγηση των εγκαταστάσεων, η οποία βασίσθηκε στη χρήση της μεθόδου του γραμμικού προγραμματισμού και με βάση πιθανά σενάρια εξέλιξης των αναγκών του Πάρκου, για τη δημιουργία ενός σχεδίου υλοποίησης των προτεινόμενων Φ/Β μονάδων.

Τα μετεωρολογικά δεδομένα, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά την ενεργειακή αξιολόγηση των Φ/Β μονάδων, προέρχονται από το μετεωρολογικό σταθμό που βρίσκεται στο χώρο του Α.Ε.Ι. Πειραιά Τ.Τ., ο οποίος απέχει από το Πάρκο 8,4 χλμ. Τα δεδομένα αυτά, μετά από ποιοτικό έλεγχο, χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της άμεσης και διάχυτης συνιστώσας σύμφωνα με το μοντέλο των Reindl, Beckman και Duffie [4], ενώ για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στην εκάστοτε κλίση των Φ/Β πλαισίων χρησιμοποιήθηκε το ισοτροπικό μοντέλο των Liu και Jordan [5].

Για κάθε πιθανή θέση εγκατάστασης των Φ/Β μονάδων, προσδιορίστηκε ο βέλτιστος προσανατολισμός και η κλίση των Φ/Β πλαισίων, που μεγιστοποιούν την ενεργειακή παραγωγή, λαμβάνοντας υπόψη τις σκιάσεις από φυσικά εμπόδια στην εκάστοτε θέση. Αντίστοιχα, μέσω της ελαχιστοποίησης των απωλειών σκίασης μεταξύ των Φ/Β σειρών υπολογίστηκε η βέλτιστη απόσταση των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων (σχήμα 3, πίνακας 1).



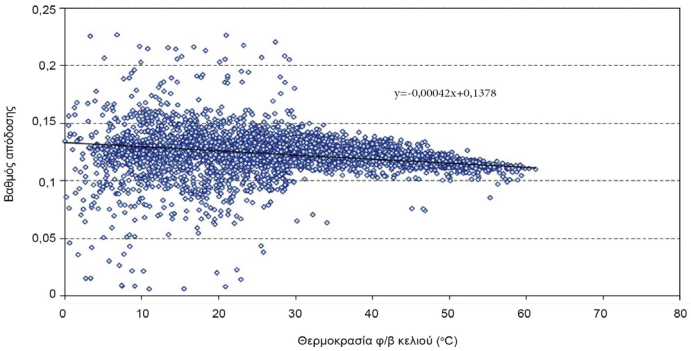
Σχήμα 3. Γεωμετρία μεταξύ των παράλληλων πλαισίων του συστήματος στήριξης

Πίνακας 1: Μέση μηνιαία μείωση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στα Φ/Β πλαίσια μίας εκ των προτεινόμενων μονάδων, λόγω σκιάσεων

Μήνας	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Απώλειες (%)	2,3	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	1,9

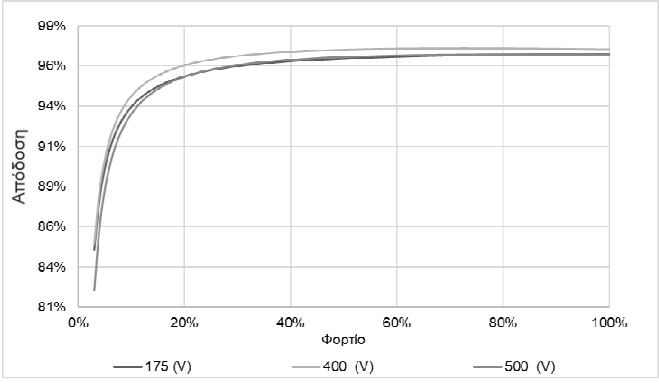
Η ενέργεια που παράγεται από τις μονάδες αποδίδεται στο δίκτυο στο πλαίσιο της αυτοπαραγωγής με ετήσιο ενεργειακό συμψηφισμό. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η πλεονάζουσα ενέργεια των Φ/Β μονάδων δεν τιμολογείται, ενώ σε περίπτωση που η ηλεκτρική κατανάλωση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή, η διαφορά χρεώνεται, απαιτήθηκε ο ακριβής προσδιορισμός της ενεργειακής παραγωγής των Φ/Β μονάδων στην περιοχή του Πάρκου, επομένως και ο προσδιορισμός της συνολικά απαιτούμενης ισχύος που οδηγεί σε μηδενικό ενεργειακό ισοζύγιο.

Κατά τον υπολογισμό της ενεργειακής παραγωγής των Φ/Β πλαισίων συμπεριλήφθηκαν όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία τους [6, 7, 8, 9], με σημαντικότερη τη θερμοκρασία που αναπτύσσεται στις Φ/Β κυψέλες [10], μειώνοντας την απόδοση των μονάδων έως και 2% (σχήμα 4).



Σχήμα 4. Μεταβολή βαθμού απόδοσης Φ/Β εγκατάστασης σε σχέση με τη θερμοκρασία των Φ/Β κυψελών [10]

Για την επιλογή αντιστροφέων ρεύματος (inverters), εξετάστηκαν διαφορετικά εμπορικά μοντέλα, στοχεύοντας στη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης, η οποία υπολογίστηκε σε ωριαία βάση σύμφωνα με το μοντέλο των Faranda κ.α. [11]. Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά λειτουργίας (σχήμα 5) των υπό εξέταση αντιστροφέων ρεύματος, για κάθε Φ/Β μονάδα επαναλαμβάνονται οι προσομοιώσεις και επιλέγεται ο βέλτιστος συνδυασμός.



Σχήμα 5: Καμπύλες απόδοσης ενός εκ των "inverter", με ονομαστική ισχύς 5 kVA

Με την ολοκλήρωση της ενεργειακής προσομοίωσης, υπολογίστηκε το σταθμισμένο κόστος ενέργειας (LCOE) κάθε Φ/Β μονάδας [12]. Η οικονομική αξιολόγηση των μονάδων έγινε με βάση τα 25 έτη, συνυπολογίζοντας ετήσια έξοδα συντήρησης ~1% του αρχικού κεφαλαίου, μεταβλητά κόστη (αντικαταστάσεις εξοπλισμού λόγω φθοράς), αναπροσαρμογές λόγω πληθωρισμού και την ετήσια προσαύξηση του κόστους συντήρησης [13, 14].

Καθώς οι δημόσιοι χώροι συχνά εκσυγχρονίζονται και αναβαθμίζονται με βάση τις ανάγκες τους, δημιουργήθηκαν με τη μέθοδο Γραμμικού Προγραμματισμού διαφορετικά σενάρια σταδιακής υλοποίησης των προτεινόμενων Φ/Β μονάδων. Βασικό κριτήριο του μελλοντικού σχεδιασμού αποτέλεσε η βελτιστοποίηση της οικονομικής βιωσιμότητας του πλάνου υλοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, μέσω της ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης (εξ. 1) αναζητήθηκε ο συνδυασμός των Φ/Β μονάδων που συνολικά μπορούν να καλύψουν τις ηλεκτρικές απαιτήσεις E_d, με το ελάχιστο σταθμισμένο κόστος, LCOE. Για κάθε Φ/Β μονάδα, i, εξετάζεται το σενάριο συμμετοχής ή αποκλεισμού από τον ηλεκτροπαραγωγό «στόλο» μέσω της μεταβλητής W. Επιπλέον, εξετάζεται και η τμηματική υλοποίηση της εκάστοτε Φ/Β μονάδας, μεταβάλλοντας κάθε φορά τον αριθμό των inverter (μεταβλητή x).

$$f_{\overrightarrow{min}} = \sum_{i=0}^{n} LCOE_i * W_i \quad (1)$$

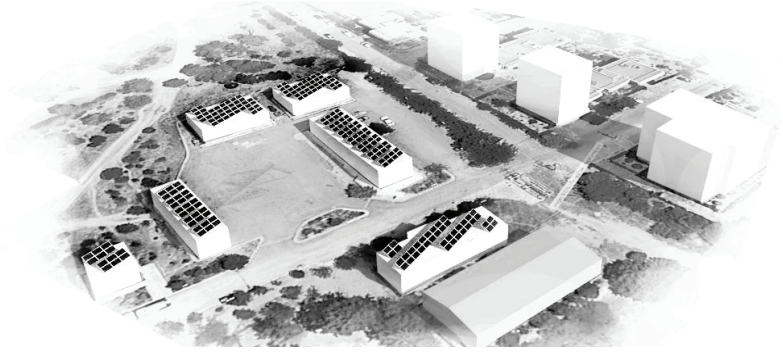
$$E_d = \sum_{i=0}^{n} E_{p_i} = \sum_{i=0}^{n} x_i * E_{inv\,i} \quad (2)$$

$$0 \leq x \leq n_{inv} \quad (3)$$

Όπου, E_p, η παραγόμενη ενέργεια της Φ/Β μονάδας, E_{inv}, η παραγόμενη ενέργεια του συγκεκριμένου inverter και n_{inv}, ο μέγιστος αριθμός inverter της εγκατάστασης. Με βάση τη διαχρονική εξέλιξη της ηλεκτρικής κατανάλωσης και την επαναληπτική εφαρμογή της αντικειμενικής συνάρτησης καθορίστηκε το σχέδιο υλοποίησης της εγκατάστασης των προτεινόμενων μονάδων.

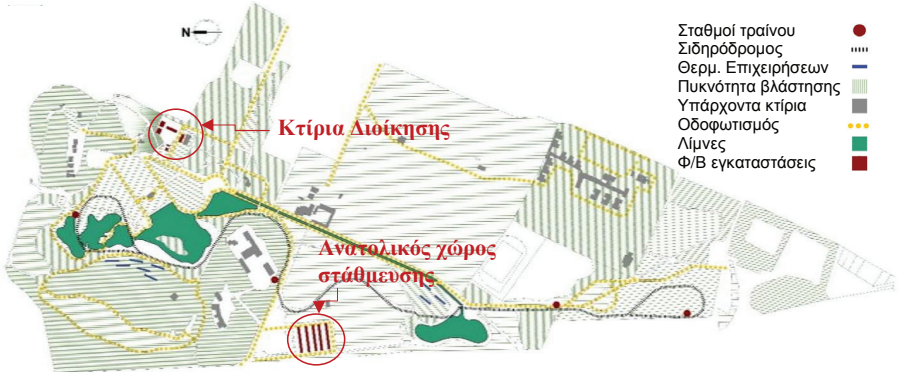
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην περίπτωση του πάρκου "Αντώνης Τρίτσης", η ικανοποίηση του κριτηρίου της ελάχιστης οπτικής όχλησης οδήγησε στον αποκλεισμό της εγκατάστασης Φ/Β πλαισίων επί του εδάφους. Παράλληλα, η διαθέσιμη επιφάνεια για την εγκατάσταση Φ/Β πλαισίων στις οροφές κτισμάτων είναι περιορισμένη. Πολλά από τα κτίσματα εντός του Πάρκου, δεν ανήκουν διαχειριστικά στο Πάρκο αλλά σε ιδιώτες, στην εκκλησία κ.λπ. Επιπλέον, σε πολλά κτίσματα η εγκατάσταση Φ/Β πλαισίων θα οδηγούσε σε πολύ χαμηλή ενεργειακή παραγωγή, καθώς είτε έχουν δίρριχτες στέγες, με προσανατολισμό ανατολικά-δυτικά, είτε φέρουν μεταλλικές κατασκευές με προεντεταμένα υφάσματα που προσφέρουν σκίαση στις οροφές τους, είτε βρίσκονται σε πολύ μικρή απόσταση από ψηλά δέντρα. Συνολικά, οι επιλέξιμες τοποθεσίες εγκατάστασης σε σχέση με τα υπάρχοντα κτίρια είναι οι επίπεδες οροφές των βορειοανατολικών κτισμάτων που στεγάζουν διοικητικές λειτουργίες (σχήμα 6).



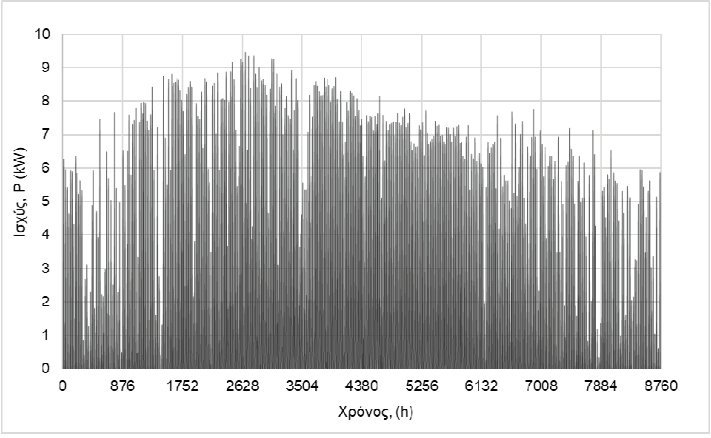
Σχήμα 6: Απεικόνιση των προτεινόμενων Φ/Β μονάδων, βορειοανατολικά του Πάρκου

Επιπρόσθετα, σχεδιάστηκαν ηλιακά σκίαστρα, δηλ. τοποθέτηση Φ/Β πλαισίων σε ξύλινες κατασκευές, στους χώρους στάθμευσης πλησίον των κτιρίων διοίκησης καθώς και στα ανατολικά του Πάρκου (σχήμα 7), όπου διαπιστώθηκε η σχετική ανάγκη.



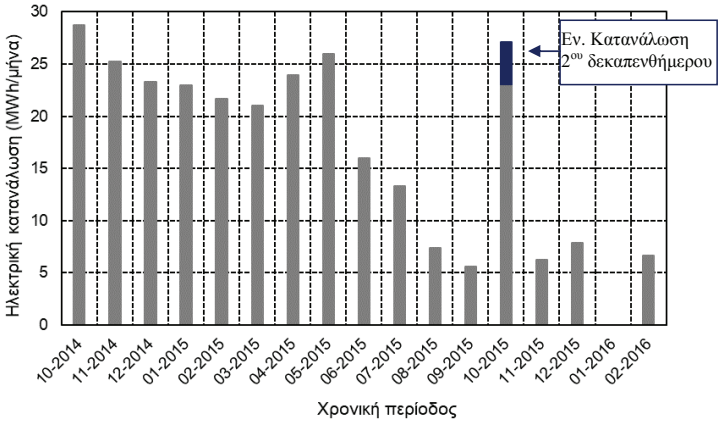
Σχήμα 7. Προτεινόμενες τοποθεσίες Φ/Β μονάδων στο πάρκο "Αντώνης Τρίτσης"

Στο σύνολό τους, οι Φ/Β μονάδες παρουσιάζουν μέση ετήσια ενεργειακή παραγωγή 1,44 MWh/kW_p, η οποία χαρακτηρίζεται υψηλή, με τις πρόσθετες απώλειες διαχείρισης και μεταφοράς της ενέργειας να μην ξεπερνούν το 15%. Συνεπώς, το σύνολο των μονάδων που μελετήθηκαν, συνολικής ισχύος 335 kW_p είναι σε θέση να παράγουν 483 MWh ανά έτος, με την ωριαία διανομή να είναι αντίστοιχη του σχήματος 8, για κάθε Φ/Β μονάδα.

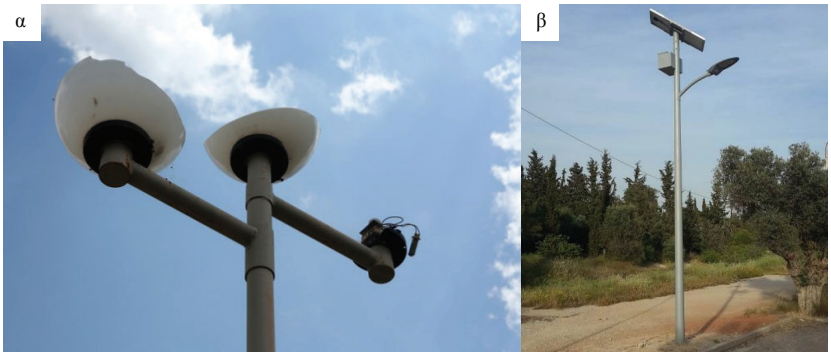


Σχήμα 8: Κατανομή ενεργειακής παραγωγής Φ/Β μονάδας

Οι συνολικές ηλεκτρικές ανάγκες του μητροπολιτικού πάρκου "Αντώνης Τρίτσης" για το 2015 ήταν της τάξεως των 275 MWh (γράφημα 9). Ωστόσο, το 2016 αναμένονταν πολύ χαμηλότερες (~130 MWh) διότι ο κεντρικός εξοπλισμός φωτισμού είχε τεθεί εκτός λειτουργίας, λόγω βανδαλισμού (εικ. 1α), και αντ' αυτού έχουν εγκατασταθεί, προσωρινά, αυτόνομα φωτιστικά σώματα (εικ. 1β). Πιο συγκεκριμένα, η ηλεκτρική κατανάλωση μετά τον Αύγουστο του 2015 δεν ξεπερνά τις 8 MWh/μήνα, πέραν του Οκτωβρίου, ο οποίος στο πρώτο δεκαπενθήμερο εμφανίζει τετραπλάσιες καταναλώσεις σε σχέση με το δεύτερο, λόγω τριήμερης εκδήλωσης που πραγματοποιήθηκε στο Πάρκο.



Σχήμα 9: Ηλεκτρική κατανάλωση του πάρκου "Αντώνης Τρίτσης" από Οκτώβριο 2014 έως Φεβρουάριο 2016



Εικόνα 1 α) Κατεστραμμένος εξοπλισμός οδοφωτισμού, β) Αυτόνομα Φ/Β φωτιστικά σώματα

Ο βέλτιστος οικονομικά συνδυασμός των Φ/Β εγκαταστάσεων για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του έτους βάσης (2016), έχει αρχικό κόστος 110 χιλ. ευρώ, περιλαμβάνοντας εγκατάσταση 45 kWp στις οροφές των κτιρίων που στεγάζουν διοικητικές λειτουργίες (A1 έως A4), και 40 kWp ηλιακών σκιάστρων, σε χώρους στάθμευσης (C1, C2). Σε περίπτωση μη επάρκειας των διαθέσιμων οικονομικών πόρων για την ενσωμάτωση Φ/Β συστημάτων, τα οποία είναι ικανά να καλύψουν πλήρως τις ηλεκτρικές ανάγκες του πάρκου "Αντώνης Τρίτσης", παρέχεται ένας οδικός χάρτης (πίνακας 2) στο πλαίσιο της σπονδυλωτής υλοποίησης.

Πίνακας 2. Σειρά υλοποίησης και αντίστοιχη κάλυψη των καταναλώσεων ηλεκτρικής ενέργειας του Πάρκου για το 2016

Φ/Β μονάδες	A1	A2	A3	A4	A5	C2	C1
Συμμετοχή	11%	11%	15%	11%	3%	8%	41%
Σειρά υλοποίησης	1η	4η	2η	5η	3η	7η	6η

Το σταθμισμένο κόστος ηλεκτροπαραγωγής του συνόλου των Φ/Β μονάδων του πίνακα 2 είναι της τάξεως των 60 €/MWh. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μονάδα θα είναι σε θέση να παράγει ενέργεια για τα επόμενα 25 χρόνια καθώς και το αντίστοιχο κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το εθνικό δίκτυο, συμπεραίνεται ότι το Πάρκο θα μπορούσε να εξοικονομήσει συνολικά τουλάχιστον 170 χιλ. ευρώ, ποσό που μπορεί να επανεπενδυθεί για την περεταίρω βελτίωση της λειτουργίας του Πάρκου.

Τα προβλήματα του Πάρκου που χρήζουν άμεσης αντιμετώπισης, είναι εκείνα της λειψυδρίας και του ελλιπούς φωτισμού. Αφενός, η έλλειψη φωτισμού έχει καταστήσει το Πάρκο μη ασφαλές, οδηγώντας στη μείωση της επισκεψιμότητας και στην απαξίωση των υποδομών του (κτιρίων, καλωδιώσεων, αντλιοστασίων κ.α.), αφετέρου, ο ταχύτατος ρυθμός αποξήρανσης των λιμνών απειλεί την ίδια την ύπαρξη του Πάρκου. Οι απαραίτητες ενέργειες για την αντιμετώπιση των προαναφερθέντων προβλημάτων, που σχετίζονται με τις ηλεκτρικές καταναλώσεις του Πάρκου, είναι η εγκατάσταση αντλιών μεταφοράς και επεξεργασίας νερού και η επαναλειτουργία-επέκταση-αναβάθμιση του κεντρικού συστήματος φωτισμού. Από την οπτική γωνία της ενεργειακής κατανάλωσης, οι παραπάνω παρεμβάσεις αντιστοιχούν σε αύξηση της ζήτησης κατά ~450 MWh/y. Σε περίπτωση που ομαλοποιηθεί η λειτουργία του Πάρκου, με την υλοποίηση των παρεμβάσεων στη διαχείριση υδάτων και στο φωτισμό, τα έξοδα σε αγορά ηλεκτρικής ενέργειας αντιστοιχούν σε 35 χιλ. ευρώ ανά έτος. Η αξιοποίηση των ΑΠΕ σε αυτή τη περίπτωση θα εξοικονομήσει ~600 χιλ. ευρώ, για 25 έτη λειτουργίας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι ηλεκτρικές ανάγκες των πάρκων αναψυχής οδηγούν σε υψηλά λειτουργικά κόστη, τα οποία μπορούν να αποφευχθούν με την εγκατάσταση μονάδων ΑΠΕ. Στην περίπτωση του πάρκου "Αντώνης Τρίτσης", τα κόστη ηλεκτροδότησης για το 2015, ήταν 15,5 χιλ. ευρώ. Ωστόσο, λόγω καταστροφών και βανδαλισμού των υποδομών του Πάρκου, για το 2016 αναμενόταν μείωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στις 130 MWh.

Παράλληλα, η περιοχή στην οποία βρίσκεται το Πάρκο, διαθέτει πλούσιο ηλιακό δυναμικό, με την ετήσια ηλιακή ενέργεια να ξεπερνά τις 1850 kWh/m^2. Η αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή των Φ/Β μονάδων στην περιοχή πλησιάζει τις 1,44 MWh/kW$_p$, επιτρέποντας την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του Πάρκου με σχετικά χαμηλές απαιτήσεις ισχύος, επιφάνειας και κόστους. Ενδεικτικά, η εγκατάσταση Φ/Β πλαισίων στις οροφές των κτιρίων που στεγάζουν διοικητικές λειτουργίες οδηγεί στην κάλυψη έως και 60% της ηλεκτρικής κατανάλωσης του 2016.

Συνολικά, το κόστος εγκατάστασης των Φ/Β μονάδων, που είναι σε θέση να καλύψουν πλήρως τις ανάγκες του 2016, είναι της τάξεως των 110 χιλ. ευρώ, ενώ το αποφευκτέο κόστος από την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας στη διάρκεια 25 ετών ξεπερνά τις 170 χιλ. ευρώ. Με δεδομένη τη διαφορά των 60 χιλ. ευρώ ή αλλιώς των 2,5 χιλ. ευρώ ανά έτος, μια δημόσια επένδυση για την υλοποίηση του έργου μπορεί να κριθεί κοινωνικά δίκαιη.

Η κρίσιμη κατάσταση του Πάρκου απαιτεί την εγκατάσταση και λειτουργία νέων υποδομών αυξάνοντας σημαντικά τις ηλεκτρικές καταναλώσεις (~450 MWh/y). Σε αυτή τη περίπτωση, το κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε ετήσια βάση ανέρχεται σε 35 χιλ. ευρώ, καθιστώντας την ενσωμάτωση ΑΠΕ αναγκαία για την οικονομική βιωσιμότητα του πάρκου "Αντώνης Τρίτσης" και ακόμη πιο ωφέλιμη για το κοινωνικό σύνολο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] European Commission (2017) Covenant of Mayors for climate and energy [online αναφορά]. Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://www.covenantofmayors.eu/Covenant-technical-materials.html> [τελευταία πρόσβαση: 16-10-2017]

[2] Ontario regulation (2009) Green Energy Act (397/11). Energy conservation and demand management plans.

[3] Μενάγια Αμάλθεια-Σταματίνα, «Πάρκο Περιβαλλοντικής Ευαισθητοποίησης «Αντώνης Τρίτσης». Επέμβαση στις περιοχές των ορίων», Διπλωματική Εργασία, Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχ. ΕΜΠ, 2014. Επιβλ. Καθηγήτρια: Μαρία Καφρίτσα.

[4] Reindl, D.T. & Beckman, W.A. & Duffie, J.A. (1990) Diffuse fraction corrections. Solar Energy, 45, (1), pp. 1–7.

[5] Liu, B. Y. H., & Jordan, R. C. (1960). The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Solar Energy, 4, 1–19. doi:10.1016/0038-092X (60)90062-1.

[6] Kaldellis, J.K. & Kapsali, M. (2011) Simulating the dust effect on the energy performance of photovoltaic generators based on experimental measurements. Energy, 36, pp. 5154-5161.

[7] Kaldellis, J.K. & Fragos, P. (2011) Ash deposition impact on the energy performance of photovoltaic generators. Journal of cleaner production, 19, pp. 311-317.

[8] Kaldellis, J.K. & Kokala, A. (2010) Quantifying the decrease of the photovoltaic panels' energy yield due to phenomena of natural air pollution disposal. Energy, 35, pp. 4862-4869.

[9] Kaldellis, J.K. & Fragos, P. & Kapsali, M. (2011) Systematic experimental study of the pollution deposition impact on the energy yield of photovoltaic installations. Renewable energy, 36, pp. 2717-2724.

[10] Kaldellis, J.K. & Kapsali, M. & Kavadias, K. A. (2014) Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece. Renewable energy, 66, pp. 612-624.

[11] Faranda, R. & Hafezi, H. & Leva, S. & Mussetta, M. & Ogliari, E. (2015) The optimum PV plant for a given solar DC/AC converter. Energies, 8, pp. 4853-4870.

[12] Kaldellis, J.K. & Ninou, I. (2011) Energy balance analysis of combined photovoltaic-diesel powered telecomunication stations. Electrical power and energy systems, 33 (10), pp. 1739-1749.

[13] Kaldellis J.K. & Zafirakis, D & Kavadias, K. & Kondili, E. (2012) Optimum PV-diesel hybrid systems for remote consumers of the Greek territory. Applied energy, 97, pp. 61-67.

[14] Kaldellis J.K. & Ninou, I. & Zafirakis, D. (2011) Minimum long-term cost solution for remote telecommunication stations on the basis of photovoltaic-based hybrid power systems. Energy policy, 36, pp. 2512-2527.

Αποθήκευση ενέργειας - Υδρογόνο

ΠΡΟΘΕΣΗ ΥΙΟΘΕΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΘΥΜΙΑ ΠΛΗΡΩΜΗΣ ΓΙΑ ΜΙΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΛΥΣΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΚΑΤΟΙΚΙΕΣ

Σ. Καρύτσας[1*], Ο. Πολύζου[2], Κ. Καρύτσας[2]

[1*] Τμήμα Γεωθερμικής Ενέργειας, Διεύθυνση ΑΠΕ, ΚΑΠΕ
190 09 Πικέρμι, e-mail: spkary@cres.gr
[2] Τμήμα Γεωθερμικής Ενέργειας, Διεύθυνση ΑΠΕ, ΚΑΠΕ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο οικιακός τομέας είναι υπεύθυνος για ένα μεγάλο μέρος της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας, κυρίως λόγω των αναγκών θέρμανσης, ψύξης και ζεστού νερού χρήσης. Το σύστημαTESSe2b, το οποίο είναι το αποτέλεσμα ενός τετραετούς έργου χρηματοδοτούμενου από το ευρωπαϊκό πρόγραμμα Horizon 2020, αποσκοπεί στο να συμβάλλει στην αντιμετώπιση του παραπάνω ζητήματος μέσω της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων. Στα πλαίσια του έργου TESSe2b σχεδιάζεται, αναπτύσσεται, επικυρώνεται και επιδεικνύεται μια προσαρμόσιμη και οικονομική τεχνολογία αποθήκευσης θερμικής ενέργειας η οποία συνδυάζει μικρού μεγέθους δοχεία αποθήκευσης θερμικής ενέργειας με υλικά αλλαγής φάσης (PCM TES), με ηλιακούς συλλέκτες και υψηλής απόδοσης ΓΑΘ.

Ένα σημαντικό ζήτημα σχετικά με τη διάδοση της τεχνολογίας αποτελεί η συμπεριφορά των καταναλωτών όσον αφορά την αποδοχή και υιοθέτησή της. Η παρούσα μελέτη στοχεύει στην διερεύνηση του βαθμού ενδεχόμενης υιοθέτησης της τεχνολογίας TESSe2b σε διαφορετικές ευρωπαϊκές χώρες, καθώς και τους παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν το ζήτημα αυτό.

Σε αυτά τα πλαίσια, διεξήχθη έρευνα με χρήση ερωτηματολογίου σε πέντε κράτη-μέλη της ΕΕ (Αυστρία, Ελλάδα, Ισπανία, Πορτογαλία και Γερμανία) μεταξύ Ιουνίου 2016 και Φεβρουαρίου 2017. Τα ζητήματα που εξετάστηκαν αφορούσαν α) τις απόψεις των καταναλωτών σχετικά με τα ενδεχόμενα οφέλη της τεχνολογίας, β) τις απόψεις των καταναλωτών σχετικά με την ενδεχόμενη υιοθέτηση της τεχνολογίας, γ) την προθυμία πληρωμής (σε €) για την τεχνολογία και δ) την αποδεκτή περίοδο αποπληρωμής της επένδυσης ώστε να είναι κανείς πρόθυμος να πληρώσει για το σύστημα TESSe2b.

Για την επεξεργασία του συνολικού δείγματος των 583 ατόμων διεξήχθη στατιστική ανάλυση ξεχωριστά για κάθε χώρα. Για την αρχική ανάλυση του δείγματος χρησιμοποιήθηκε περιγραφική στατιστική, ενώ μέσω διατεταγμένων λογιστικών παλινδρομήσεων εξετάσθηκε η επίδραση των κοινωνικοοικονομικών χαρακτηριστικών και των χαρακτηριστικών της κατοικίας στις απόψεις των καταναλωτών όσον αφορά τα ενδεχόμενα οφέλη, την πρόθεση υιοθέτησης, την προθυμία πληρωμής και την αποδεκτή περίοδο αποπληρωμής του συστήματος TESSe2b. Μη παραμετρικοί έλεγχοι Kruskal-Wallis εφαρμόσθηκαν ώστε να ελεγχθεί αν υπάρχουν διαφορές μεταξύ των διαφορετικών χωρών, όσον αφορά τις απόψεις των συμμετεχόντων για τα υπό εξέταση ζητήματα.

Τα κύρια χαρακτηριστικά τα οποία βρέθηκαν να επηρεάζουν θετικά τις απόψεις σχετικά με την τεχνολογία TESSe2b είναι α) το εισόδημα, β) το ποσοστό του εισοδήματος που δαπανάται για ενέργεια, γ) το επίπεδο εκπαίδευσης, δ) προηγούμενες επενδύσεις σε σχετικές τεχνολογίες, ε) επάγγελμα ή ενδιαφέροντα σχετικά με την τεχνολογία ή το περιβάλλον και στ) το μέγεθος της κατοικίας. Το έτος κατασκευής, το υπάρχον σύστημα θέρμανσης και η περιοχή στην οποία βρίσκεται η κατοικία είναι επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν τα υπό εξέταση θέματα.

Σε ένα γενικότερο πλαίσιο, τα αποτελέσματα της μελέτης συμβάλλουν στην κατανόηση της συμπεριφοράς του καταναλωτή όσον αφορά τα οικιακά συστήματα θέρμανσης / ψύξης.

Λέξεις Κλειδιά: *γεωθερμική αντλία θερμότητας, θερμικά ηλιακά, αποθήκευση θερμικής ενέργειας, συμπεριφορά καταναλωτή, κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε παγκόσμιο επίπεδο, η ενέργεια καταναλώνεται στον βιομηχανικό, οικιακό και τριτογενή τομέα, καθώς επίσης και στον τομέα των μεταφορών. Ο οικιακός τομέας είναι υπεύθυνος για το 18% της συνολικής παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας [1]. Το αντίστοιχο ποσοστό είναι 25% για την ΕΕ [2] και 29% για την Ελλάδα [2]. Επιπλέον, η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας στον οικιακό τομέα αναμένεται να αυξηθεί κατά 57% μεταξύ 2010 και 2040, κυρίως λόγω της αυξανόμενης ζήτησης χωρών εκτός ΟΟΣΑ [3].

Σύμφωνα με την Eurostat, το 2011 το φυσικό αέριο αντιπροσώπευε το 36% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στην ΕΕ στον οικιακό τομέα, η ηλεκτρική ενέργεια το 25%, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας το 14%, τα προϊόντα πετρελαίου το 14%, η ανάκτηση θερμότητας το 7% και τα στερεά καύσιμα το 4% [2].

Στον οικιακό τομέα, η θέρμανση είναι υπεύθυνη για το μεγαλύτερο ποσοστό της καταναλισκόμενης ενέργειας, ενώ οι δραστηριότητες που ακολουθούν είναι η ψύξη, το μαγείρεμα, ο φωτισμός και η παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (ZNX) [1][4][5][6][7][8][9][10][11][12][13][14]. Οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την οικιακή κατανάλωση ενέργειας είναι το επίπεδο του οικογενειακού εισοδήματος, το επίπεδο των τιμών της ενέργειας, η τοποθεσία, τα χαρακτηριστικά του κτιρίου και του νοικοκυριού, τα κλιματικά χαρακτηριστικά, ο τύπος και η αποδοτικότητα των συσκευών, το επίπεδο προσβασιμότητας στον εφοδιασμό ενέργειας, η διαθεσιμότητα ενεργειακών πόρων και των οι ενεργειακές πολιτικές[12][15].

Με βάση τα παραπάνω, είναι σαφές ότι ο οικιακός τομέας, ο οποίος είναι υπεύθυνος για ένα μεγάλο μέρος της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας, χρησιμοποιεί κυρίως ορυκτά καύσιμα για την κάλυψη των αναγκών του, με σημαντικότερη ανάγκη να είναι η θέρμανση των κατοικιών και η παραγωγή ZNX.

Μεταξύ των τεχνολογιών που μπορούν να συμβάλλουν στη μείωση της χρήσης των ορυκτών καυσίμων στον οικιακό τομέα είναι η γεωθερμική (μέσω της χρήσης γεωθερμικών αντλιών θερμότητας) και η ηλιακή (θερμικά ηλιακά) ενέργεια ή και ο συνδυασμός αυτών ως υβριδικό σύστημα ενέργειας (δηλ. ενός συστήματος το οποίο συνδυάζει δύο ή και περισσότερες τεχνολογίες).Η χρήση της γεωθερμικής και της ηλιακής ενέργεια –οι οποίες συγκαταλέγονται μεταξύ των ΑΠΕ- στον οικιακό τομέα μπορούν να προσφέρουν ποικίλα πλεονεκτήματα, σημαντικότερα των οποίων είναι το ότι α) είναι πρακτικά ανεξάντλητες και συμβάλλουν στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικά καύσιμα, β) είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο, γ) έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος και δεν επηρεάζονται από τις τιμές των ορυκτών καυσίμων, δ) είναι εγχώριες πηγές ενέργειας, ε) μπορούν να συμβάλλουν στην αναβάθμιση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών. Επιπλέον, ο συνδυασμός των δύο αυτών μορφών ενέργειας σε ένα υβριδικό σύστημα για θέρμανση και ψύξη κτιρίων μπορεί να αξιοποιήσει τα καλύτερα χαρακτηριστικά της κάθε τεχνολογίας, οδηγώντας έτσι σε έναν υψηλό βαθμό απόδοσης, υψηλή αξιοπιστία και ανεμπόδιστη λειτουργία[16], απαιτώντας μικρότερο χώρο για την εγκατάσταση του εξοπλισμού σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα και παρέχοντας υψηλής ποιότητας άνεση στους εσωτερικούς χώρους.

Το TESSe2b είναι ένα έργο τεσσάρων ετών, χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή στα πλαίσια του προγράμματος Η2020, με τη συμμετοχή ενός διεπιστημονικού δικτύου ερευνητικών κοινοτήτων, κατασκευαστών προϊόντων και εταιρειών από 8 χώρες της ΕΕ, στο οποίο αναπτύσσεται μια ολοκληρωμένη λύση για την αποθήκευση ενέργειας σε κτίρια κατοικιών χρησιμοποιώντας ηλιακή και γεωθερμική ενέργεια (Εικόνα 1).

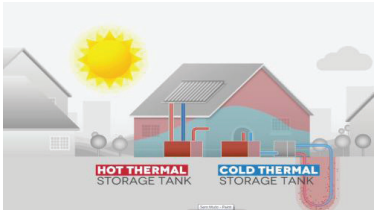
Το TESSe2b σχεδιάζει, αναπτύσσει και επιδεικνύει μια τεχνολογία θερμικής αποθήκευσης χαμηλού κόστους, η οποία βασίζεται στη χρήση ηλιακών συλλεκτών και υψηλής απόδοσης γεωθερμικών αντλιών θερμότητας για παραγωγή θέρμανσης, ψύξης και ZNX.

Το έργο TESSe2b έχει ως στόχο να χρησιμοποιήσει αυτή την τεχνολογία, συνδυάζοντας με ολοκληρωμένο τρόπο την θερμική ηλιακή ενέργεια, τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας και τη θερμική αποθήκευση [ενισχυμένη με υλικά αλλαγής φάσης (PCM- Phase Changing Material)], η οποία ελέγχεται από ένα έξυπνο σύστημα που μαθαίνει μόνο του, επιτυγχάνοντας ένα πιο αποτελεσματικό σύστημα σε σύγκριση με τις λύσεις που προσφέρει αυτή τη στιγμή η αγορά. Ο εκτιμώμενος χρόνος αποπληρωμής για το σύστημα TESSe2b είναι περίπου 8-9 έτη. Η αρχική επένδυση, μετά από αυτό το χρονικό διάστημα, θα είναι αντίστοιχη με αυτή των συμβατικών συστημάτων. Η χρήση του συστήματος TESSe2b μπορεί να οδηγήσει σε ενεργειακή εξοικονόμηση της τάξης του 25-30%, σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα, με αντίστοιχη μείωση του λειτουργικού κόστους.

Το σύστημα TESSe2b είναι ολοκληρωμένο, εύκολο στην εγκατάσταση και περιλαμβάνει ένα έξυπνο σύστημα ελέγχου που επιτρέπει την αυτόματη μείωση των ενεργειακών καταναλώσεων για

διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας. Το μόνο που απαιτείται είναι ένας μικρός ελεύθερος εξωτερικός χώρος, όπως ένας μικρός κήπος, για τη διάνοιξη των γεωτρήσεων καθώς και ελεύθερος χώρος, κατά κύριο λόγο στην σκεπή, για την εγκατάσταση των θερμικών ηλιακών συλλεκτών.

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η ανάλυση και η κατανόηση των απόψεων των καταναλωτών σε διαφορετικές χώρες της ΕΕ σχετικά με α) τα ενδεχόμενα οφέλη της τεχνολογίας, β) την ενδεχόμενη υιοθέτηση της τεχνολογίας, γ) την προθυμία πληρωμής (σε €) για την τεχνολογία και δ) την αποδεκτή περίοδο αποπληρωμής της επένδυσης ώστε να είναι κανείς πρόθυμος να πληρώσει για το σύστημα TESSe2b.



Εικόνα1. Το σύστημα TESSe2b

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Μια διαδικτυακή έρευνα με χρήση ερωτηματολογίου πραγματοποιήθηκε μεταξύ Ιουνίου 2016 και Φεβρουαρίου 2017. Το ερωτηματολόγιο αναπτύχθηκε από τον εταίρο IPS, με τη συνεργασία των εταίρων ΚΑΠΕ, ΤΕΙ Στερεάς Ελλάδας, ECOSERVEIS και GEOTEAM και περιελάμβανε τέσσερις ενότητες ερωτήσεων: α) προσωπικό ενδιαφέρον σε σχέση με περιβαλλοντικά και ενεργειακά ζητήματα, β) πρόθεση χρήσης του συστήματος TESSe2b, γ) χαρακτηριστικά κατοικίας και δ) κοινωνικοοικονομικές πληροφορίες. Η έρευνα, πραγματοποιήθηκε σε πέντε διαφορετικές χώρες από τους αντίστοιχους εταίρους: Αυστρία (GEOTEAM), Γερμανία (RUB), Ελλάδα (ΚΑΠΕκαιΤΕΙΣτερεάς Ελλάδας), Πορτογαλία (IPS) και Ισπανία (ECOSERVEIS). Προκειμένου να προωθηθεί η έρευνα διάφορες μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν, μεταξύ των οποίων) ανακοίνωση στην ιστοσελίδα του έργου, β) ανακοίνωση σε ιστοσελίδες των εταίρων, γ) χρήση λιστών ηλεκτρονικής αλληλογραφίας, δ)προώθηση μέσω ιστοσελίδων με σχετική θεματολογία και ε) προώθηση κατά τη διάρκεια σχετικών εκδηλώσεων/ δραστηριοτήτων.

Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι μια διαδικτυακή έρευνα με ερωτηματολόγια είναι πιθανό να μη δημιουργήσει ένα δείγμα τόσο αντιπροσωπευτικό, όσο μια έρευνα που θα γινόταν μέσω τηλεφώνου ή προσωπικών συνεντεύξεων [17][18], καθιστώντας έτσι δύσκολη τη γενίκευση των συμπερασμάτων σε μη-διαδικτυακούς πληθυσμούς [19].Ωστόσο, παρόλο που το δείγμα δεν είναι πλήρως αντιπροσωπευτικό του πληθυσμού, μπορεί να προσφέρει μια ικανοποιητική βάση[20] προκειμένου να διερευνηθούν οι παράγοντες που επηρεάζουν τα ζητήματα σχετικά με την υιοθέτηση του συστήματος TESSe2b.

Δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων η οποία περιλαμβάνει 583 πλήρως συμπληρωμένα ερωτηματολόγια: 17 από την Αυστρία, 166 από τη Γερμανία (κυρίως φοιτητές, λόγω της μεθόδου προώθησης του ερωτηματολογίου στη χώρα αυτή), 159 από την Ελλάδα, 109 από την Πορτογαλία και 132 από την Ισπανία. Μέσω του στατιστικού πακέτου SPSS 24 πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση ξεχωριστά για κάθε χώρα.

Για την εξαγωγή των αρχικών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι περιγραφικής στατιστικής, ενώ διαδικασίες όπως έλεγχοι ανεξαρτησίας χ^2, μη παραμετρικοί έλεγχοι Mann-Whitney, καθώς και δυαδικές και διατεταγμένες λογιστικές παλινδρομήσεις εφαρμόσθηκαν με σκοπό την εξέταση των δημογραφικών/ κοινωνικοοικονομικών χαρακτηριστικών και χαρακτηριστικών της κατοικίας στα προσδοκώμενα οφέλη, την πρόθεση εγκατάστασης, την προθυμία πληρωμής και την αποδεκτή περίοδο αποπληρωμής του συστήματος TESSe2b. Τα δημογραφικά/ κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά της κατοικίας που επελέγησαν να εξετασθούν βασίζονται σε αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών σχετικά με παράγοντες που επηρεάζουν τη διαδικασία επιλογής οικιακών συστημάτων θέρμανσης (Πίνακας 1). Επιπλέον, εφαρμόσθηκαν μη παραμετρικοί έλεγχοι Kruskal-Wallis, έτσι ώστε να ελεγχθεί αν υπάρχουν στατιστικά σημαντικά διαφορές μεταξύ των διαφορετικών χωρών, όσον αφορά τις απόψεις των συμμετεχόντων για τα υπό εξέταση ζητήματα

(προσδοκώμενα οφέλη, πρόθεση εγκατάστασης, προθυμία πληρωμής, αποδεκτή περίοδος αποπληρωμής).

Πίνακας 1:Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή οικιακού συστήματος θέρμανσης

Κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά	Εισόδημα, ηλικία, επίπεδο εκπαίδευσης, φύλο, απασχόληση, μέγεθος νοικοκυριού, παρουσία (και αριθμός) παιδιών στην κατοικία
Χαρακτηριστικά κατοικίας	Μέγεθος κατοικίας ή αριθμός υπνοδωματίων, τύπος κατοικίας, έτος κατασκευής, μορφή ιδιοκτησίας, έτη διαμονής στην κατοικία, υποδομές, ανακαινίσεις/ μετασκευές για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης
Χωρικά χαρακτηριστικά	Περιοχή, τύπος περιοχής (αστική/ αγροτική), κλίμα, ύπαρξη «πράσινων» χώρων στην περιοχή

Πηγή: [21]

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν αποκλειστικά από την περιγραφική στατιστική (Ενότητα 3.1), τους μη παραμετρικούς ελέγχους Kruskal-Wallis (Ενότητα 3.2) και τις διατεταγμένες λογιστικές παλινδρομήσεις (Ενότητα 3.3). Η ανάπτυξη των υποδειγμάτων διατεταγμένων λογιστικών παλινδρομήσεων βασίσθηκε στα ευρήματα των ελέγχων ανεξαρτησίας χ^2 και των μη παραμετρικών ελέγχων Mann-Whitney, ενώ στα υποδείγματα περιλαμβάνονται αποκλειστικά μεταβλητές που βρέθηκαν να είναι σημαντικές σε στατιστικά σημαντικό επίπεδο (p-values ≤0.010). Επιπλέον, προκειμένου να επιλεγούν τα υποδείγματα με τη βέλτιστη προσαρμογή, τα κριτήρια α) Modelfitting, β) Goodness-of-fit, γ) PseudoR-Squares και δ) Test of Parallel Lines ελήφθησαν υπόψη και παρουσιάζονται ανά υπόδειγμα στους Πίνακες 5-8. Να σημειωθεί ότι για την περίπτωση της Αυστρίας δεν αναπτύχθηκαν υποδείγματα παλινδρομήσεων, λόγω του μικρού αριθμού συμμετεχόντων στην έρευνα.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι μεταβλητές κλίμακας Likert «προσδοκώμενα οφέλη χρήσης TESSe2b» και «πρόθεση εγκατάστασηςTESSe2b» δημιουργήθηκαν συνδυάζοντας (με χρήση της τιμής του μέσου κάθε περίπτωσης) αντιστοίχως δυο σετ στοιχείων Likert. Όσον αφορά τη μεταβλητή των προσδοκώμενων οφελών, τα στοιχεία που συνδυάσθηκαν ήταν: η βελτίωση της ποιότητας ζωής, η μείωση των εξόδων για ενέργεια, η αύξηση του διαθέσιμου εισοδήματος, η ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας και η μεταβολή της νοοτροπίας προς μια κατεύθυνση ενεργειακής αυτονομίας (βιωσιμότητας) του κτιρίου. Στην περίπτωση της μεταβλητής πρόθεσης εγκατάστασης, τα στοιχεία Likert που συνδυάσθηκαν ήταν: η αίσθηση σιγουριάς με την ιδέα υιοθέτησης του συστήματος, η αίσθηση άνεσης με την ιδέα υιοθέτησης του συστήματος, η αίσθηση ευκολίας υιοθέτησης του συστήματος, η πρόθεση χρήσης του συστήματος και η πρόβλεψη χρήσης του συστήματος.

Προκειμένου να ελεγχθεί εάν τα δύο προαναφερθέντα σετ στοιχείων Likert δημιουργούν αξιόπιστες μεταβλητές κλίμακας Likert διενεργήθηκαν έλεγχοι αξιοπιστίας Cronbach's alpha για κάθε χώρα και μεταβλητή (δέκα περιπτώσεις: πέντε χώρες, δύο διαφορετικά σετ στοιχείων Likert). Επιπλέον, πριν από τους ελέγχους αυτούς διεξήχθησαν αναλύσεις κυρίων συνιστωσών με σκοπό να ελεγχθεί ότι όλα τα στοιχεία Likert (σε κάθε διαφορετική περίπτωση) περιλαμβάνονται σε μια ενιαία συνιστώσα, καθώς είναι μια παράμετρος την οποία ο έλεγχος αξιοπιστίας Cronbach's alpha δεν λαμβάνει υπόψη. Όντως, οι διεξαχθείσες αναλύσεις κυρίων συνιστωσών υπέδειξαν ότι σε όλες τις περιπτώσεις τα πέντε στοιχεία Likert περιλαμβάνονται σε μια ενιαία συνιστώσα, ενώ ο συντελεστής αξιοπιστίας Cronbach's alpha ήταν σε κάθε περίπτωση άνω του 0,800 (Πίνακες 2 και 3), καθιστώντας έτσι πλήρως αποδεκτή τη δημιουργία των δύο μεταβλητών κλίμακας Likert.

Πίνακας2. Στατιστικά Αξιοπιστίας

	Προσδοκώμενα οφέλη χρήσης TESSe2b		**Πρόθεση εγκατάστασης TESSe2b**	
	Cronbach's Alpha	Πλήθος στοιχείων	Cronbach's Alpha	Πλήθος στοιχείων
Αυστρία	0,894	5	0,888	5
Γερμανία	0,820	5	0,833	5
Ελλάδα	0,884	5	0,904	5
Πορτογαλία	0,902	5	0,909	5
Ισπανία	0,854	5	0,904	5

Πίνακας3. Cronbach's Alpha εάν το Στοιχείο Διαγραφεί

		Αυστρία	Γερμανία	Ελλάδα	Πορτογαλία	Ισπανία
Προσδοκώμενα οφέλη χρήσης TESSe2b	1. Η υιοθέτηση του συστήματος θα βελτιώσει την ποιότητα ζωής μου	0,893	0,800	0,856	0,877	0,835
	2. Η υιοθέτηση του συστήματος θα μειώσει τις ενεργειακές δαπάνες μου	0,832	0,784	0,844	0,872	0,797
	3. Η χρήση του συστήματος θα αυξήσει το διαθέσιμο εισόδημά μου	0,848	0,774	0,884	0,878	0,827
	4. Η χρήση του συστήματος θα συμβάλλει στην ενεργειακή μου αυτονομία μου και την ελευθερία επιλογής συστήματος (ενεργειακή ασφάλεια)	0,824	0,765	0,849	0,880	0,824
	5. Η υιοθέτηση του συστήματος θα αλλάξει τη νοοτροπία προς μία κατεύθυνση ενεργειακής αυτονομίας (βιωσιμότητας) του κτιρίου	0,933	0,795	0,863	0,893	0,836
Πρόθεση εγκατάστασης TESSe2b	1. Αισθάνομαι σιγουριά με την ιδέα υιοθέτησης του συστήματος	0,885	0,790	0,892	0,883	0,876
	2. Αισθάνομαι άνετα με την ιδέα υιοθέτησης του συστήματος	0,848	0,793	0,888	0,894	0,881
	3. Νομίζω ότι θα είναι εύκολο για μένα να υιοθετήσω του συστήματος	0,865	0,822	0,882	0,906	0,889
	4. Σκοπεύω να χρησιμοποιήσω το σύστημα	0,845	0,787	0,871	0,878	0,869
	5. Προβλέπω ότι θα χρησιμοποιήσω το σύστημα	0,873	0,806	0,877	0,879	0,896

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Περιγραφική στατιστική

Η στατιστική ανάλυση των απαντήσεων του ερωτηματολογίου παρουσιάζεται στον Πίνακα 4. Συνοπτικά, θα μπορούσε να αναφερθεί ότι: α) έχει απαντηθεί σε μεγαλύτερο ποσοστό από άντρες, β) η μέση ηλικία είναι τα 45 έτη (εκτός από τη Γερμανία που έχουν απαντήσει κυρίως φοιτητές), γ) το επίπεδο μόρφωσης είναι μεταπτυχιακές σπουδές, δ) οι περισσότεροι διαμένουν σε ιδιόκτητα διαμερίσματα πολυκατοικίας, ε) σημαντικότερη πηγή ενέργειας για θέρμανση είναι το φυσικό αέριο και για ψύξη η ηλεκτρική ενέργεια, στ) το μεγαλύτερο ποσοστό αντεπεξέρχεται με το σημερινό του εισόδημα και ζ) σημαντικό ποσοστό μετρά και καταγράφει την ενέργεια για θέρμανση, ψύξη και ΖΝΧ.

Πίνακας 4. Περιγραφική στατιστική

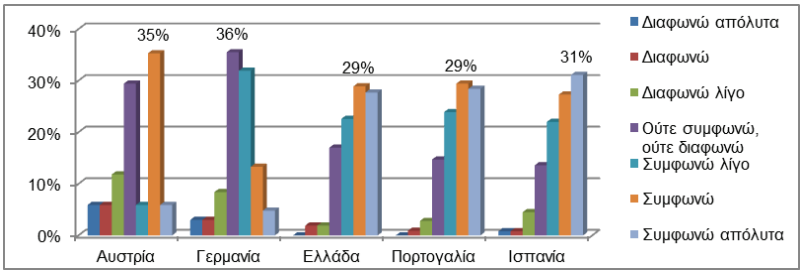
	Αυστρία	Ελλάδα	Πορτογαλία	Ισπανία	Γερμανία
Φύλο	>63% Άντρες				
Ηλικία (μέσος όρος)	48	42		43	24
Παιδιά (μέσος όρος)	2	1			0
Επίπεδο μόρφωσης	>42% Μεταπτυχιακές σπουδές				

Πίνακας 4 - συνέχεια. Περιγραφική στατιστική

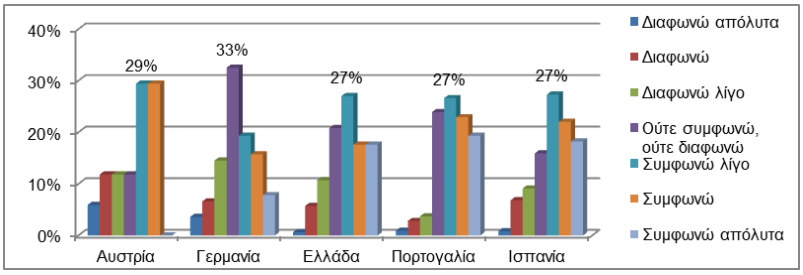
Επαγγελματική κατάσταση	Ιδιωτικός υπάλληλος	Ελεύθερος επαγγελματίας	Δημόσιος υπάλληλος	Ιδιωτικός υπάλληλος	Φοιτητής
Περιοχή κατοικίας	Μικρή πόλη/κωμόπολη	>40% Μεγάλη πόλη			
Μέλη κατοικίας	Γύρω 35% 4 μέλη				2 μέλη
Ιδιοκτησία κατοικίας	>70% Ζει σε δικό του σπίτι				Ενοίκιο
Τύπος κατοικίας	Ανεξάρτητη μονοκατοικία	>44% Διαμέρισμα πολυκατοικίας			
Μέγεθος κατοικίας	>150	100-150m^2	50-100m^2		50-100m^2 >150 m^2
Αριθμός υπνοδωματίων	>30% έχει 3			4	3
Έτος κατασκευής (ή μεγάλης ανακαίνισης)	1990-1999	1970-1989			Δεν γνωρίζω
Πηγές ενέργειας για θέρμανση	Φυσικό αέριο	Πετρέλαιο θέρμανσης	Ηλεκτρική ενέργεια	Φυσικό αέριο	
Πηγές ενέργειας για ψύξη	>50% δεν χρησιμοποιούν	Ηλεκτρική ενέργεια	>50% δεν χρησιμοποιούν		
Πηγές ενέργειας για ζεστό νερό χρήσης	Ηλεκτρική ενέργεια	Ηλιακός θερμοσίφωνας	Άλλη	Το ίδιο με τη θέρμανση	
Χρήση θερμικών ηλιακών συλλεκτών	29%	>40%	26%	23%	9%
Χρήση γεωθερμίας	6%	1,9%	0,9%	Όχι	1,2%
Άποψη για το σημερινό εισόδημα	Θεωρώ ότι μπορώ να ανταπεξέλθω στις υποχρεώσεις μου, βάσει του σημερινού μου εισοδήματος				
Συνολικό μηνιαίο εισόδημα	2.000-2.500€	1.000-1.500€	500-1.500€	1.000-1.500€	< 500€
Ποσοστό συνολικού μηνιαίου εισοδήματος που χρησιμοποιώ για ενέργεια σήμερα	Ανάμεσα στο 5 και 10%				Δεν γνωρίζω
Μετρώ και καταγράφω την ενέργεια για συστήματα θέρμανσης, ψύξης και ΖΝΧ	41,2%	35,8%	18,3%	37,9%	17,5%
Έχω επενδύσει σε συστήματα θέρμανσης, ψύξης και ΖΝΧ τα τελευταία 5 χρόνια	17,6%	> 38%			14,5%
Έχω επενδύσει σε θερμικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας το τελευταίο έτος	-	Περίπου 12%			7,2%
Δραστηριοποιούμαι στον ενεργειακό και /ή περιβαλλοντικό τομέα	Περίπου 62%				31,3%

Στην Ελλάδα, την Πορτογαλία και την Ισπανία οι περισσότεροι συμφωνούν ή συμφωνούν απόλυτα ότι το σύστημα TESSe2bμπορεί να τους προσφέρει οφέλη, ενώ στην Αυστρία και την Γερμανία οι ερωτηθέντες είτε συμφωνούν είτε έχουν μια ουδέτερη άποψη (Εικόνα 2). Όσον αφορά στην πρόθεση εγκατάστασης του συστήματος TESSe2b, στην Αυστρία, την Ελλάδα, την Πορτογαλία και την Ισπανία υπάρχει θετική στάση έναντι του συστήματος, ενώ στην Γερμανία η θέση των ερωτηθέντων είναι πιο ουδέτερη (Εικόνα 3). Στην Ελλάδα, την Πορτογαλία και την Ισπανία, οι περισσότεροι συμμετέχοντες δηλώνουν πως θα ήταν πρόθυμοι να πληρώσουν μέχρι 6.000 € για την εγκατάσταση του συστήματος TESSe2b. Αντιθέτως, στην Αυστρία και την Γερμανία το ποσό αυτό κυμαίνεται στις 3.000 με 6.000€, με την επιλογή 0-3.000 € να ακολουθεί (Εικόνα 4). Αντιστοίχως, στην Ελλάδα, την Πορτογαλία και την Ισπανία, οι περισσότεροι συμμετέχοντες θεωρούν ως αποδεκτή περίοδο αποπληρωμής -ώστε να είναι

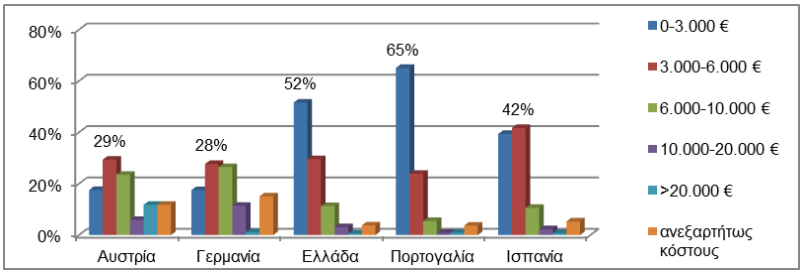
κανείς πρόθυμος να πληρώσει για το σύστημα TESSe2b- τα 0 έως 5 έτη. Στην Αυστρία οι πιο κοινές επιλογές είναι 3-5 έτη και 8-10 έτη, ενώ στην Γερμανία τα ποσοστά είναι μοιρασμένα μεταξύ όλως των επιλογών που αφορούν μια περίοδο αποπληρωμής 0-10 ετών (Εικόνα 5).



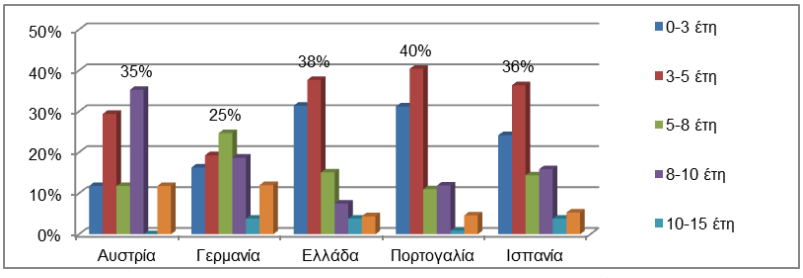
Εικόνα2. Προσδοκώμενα οφέλη από το σύστημα TESSe2b



Εικόνα3. Πρόθεση εγκατάστασης του συστήματος TESSe2b



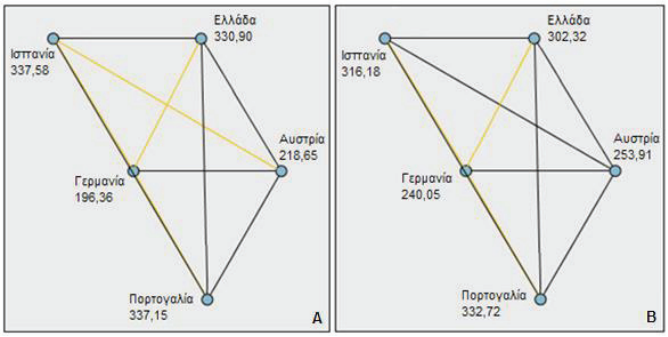
Εικόνα4. Ποσό (σε €) που είναι κανείς πρόθυμος να πληρώσει για το σύστημα TESSe2b



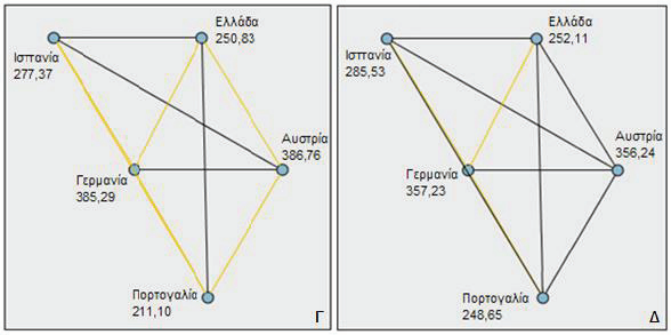
Εικόνα5. Αποδεκτή περίοδος αποπληρωμής ώστε να είναι κανείς πρόθυμος να πληρώσει για το σύστημα TESSe2b

3.2 Μη παραμετρικοί έλεγχοι Kruskal-Wallis

Για να γίνει έλεγχος σχετικά με την ύπαρξη στατιστικά σημαντικά διαφορών μεταξύ των διαφορετικών χωρών όσον αφορά τις απόψεις των συμμετεχόντων για τα κύρια ζητήματα υπό εξέταση, πραγματοποιήθηκαν μη παραμετρικοί έλεγχοι Kruskal-Wallis. Επιπλέον, προκειμένου να εντοπισθούν οι υπάρχουσες διαφορές ανά ζεύγη χωρών, εφαρμόσθηκαν σε όλες τις περιπτώσεις έλεγχοι posthoc. Τα αποτελέσματα των ελέγχων αυτών απεικονίζονται γραφικά στις Εικόνες 6 και 7. Στις περιπτώσεις που υπάρχει στατιστικά σημαντική διαφορά μεταξύ των απόψεων των συμμετεχόντων δύο χωρών, η ευθεία που ενώνει τις χώρες απεικονίζεται με κίτρινο χρώμα, ενώ στην αντίθετη περίπτωση το χρώμα της ευθείας είναι μαύρο. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των απόψεων των συμμετεχόντων όσον αφορά τα προσδοκώμενα οφέλη από τη χρήση του συστήματος TESSe2b (Εικόνα 6-Α), διαφορές βρέθηκαν να υπάρχουν μεταξύ των ζευγών Γερμανία/ Ελλάδα, Γερμανία/ Πορτογαλία, Γερμανία/ Ισπανία και Αυστρία/ Ισπανία. Μάλιστα, βάσει των τιμών μέσης κατάταξης (εμφανίζονται σε κάθε περίπτωση μετά το όνομα της κάθε χώρας), οι συμμετέχοντες από τη Γερμανία προσδοκούν λιγότερα οφέλη από τη χρήση του συστήματος TESSe2b σε σχέση με τους συμμετέχοντες από Ελλάδα, Ισπανία και Πορτογαλία, κάτι το οποίο ισχύει και για τους ερωτώμενους από την Αυστρία σε σχέση με αυτούς από την Ισπανία. Αντιστοίχως μπορούν να ερμηνευθούν και τα υπόλοιπα διαγράμματα.



Εικόνα 6.Συγκρίσεις ανά ζεύγη μεταξύ των χωρών όσον αφορά τα προσδοκώμενα οφέλη (Α) και την πρόθεση εγκατάστασης (Β) του συστήματος TESSe2b



Εικόνα 7.Συγκρίσεις ανά ζεύγη μεταξύ των χωρών όσον αφορά την προθυμία πληρωμής (Γ) και την αποδεκτή περίοδο αποπληρωμής (Δ) για το σύστημα TESSe2b

3.3 Υποδείγματα διατεταγμένων λογιστικών παλινδρομήσεων

Στους Πίνακες 5 έως και 8 παρουσιάζονται ανά χώρα τα υποδείγματα διατεταγμένων λογιστικών παλινδρομήσεων για τα υπό εξέταση θέματα που αφορούν το σύστημα TESSe2b. Σε κάθε περίπτωση παρουσιάζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν θετικά και σε στατιστικά σημαντικό επίπεδο την υπό εξέταση μεταβλητή. Επιπλέον, παρουσιάζονται και οι τιμές των κριτηρίων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την επιλογή των υποδειγμάτων με τη βέλτιστη προσαρμογή.

Πίνακας 5. Υποδείγματα διατεταγμένων λογιστικών παλινδρομήσεων, Γερμανία: Κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά της κατοικίας τα οποία επηρεάζουν θετικά τα υπό εξέταση θέματα που αφορούν το σύστημα TESSe2b

Προσδοκώμενα οφέλη	• δραστηριότητα στον ενεργειακό και/ή περιβαλλοντικό τομέα • κατασκευή μετά το 1949 • μηνιαίο εισόδημα μεταξύ 500 και 2.000€ • >5% του εισοδήματος δαπανάται για ενέργεια • όχι φοιτητής		
Model Fitting	**Goodness-of-Fit**	**Pseudo R-Square**	**Test of Parallel Lines**
-2 LL = 156.008	Pearson	Cox & Snell=0.360	-2 LL=132.501
χ^2 = 74.038	χ^2 =82.062	Nagelkerke=0.376	χ^2 = 23.507
p= 0.000	p= 1.000	McFadden= 0.142	p= 0.930
Πρόθεση εγκατάστασης	• μέτρηση της ενέργειας που καταναλώνεται για θέρμανση, ψύξη και ZNX • επένδυση σε θερμικά ενεργειακά συστήματα τα τελευταία 5 έτη • ηλεκτρική ενέργεια για θέρμανση χώρων • 5-10%του εισοδήματος δαπανάται για ενέργεια • ύπαρξη παιδιών στην κατοικία		
Model Fitting	**Goodness-of-Fit**	**Pseudo R-Square**	**Test of Parallel Lines**
-2 LL = 153.347	Pearson	Cox & Snell = 0.198	-2 LL = 124.095
χ^2 = 36.598	χ^2 = 90.281	Nagelkerke = 0.204	χ^2 = 29.252
p= 0.000	p= 0.993	McFadden= 0.063	p= 0.504
Πρόθεση πληρωμής (€)	• επένδυση σε θερμικά ενεργειακά συστήματα τα τελευταία 5 έτη • διαμονή σε μεγάλη πόλη ή προάστια • διαμονή σε ιδιόκτητη κατοικία • κατοικία>100m^2 • κατασκευή μεταξύ 1970 και 2009 • μηνιαίο εισόδημα>1.500€ • ελεύθερος επαγγελματίας		
Model Fitting	**Goodness-of-Fit**	**Pseudo R-Square**	**Test of Parallel Lines**
-2 LL = 197.585	Pearson	Cox & Snell = 0.266	-2 LL = 192.889
χ^2 = 51.103	χ^2= 120.448	Nagelkerke = 0.285	χ^2= 4.696
p= 0.000	p= 0.842	McFadden= 0.113	p= 1.000
Αποδεκτή περίοδος αποπληρωμής προκειμένου να είναι κανείς πρόθυμος να πληρώσει	•ελεύθερος επαγγελματίας •διαμονή σε ανεξάρτητη μονοκατοικία ή σε μονοκατοικία που εφάπτεται σε άλλες κατοικίες • κατοικία με 4 υπνοδωμάτια		
Model Fitting	**Goodness-of-Fit**	**Pseudo R-Square**	**Test of Parallel Lines**
-2 LL = 84.883	Pearson	Cox & Snell = 0.144	-2 LL = 67.972
χ^2 = 27.785	χ^2 = 29.150	Nagelkerke = 0.150	χ^2 = 16.911
p= 0.000	p= 0.405	McFadden= 0.049	p= 0.153

Πίνακας 6. Υποδείγματα διατεταγμένων λογιστικών παλινδρομήσεων, Ελλάδα: Κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά της κατοικίας τα οποία επηρεάζουν θετικά τα υπό εξέταση θέματα που αφορούν το σύστημα TESSe2b

Προσδοκώμενα οφέλη	• κατασκευή πριν το 1990 • δεν χρησιμοποιείται φυσικό αέριο ως πηγή θέρμανσης		
Model Fitting	**Goodness-of-Fit**	**Pseudo R-Square**	**Test of Parallel Lines**
-2 LL =110.869	Pearson	Cox & Snell = 0.068	-2 LL = 93.094
χ^2 = 11.161	χ^2 = 36.362	Nagelkerke = 0.071	χ^2 = 17.775
p= 0.025	p= 0.677	McFadden= 0.023	p= 0.337
Πρόθεση εγκατάστασης	• επένδυση σε θερμικά ενεργειακά συστήματα τα τελευταία 5 έτη • διαμονή σε ανεξάρτητη μονοκατοικία • μηνιαίο εισόδημα μεταξύ 2.500 και 3.000€		
Model Fitting	**Goodness-of-Fit**	**Pseudo R-Square**	**Test of Parallel Lines**
-2 LL =123.912	Pearson	Cox & Snell = 0.080	-2 LL =93.689

Πίνακας 6 – συνέχεια. Υποδείγματα διατεταγμένων λογιστικών παλινδρομήσεων, Ελλάδα: Κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά της κατοικίας τα οποία επηρεάζουν θετικά τα υπό εξέταση θέματα που αφορούν το σύστημα TESSe2b

χ^2 = 13.285	χ^2 = 49.807	Nagelkerke = 0.083	χ^2 = 30.223
p= 0.010	p= 0.707	McFadden= 0.024	p= 0.066
Πρόθεση πληρωμής (€)	• άνδρας • δραστηριότητα στον ενεργειακό και/ή περιβαλλοντικό τομέα • διαμονή σε αγρόκτημα ή σπίτι στην εξοχή • διαμονή σε ανεξάρτητη μονοκατοικία • δεν χρησιμοποιείται φυσικό αέριο για τη θέρμανση χώρων • δεν το θεωρούν δύσκολο να ανταπεξέλθουν στις υποχρεώσεις τους, βάσει του σημερινού τους εισοδήματος		
Model Fitting	**Goodness-of-Fit**	**Pseudo R-Square**	**Test of Parallel Lines**
-2 LL = 131.723	Pearson	Cox & Snell = 0.273	-2 LL = 129.426
χ^2 = 50.750	χ^2 =69.273	Nagelkerke = 0.304	χ^2 = 2.297
p= 0.000	p= 1.000	McFadden= 0.140	p= 1.000
Αποδεκτή περίοδος αποπληρωμής προκειμένου να είναι κανείς πρόθυμος να πληρώσει	• διαμονή σε αγρόκτημα ή σπίτι στην εξοχή • κατασκευή μεταξύ 1970 και 1989 ή μετά το 2005 • χρήση θερμικών ηλιακών συλλεκτών		
Model Fitting	**Goodness-of-Fit**	**Pseudo R-Square**	**Test of Parallel Lines**
-2 LL = 85.444	Pearson	Cox & Snell = 0.182	-2 LL = 79.071
χ^2 = 31.994	χ^2 = 29.215	Nagelkerke = 0.194	χ^2 = 6.373
p= 0.000	p= 0.558	McFadden= 0.071	p= 0.973

Πίνακας 7. Υποδείγματα διατεταγμένων λογιστικών παλινδρομήσεων, Πορτογαλία: Κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά της κατοικίας τα οποία επηρεάζουν θετικά τα υπό εξέταση θέματα που αφορούν το σύστημα TESSe2b

Προσδοκώμενα οφέλη	• διαμονή σε χωριό • κατοικία >100m^2 • κατασκευή πριν το 2000 • υψηλό μορφωτικό επίπεδο (Επαγγελματική Σχολή, AEI, TEI)		
Model Fitting	**Goodness-of-Fit**	**Pseudo R-Square**	**Test of Parallel Lines**
-2 LL=111.164	Pearson	Cox & Snell = 0.367	-2 LL = 89.038
χ^2 = 49.868	χ^2= 79.772	Nagelkerke = 0.387	χ^2 = 22.126
p= 0.000	p= 0.999	McFadden= 0.154	p= 0.775
Πρόθεση εγκατάστασης	• διαμονή σε ανεξάρτητη μονοκατοικία • κατασκευή πριν το 2000 • χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για παραγωγή ZNX • μηνιαίο εισόδημα>2.000€ • εκπαιδευτικό επίπεδο ανώτερο από απόφοιτου Επαγγελματικής Σχολής • ελεύθερος επαγγελματίας		
Model Fitting	**Goodness-of-Fit**	**Pseudo R-Square**	**Test of Parallel Lines**
-2 LL = 222.148	Pearson	Cox & Snell =0.380	-2 LL = 165.644
χ^2 = 51.580	χ^2 = 248.104	Nagelkerke = 0.395	χ^2 = 56.504
p= 0.000	p= 1.000	McFadden= 0.148	p= 0.604
Πρόθεση πληρωμής (€)	• κατοικία>100m^2 • μηνιαίο εισόδημα>3.000€ • >10% του εισοδήματος δαπανάται για ενέργεια • δεν απασχολείται στον δημόσιο τομέα		
Model Fitting	**Goodness-of-Fit**	**Pseudo R-Square**	**Test of Parallel Lines**
-2 LL = 77.515	Pearson	Cox & Snell = 0.214	-2 LL = 68.879
χ^2 = 26.195	χ^2= 38.275	Nagelkerke = 0.252	χ^2 = 8.635
p= 0.000	p= 0.784	McFadden= 0.128	p= 0.567

Πίνακας 7 - συνέχεια. Υποδείγματα διατεταγμένων λογιστικών παλινδρομήσεων, Πορτογαλία: Κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά της κατοικίας τα οποία επηρεάζουν θετικά τα υπό εξέταση θέματα που αφορούν το σύστημα TESSe2b

Αποδεκτή περίοδος αποπληρωμής προκειμένου να είναι κανείς πρόθυμος να πληρώσει	• επένδυση σε θερμικά ενεργειακά συστήματα τα τελευταία 5 έτη • κατοικία>100m^2 • χρήση για παραγωγή ZNX του ίδιου συστήματος που χρησιμοποιείται και για θέρμανση (κυρίως ηλεκτρική ενέργεια, πετρέλαιο θέρμανσης και φυσικό αέριο) • μηνιαίο εισόδημα >3.000€		
Model Fitting	**Goodness-of-Fit**	**Pseudo R-Square**	**Test of Parallel Lines**
-2 LL = 88.148	Pearson	Cox & Snell = 0.181	-2 LL = 74.747
χ^2 = 21.821	χ^2 = 26.874	Nagelkerke = 0.194	χ^2 = 13.401
p= 0.000	p= 0.944	McFadden= 0.072	p= 0.341

Πίνακας 8. Υποδείγματα διατεταγμένων λογιστικών παλινδρομήσεων, Ισπανία: Κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά της κατοικίας τα οποία επηρεάζουν θετικά τα υπό εξέταση θέματα που αφορούν το σύστημα TESSe2b

Προσδοκώμενα οφέλη	• επένδυση σε συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης κατά το προηγούμενο έτος • δεν διαμένει σε χωριό • κατοικία μεγαλύτερη από 100m^2		
Model Fitting	**Goodness-of-Fit**	**Pseudo R-Square**	**Test of Parallel Lines**
-2 LL=114.167	Pearson	Cox & Snell = 0.148	-2 LL = 91.694
χ^2 = 21.159	χ^2 = 66.840	Nagelkerke = 0.155	χ^2 = 22.473
p= 0.001	p= 0.834	McFadden= 0.052	p= 0.608
Πρόθεση εγκατάστασης	• επένδυση σε συστήματα ενεργειακής αποθήκευσης κατά το προηγούμενο έτος • δεν διαμένει σε χωριό • κατασκευή πριν το 2000 • χρήση ηλιακής ενέργειας για παραγωγή ZNX • >10% του εισοδήματος δαπανάται για ενέργεια • εκπαιδευτικό επίπεδο ανώτερο απόαπόφοιτου Επαγγελματικής Σχολής		
Model Fitting	**Goodness-of-Fit**	**Pseudo R-Square**	**Test of Parallel Lines**
-2 LL = 190.716	Pearson	Cox & Snell =0.253	-2 LL = 156.510
χ^2 = 38.482	χ^2 = 193.950	Nagelkerke = 0.261	χ^2 = 34.207
p= 0.000	p= 0.211	McFadden= 0.084	p= 0.506
Πρόθεση πληρωμής (€)	• κατοικία>2 υπνοδωμάτια • κατασκευή μεταξύ 1949 και 1989 • μηνιαίο εισόδημα>2.500€ • εκπαιδευτικό επίπεδο ανώτερο από απόφοιτος Λυκείου		
Model Fitting	**Goodness-of-Fit**	**Pseudo R-Square**	**Test of Parallel Lines**
-2 LL = 114.518	Pearson	Cox & Snell = 0.180	-2 LL = 108.013
χ^2 = 26.156	χ^2 = 70.624	Nagelkerke = 0.199	χ^2 = 6.505
p= 0.000	p= 0.524	McFadden= 0.084	p= 0.889
Αποδεκτή περίοδος αποπληρωμής προκειμένου να είναι κανείς πρόθυμος να πληρώσει	• άνδρας • κατοικία>2 υπνοδωμάτια • κατασκευή μεταξύ 1950 και 1989 • χρήση θερμικών ηλιακών συλλεκτών για θέρμανση • μηνιαίο εισόδημα>1.000€ • εκπαιδευτικό επίπεδο ανώτερο από απόφοιτος Λυκείου		
Model Fitting	**Goodness-of-Fit**	**Pseudo R-Square**	**Test of Parallel Lines**
-2 LL = 157.945	Pearson	Cox & Snell = 0.201	-2 LL = 157.448
χ^2= 29.627	χ^2 =125.469	Nagelkerke = 0.212	χ^2= 0.497
p= 0.000	p= 0.085	McFadden= 0.075	p= 1.000

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μια ηλεκτρονική έρευνα με χρήση ερωτηματολογίου διεξήχθη μεταξύ Ιουνίου 2016 και Φεβρουαρίου 2017, προκειμένου να αναλυθεί και να κατανοηθεί σε ποιο βαθμό το καινοτόμο σύστημα TESSe2b θα μπορούσε να υιοθετηθεί σε διαφορετικές χώρες της ΕΕ. Βάσει αυτού, διεξήχθη έρευνα συμπεριφοράς σε πέντε κράτη μέλη της ΕΕ (Αυστρία, Ελλάδα, Ισπανία, Πορτογαλία και Γερμανία). Τα ζητήματα που εξετάστηκαν αφορούσαν α) τις απόψεις των καταναλωτών σχετικά με τα ενδεχόμενα οφέλη της τεχνολογίας, β) τις απόψεις των καταναλωτών σχετικά με την ενδεχόμενη υιοθέτηση της τεχνολογίας, γ) την προθυμία πληρωμής (σε €) για την τεχνολογία και δ) την αποδεκτή περίοδο αποπληρωμής της επένδυσης ώστε να είναι κανείς πρόθυμος να πληρώσει για το σύστημα TESSe2b. Τα βασικά συμπεράσματα της παρούσας έρευνας, βάσει της περιγραφικής στατιστικής, είναι τα εξής:

- Η πλειοψηφία των ερωτηθέντων στα πέντε κράτη μέλη της ΕΕ έχει θετική άποψη για τα ενδεχόμενα οφέλη της τεχνολογίας, καθώς και για την υιοθέτηση του καινοτόμου συστήματος. Ένας από τους λόγους για τα σχετικά υψηλά επίπεδα αποδοχής είναι οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν για την προώθηση της έρευνας, οι οποίες οδήγησαν σε δείγμα με χαμηλό μέσο όρο ηλικίας, υψηλό μορφωτικό επίπεδο και σχετικό με την τεχνολογία και τα περιβαλλοντικά ζητήματα. Παρόλο που το δείγμα δεν είναι απολύτως αντιπροσωπευτικό του πληθυσμού, μπορεί να αποτελέσει μια καλή βάση για την εξέταση των παραγόντων που επηρεάζουν την υιοθέτηση της τεχνολογίας TESSe2b.
- Όσον αφορά το ποσό που είναι πρόθυμοι να πληρώσουν για το σύστημα TESSe2b στο μέλλον, οι περισσότεροι ερωτηθέντες επέλεξαν 0-3.000 € στην Ελλάδα και την Πορτογαλία, ενώ στην Αυστρία, τη Γερμανία και την Ισπανία, το πιο συνηθισμένο ποσό είναι μεταξύ 3.000 και 6.000 €.
- Όσον αφορά την αποδεκτή περίοδο αποπληρωμής που θα οδηγούσε τους ερωτηθέντες στο να είναι πρόθυμοι να πληρώσουν για τη τεχνολογία TESSe2b στο μέλλον, το πιο αποδεκτό διάστημα ήταν 3-5 χρόνια στην Ελλάδα, την Πορτογαλία και την Ισπανία. Στη Γερμανία, η επιθυμητή περίοδος αποπληρωμής ήταν 5-8 χρόνια, ενώ στην Αυστρία 8-10 χρόνια.

Μέσω του ελέγχου Kruskal-Wallis εξετάσθηκε το αν υπάρχουν στατιστικά σημαντικά διαφορές μεταξύ των πέντε χωρών όσον αφορά τις απόψεις των συμμετεχόντων για τα τέσσερα κύρια υπό εξέταση ζητήματα. Γενικά θα μπορούσε να λεχθεί ότι οι απόψεις των συμμετεχόντων δεν εμφανίζουν ιδιαίτερες διαφορές στην Ελλάδα, την Ισπανία και την Πορτογαλία. Αντιθέτως, και οι τρεις αυτές χώρες παρουσιάζουν αρκετές διαφορές με την Γερμανία. Από την άλλη, οι απόψεις των συμμετεχόντων από την Αυστρία τοποθετούνται μεταξύ της Γερμανίας και της ομάδας των τριών νότιων χωρών, χωρίς να παρουσιάζουν στατιστικά σημαντικά διαφορές με καμία από τις άλλες χώρες. Οι περισσότερες διαφορές μεταξύ των χωρών εμφανίζονται στο ερώτημα που αφορά την προθυμία πληρωμής για την εγκατάσταση του συστήματος TESSe2b.

Μέσω των αναλύσεων διατεταγμένης παλινδρόμησης εξετάστηκαν οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν τα υπό εξέταση ζητήματα. Τα βασικά κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά και τα χαρακτηριστικά της κατοικίας που διαπιστώθηκε ότι επηρεάζουν θετικά τα ζητήματα αυτά ήταν το εισόδημα, το ποσοστό του εισοδήματος που δαπανάται για ενέργεια, το μορφωτικό επίπεδο, προηγούμενες επενδύσεις σε σχετικές τεχνολογίες, επάγγελμα ή ενδιαφέροντα σχετικά με την ενέργεια ή το περιβάλλον και το μέγεθος της κατοικίας. Το έτος κατασκευής, η πηγή ενέργειας για θέρμανση του χώρου και η περιοχή διαμονής είναι πρόσθετοι παράγοντες με αντίκτυπο στα εξεταζόμενα θέματα.

Η παρούσα έρευνα προσφέρει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά των κατοίκων διαφορετικών ευρωπαϊκών χωρών όσον αφορά την υιοθέτηση της τεχνολογίας TESSe2b. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να αποτελέσουν βάση για την επιτυχή προώθηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας, αλλά και άλλων τεχνολογιών ΑΠΕ που προσφέρουν θέρμανση/ ψύξη και ΖΝΧ σε κατοικίες.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υποστηρίζεται από το έργο TESSe2b το οποίο έχει λάβει χρηματοδότηση από το πρόγραμμα έρευνας και καινοτομίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης Horizon 2020 βάσει του συμβολαίου μεΑριθ. 680555.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Isaacs, N., Camilleri, M., French, L., Pollard, A., Saville-Smith, K., Fraser, R., Rossouw, P., and Jowett, J., 2006, “Energy use in New Zealand households”, Report on the year 10 analysis for household energy end-use project (HEEP), pp. 77-78.

[2] Eurostat - European Commission, 2013, “Energy, transport and environmental indicators”, Luxembourg: Publication Office of the European Union.

[3] US Energy Information Administration, 2013, “International energy outlook 2013”, Washington (DC).

[4] Unander, F., Ettestøl, I., Ting, M., and Schipper, L., 2004, “Residential energy use: an international perspective on long-term trends in Denmark, Norway and Sweden”. Energ.. Policy, 32(12), pp. 1395-1404.

[5] O'Leary, F., Howley, M., and Gallachóir B.O., 2008, “Energy in the residential sector: 2008 report”, Cork, Ireland: Sustainable Energy Ireland.

[6] Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., and Pout, C., 2008, “A review on buildings energy consumption information”, Energ. Buildings, 40(3), pp. 394-398.

[7] Australian Bureau of Statistics, 2009, “Heating and cooling”, http://www.abs.gov.au/AUSSTATS/abs@.nsf/Lookup/1345.4Feature%20Article1Aug%202009(accessed November 2016).

[8] Hirl, B., 2011, “Residential energy consumption and efficiency trends”, Paper presented at EEDAL’ 11 Conference, Copenhagen, Denmark.

[9] Natural Resources Canada, 2011, “Energy efficiency trends in Canada 1990 to 2009”, http://oee.rncan.gc.ca/publications/statistics/trends11/chapter3.cfm (accessed November 2016).

[10] Statistics Finland, 2012, “Energy consumption in households 2011”, http://www.tilastokeskus.fi/til/asen/2011/asen_2011_2012-11-16_tie_001_en.html (accessed November 2016).

[11] Department of Energy & Climate Change, 2013, “Energy consumption in the UK”, https://www.gov .uk/government/collections/energy-consumption-in-the-uk (accessed November 2016).

[12] US Energy Information Administration, 2013, “Heating and cooling no longer majority of U.S. home energy use”, http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=10271 (accessed November 2016).

[13] Statistics Austria, 2015, “Energy consumption of households”, http://www.statistik.at/web_en/statistics/energy_environment/energy/energy_consumption_of_households/index.html#index1 (accessed November 2016)

[14] US Energy Information Administration, n.d., “Household energy use in California”, http://www.eia.gov/consumption/residential/reports/2009/state_briefs/pdf/ca.pdf (accessed November 2016).

[15] Hellenic Statistical Authority, 2013, “Survey on energy consumption in households 2011-2012”, Press release, October 29.

[16] Karytsas, S., and Choropanitis, I., 2017, “Barriers against and actions towards renewable energy technologies diffusion: A Principal Component Analysis for residential ground source heat pump (GSHP) systems”, Renew. Sust. Energ. Rev., 78, pp. 252-271.

[17] Berrens, R.P., Bohara, A.K., Jenkins-Smith, H., Silva, C., and Weimer, D.I., 2003, “The advent of internet surveys for political research: a comparison of telephone and internet samples”, Polit. Anal., 11, pp. 1-22.

[18] Malhotra, N., and Krosnick, J.A., 2007, “The effect of survey mode and sampling inferences about political attitudes and behaviour: comparing the 2000 and 2004 ANES to internet surveys with non-probability samples”, Polit. Anal., 15, pp. 286-323.

[19] Andrews, D., Nonnecke, B., and Preece, J., 2007,“Conducting research on the internet: Online survey design, development and implementation guidelines”.

[20] Karytsas, S., and Theodoropoulou, H., 2014,“Socioeconomic and demographic factors that influence publics' awareness on the different forms of renewable energy sources”. Renew. Energ.,71, pp. 480-485.

[21] Karytsas, S., and Theodoropoulou, H., 2014, “Public awareness and willingness to adopt ground source heat pumps for domestic heating and cooling”, Renew. Sust. Energ. Rev., 34, pp. 49-57.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΕΡΓΟΥ ESTMAP

Απόστολος Αρβανίτης

Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.), Αχαρναί, Αττική
e-mail: arvanitis@igme.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ιδέα της εποχιακής αποθήκευσης ενέργειας, σε διάφορες κλίμακες, προκαλεί το ενδιαφέρον σε Ευρωπαϊκό και γενικότερα διεθνές επίπεδο, αφού αποσκοπεί στην εξισορρόπηση μεταξύ ζήτησης και προσφοράς ενέργειας, τη διαχείριση του δικτύου, την ενεργειακή απόδοση, την ύπαρξη στρατηγικών αποθεμάτων και την εφεδρική τροφοδοσία για την απρόσκοπτη παροχή ενέργειας, οδηγώντας σε σημαντικά ενεργειακά, οικονομικά, περιβαλλοντικά και εθνικά οφέλη. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να είναι είτε υπέργεια (εγκαταστάσεις πάνω στην επιφάνεια του εδάφους) είτε υπόγεια (μέσα σε γεωλογικούς σχηματισμούς). Η επιλογή μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας αποθήκευσης εξαρτάται από το σκοπό της αποθήκευσης, τον τύπο της ενεργειακής πηγής, το είδος του ταμιευτήρα που είναι διαθέσιμος και το διαθέσιμο αποθηκευτικό χώρο. Τα συστήματα υπόγειας αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνουν τις ακόλουθες μορφές: (α) αποθήκευση φυσικού αερίου, (β) αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα, (γ) αποθήκευση υδρογόνου, (δ) υπόγεια αντλησιοταμίευση νερού και (ε) αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Γεωλογικές δομές, κατάλληλες για τα συστήματα αυτά είναι: (α) εξαντλημένοι ταμιευτήρες υδρογονανθράκων, (β) υδροφορείς - παγίδες με κακή ποιότητα νερού, (γ) αλατούχοι σχηματισμοί και έγκοιλα, (δ) εγκαταλελειμμένα ορυχεία, (ε) υπάρχοντα ανθρωπογενή (τεχνητά) έγκοιλα και (στ) γεωλογικοί σχηματισμοί ευνοϊκοί για τη διάνοιξη τεχνητών εγκοίλων. Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Έργου ESTMAP (Energy Storage Mapping and Planning), στο οποίο συμμετείχε το Ι.Γ.Μ.Ε., αναζητήθηκαν δεδομένα για υπάρχουσες, δυνητικές και μελλοντικές θέσεις αποθήκευσης ενέργειας τόσο σε εθνικό όσο και σε πανευρωπαϊκό επίπεδο, προκειμένου να δημιουργηθεί μια βάση με πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, να αναλυθούν και να αξιολογηθούν κατάλληλα από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Τα αποτελέσματα αυτής της προκαταρκτικής έρευνας παρουσιάζονται συνολικά στην παρούσα εργασία. Σε εθνικό επίπεδο προτάθηκαν συνολικά 37 θέσεις υπόγειας αποθήκευσης διαφόρων μορφών ενέργειας, και πιο συγκεκριμένα: (α) μια «σχεδιασμένη» θέση για μετατροπή του εξαντλημένου κοιτάσματος φυσικού αερίου South Kavala σε υπόγεια αποθήκη φυσικού αερίου και (β) 36 «δυνητικές» περιοχές που αφορούν θέσεις και γεωλογικές δομές για ενδεχόμενη αποθήκευση φυσικού αερίου, υδρογόνου, πεπιεσμένου αέρα, θερμικής ενέργειας και αντλησιοταμίευση νερού.

Λέξεις Κλειδιά: *υπόγεια αποθήκευση ενέργειας, υπόγεια αποθήκευση φυσικού αερίου, αποθήκευση υδρογόνου, υπόγεια αποθήκευση θερμικής ενέργειας, υπόγεια αντλησιοταμίευση νερού*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μετάβαση προς ένα καθαρό και χαμηλού άνθρακα ενεργειακό σύστημα θα συνοδεύεται από εκτεταμένες αλλαγές στα σχήματα παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας λόγω της προβλεπόμενης μεγάλης αύξησης των διαλειπουσών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο ενεργειακό σύστημα. Αυτές οι μεταβολές απαιτούν λύσεις προκειμένου να διασφαλισθεί αξιόπιστη, καθαρή και προσιτή οικονομικά ενέργεια για όλους τους πολίτες και τις βιομηχανίες της Ευρώπης. Μεταξύ άλλων, η αποθήκευση ενέργειας θα διαδραματίσει κεντρικό ρόλο στην παροχή της απαραίτητης ευελιξίας και την προσφορά επιλογών εξισορρόπησης στο ολοκληρωμένο ενεργειακό σύστημα [1]. Η ιδέα της εποχιακής αποθήκευσης ενέργειας, σε διάφορες κλίμακες, προκαλεί ήδη το ενδιαφέρον σε Ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο, αφού αποσκοπεί στην εξισορρόπηση μεταξύ ζήτησης και προσφοράς ενέργειας, τη διαχείριση του δικτύου, την ενεργειακή απόδοση, την ύπαρξη στρατηγικών αποθεμάτων και την εφεδρική τροφοδοσία για την απρόσκοπτη παροχή ενέργειας, οδηγώντας σε σημαντικά ενεργειακά, οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

Σε γενικές γραμμές, η αποθήκευση ενέργειας περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα [2, 3]: (α) Εισαγωγή ενέργειας από πηγή είτε ορυκτών καυσίμων (π.χ. δίκτυο φυσικού αερίου) είτε ηλεκτρική (π.χ. δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ή ανεμογεννήτριες) είτε θερμική (π.χ. θερμότητα βιομηχανικών αποβλήτων). (β) Προαιρετική μετατροπή σε μορφή ενέργειας κατάλληλη για αποθήκευση. (γ) Αποθήκευση του (μετατραπέντος) ενεργειακού πόρου (φόρτιση), (δ) Απελευθέρωση του ενεργειακού πόρου (εκφόρτιση), (ε) Προαιρετική μετατροπή σε μορφή ενέργειας που είναι κατάλληλη για μεταφορά ή εφαρμογή και (στ) Έξοδος σε δίκτυο ή τελικό χρήστη. Η επιλογή μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας αποθήκευσης εξαρτάται από το σκοπό της αποθήκευσης, τον τύπο της ενεργειακής πηγής και το διαθέσιμο αποθηκευτικό χώρο. Τα βήματα μετατροπής της ενέργειας που μπορεί να απαιτούνται κατά την είσοδο ή/και την έξοδο εξαρτώνται από το είδος της ενέργειας, την τεχνολογία αποθήκευσης και τη λειτουργία εξόδου της αποθήκευσης. Υπάρχουν πολλές παράμετροι που σχετίζονται άμεσα με την αποθήκευση ενέργειας και καθορίζουν τη λειτουργία του χώρου αποθήκευσης και τη συμβολή του στο ενεργειακό σύστημα, εκ των οποίων οι κυριότερες είναι: (α) η συνολική αποθηκευτική ικανότητα (χωρητικότητα), (β) η λειτουργική χωρητικότητα ή ωφέλιμος χώρος αποθήκευσης, που συμβάλει στην εκφόρτιση της αποθήκευσης, (γ) ο ρυθμός παραγωγής ή διανομής της ενέργειας στο δίκτυο ή τον τελικό χρήστη, (δ) ο ρυθμός εισαγωγής, δηλ. ο ρυθμός με τον οποίο ξαναγεμίζει ο ταμιευτήρας αποθήκευσης, (ε) ο χρόνος απόκρισης, δηλ. ο χρόνος (άμεσα ή μέχρι και μια ώρα) που χρειάζεται το σύστημα αποθήκευσης ώστε να φθάσει η απαιτούμενη απόδοση ενέργειας στο δίκτυο και ο χρόνος αυτός υπολογίζεται από τη στιγμή που ζητείται αυτή η απόδοση, (ε) η διάρκεια φορτίου, δηλ. ο μέγιστος χρόνος κατά τη διάρκεια του οποίου η αποθήκευση μπορεί να παρέχει έναν συνεχόμενο (μη διακοπτόμενο) ελάχιστο απαιτούμενο ρυθμό διανομής, και (στ) οι δαπάνες, δηλ. το κεφαλαιουχικό και λειτουργικό κόστος [2, 3].

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να είναι είτε υπέργεια (εγκαταστάσεις πάνω στην επιφάνεια του εδάφους) είτε υπόγεια (μέσα σε γεωλογικούς σχηματισμούς). Τα συστήματα υπόγειας αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνουν τις ακόλουθες μορφές: (α) αποθήκευση φυσικού αερίου, (β) αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα, (γ) αποθήκευση υδρογόνου, (δ) υπόγεια αντλησιοταμίευση νερού και (ε) αποθήκευση θερμικής ενέργειας. Γεωλογικές δομές, κατάλληλες για τα συστήματα αυτά είναι: (α) εξαντλημένοι ταμιευτήρες υδρογονανθράκων, (β) υδροφορείς - παγίδες με κακή ποιότητα νερού, (γ) αλατούχες δομές και έγκοιλα, (δ) εγκαταλελειμμένα ορυχεία, (ε) υπάρχοντα ανθρωπογενή (τεχνητά) έγκοιλα και (στ) γεωλογικοί σχηματισμοί ευνοϊκοί για τη διάνοιξη τεχνητών εγκοίλων. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας συνίστανται από τα ακόλουθα επιμέρους τμήματα: (α) επιφανειακές (υπάρχουσες ή μελλοντικές) εγκαταστάσεις με συγκεκριμένες λειτουργικές παραμέτρους που καθορίζουν την τεχνική και οικονομική επίδοση της αποθήκευσης μέσα στην ενεργειακή υποδομή με την οποία συνδέονται, (β) δίκτυα μεταφοράς και διανομής και (γ) υπόγειοι ταμιευτήρες. Η εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων μπορεί κάποιες φορές να παρεμποδισθεί από κάποιους επιφανειακούς περιορισμούς, όπως είναι π.χ. η ύπαρξη ορισμένων περιοχών Natura2000 [2, 3].

Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Έργου ESTMAP (**E**nergy **St**orage **Ma**pping and **P**lanning), που υλοποιήθηκε κατά την περίοδο Ιανουαρίου 2015 - Δεκεμβρίου 2016 και στο οποίο συμμετείχε το Ι.Γ.Μ.Ε. μέσω του Ευρωπαϊκού Δικτύου ENeRG, αναζητήθηκαν δεδομένα για υπάρχουσες, δυνητικές και μελλοντικές θέσεις αποθήκευσης ενέργειας, τόσο σε εθνικό όσο και σε πανευρωπαϊκό επίπεδο, προκειμένου να δημιουργηθεί μια βάση με πληροφορίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, να αναλυθούν και να αξιολογηθούν κατάλληλα από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή.

2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Τα συστήματα υπόγειας αποθήκευσης ενέργειας περιλαμβάνουν τις ακόλουθες μορφές: (α) αποθήκευση φυσικού αερίου, (β) αποθήκευση ενέργειας πεπιεσμένου αέρα, (γ) αποθήκευση υδρογόνου, (δ) υπόγεια αντλησιοταμίευση νερού και (ε) αποθήκευση θερμικής ενέργειας.

2.1. Αποθήκευση Φυσικού Αερίου (Natural Gas Storage, UGS)

Η υπόγεια αποθήκευση φυσικού αερίου αποτελεί μια ώριμη τεχνολογία, η οποία εφαρμόζεται σήμερα σε διάφορες θέσεις παγκοσμίως. Στην περίπτωση αυτή, το φυσικό αέριο μπορεί να εισαχθεί απευθείας από το δίκτυο και να εγχυθεί σε έναν υπόγειο ταμιευτήρα, όπως εξαντλημένο πεδίο φυσικού αερίου, αλατούχο ή και άλλο τεχνητό έγκοιλο ή υδροφορέα. Σε περίοδους υψηλής ζήτησης, το φυσικό αέριο παράγεται από τον ταμιευτήρα της αποθήκευσης και εισάγεται άμεσα πάλι στο δίκτυο μεταφοράς και τροφοδοσίας. Η αποθήκευση φυσικού αερίου αναπτύσσεται σε διάφορες κλίμακες, που εξυπηρετούν διαφορετικές απαιτήσεις, όπως (α) η αποθήκευση αιχμής, σε μικρούς ταμιευτήρες (συχνά αλατούχα έγκοιλα ή μικρά εξαντλημένα πεδία φυσικού αερίου), απαραίτητους για την εξισορρόπηση περιόδων υψηλών απαιτήσεων διάρκειας μερικών ωρών μέχρι μερικών ημερών και (β) η εποχιακή αποθήκευση σε μεγάλους υδροφορείς ή εξαντλημένους ταμιευτήρες υδρογονανθράκων (πετρελαίου, φυσικού αερίου) που αναπτύσσεται για να εξισορροπήσει περιόδους μερικών εβδομάδων έως μηνών. Μερικές θέσεις αποθήκευσης ενσωματώνονται στα εθνικά δίκτυα διανομής φυσικού αερίου, ενώ άλλες θέσεις λειτουργούν με ανοικτή πρόσβαση προς τρίτα μέρη, τα οποία μπορούν να μισθώσουν τμήμα της χωρητικότητάς τους [2, 3]. Σήμερα, στην Ευρώπη, βρίσκονται σε λειτουργία 170 θέσεις υπόγειας αποθήκευσης φυσικού αερίου, εκ των οποίων 88 σε εξαντλημένα πεδία, 53 σε αλατούχα έγκοιλα, 27 σε υδροφορείς και 2 σε άλλες θέσεις. Οι περισσότερες θέσεις βρίσκονται στη Γερμανία (61) και ακολουθούν η Γαλλία (21) και η Ιταλία (13) [4, 5].

2.2. Αποθήκευση Ενέργειας Πεπιεσμένου Αέρα (Compressed Air Energy Storage, CAES)

Μια εγκατάσταση αποθήκευσης ενέργειας πεπιεσμένου αέρα (CAES) μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική χρησιμοποιώντας ηλεκτρικές αντλίες για τη συμπίεση του αέρα. Οι συμπιεστές κινούνται με την πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια, η οποία προέρχεται από ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά ή μονάδες ηλεκτροπαραγωγής βασικού φορτίου (π.χ. μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα) σε περιόδους εκτός αιχμής. Ο πεπιεσμένος αέρας μπορεί να αποθηκευθεί προσωρινά υπόγεια μέσα σε (α) αλατούχα έγκοιλα (κυρίως), (β) διαμορφούμενες με εκσκαφή κοιλότητες σε σχηματισμούς σκληρών πετρωμάτων, ορυκτού άλατος ή ασβεστολίθων, (γ) εξαντλημένους ταμιευτήρες φυσικού αερίου και (δ) δομικές παγίδες σε πορώδεις υδροφορείς. Σημειώνεται ότι, μεταξύ των επιλογών αυτών, η εκσκαφή των κοιλοτήτων είναι πολύ δαπανηρή, ενώ υψηλοί ρυθμοί ροής σε υδροφορείς και ταμιευτήρες είναι δύσκολο να επιτευχθούν εξαιτίας των περιορισμών του πορώδους και της διαπερατότητας. Σε περιόδους φορτίου αιχμής, ο πεπιεσμένος αέρας απελευθερώνεται (εκτόνωση) προκειμένου να τροφοδοτηθούν στρόβιλοι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Όλες οι μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις CAES, που υπάρχουν σήμερα, αναπτύσσονται σε αλατούχα έγκοιλα, τα οποία παρέχουν τους απαιτούμενους υψηλούς ρυθμούς ροής για βέλτιστη επίδοση και αποτελεσματικότητα [2, 3]. Ως παραδείγματα αναφέρονται τρεις μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις CAES που χρησιμοποιούν αλατούχα έγκοιλα για αποθήκευση: (α) δύο (2) στο Huntorf της Γερμανίας, χωρητικότητας 150.000 m^3 το κάθε κυλινδρικό έγκοιλο και σε βάθος 600-800m με ισχύ 290 MW και διάρκεια 2-3 ώρες [6] και (β) στο McIntosh των Η.Π.Α., όγκου 538.000 m^3 σε βάθος 450-750m με ισχύ 110 MW και διάρκεια περίπου 26 ώρες [7, 8].

2.3. Αποθήκευση Υδρογόνου (Hydrogen Storage, HES)

Η αποθήκευση υδρογόνου μπορεί να εφαρμοστεί ως μια από τις λύσεις για την αποτελεσματική ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο ενεργειακό σύστημα. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης χρησιμοποιώντας την πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια από διαλείπουσες πηγές, όπως είναι η ηλιακή και η αιολική ενέργεια.Το υδρογόνο μπορεί να διοχετευθεί στο κανονικό δίκτυο φυσικού αερίου είτε άμεσα είτε μετά τη μετατροπή σε συνθετικό αέριο (syngas), ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για ηλεκτροπαραγωγή ή μεταφορές. Εξαιτίας του μικρού του μοριακού βάρους, το υδρογόνο διαχέεται εύκολα και, επομένως, απαιτούνται ταμιευτήρες αποθήκευσης με επαρκή στεγανά πετρώματα. Η υπόγεια αποθήκευση υδρογόνου μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σε εξαντλημένα πεδία φυσικού αερίου και υδροφορείς με αλατούχα στεγανά πετρώματα είτε σε τεχνητά κατασκευασμένα έγκοιλα (αλατούχα και μη). Μέχρι σήμερα, λίγες θέσεις αποθήκευσης υδρογόνου έχουν καταγραφεί, όπως κοντά στο Teeside του Ηνωμένου Βασιλείου και στο Texas των Η.Π.Α. [2, 3, 9, 10]. Στο Teeside, η αποθήκευση υδρογόνου τέθηκε σε λειτουργία το

1972 και περιέχει τρία έγκοιλα σε στρωματώδες άλας με αποθηκευτικό όγκο για κάθε έγκοιλο περίπου 70.000 m^3 και σε βάθος 350m [2, 3, 6]. Το 1983, η θέση αποθήκευσης υδρογόνου του Clemens δημιουργήθηκε σε αλατούχο δόμο, σε βάθος 900m, με αποθηκευτικό όγκο 580.000 m^3 [2, 10]. Το 2007, η θέση Moss Bluff στις Η.Π.Α. κατασκευάσθηκε σε αλατούχο δόμο, βάθους 800m, με αποθηκευτικό όγκο 560.000 m^3 [2]. Αυτές οι θέσεις αποθήκευσης, ωστόσο, εξυπηρετούν την πετροχημική βιομηχανία [2].

2.4. Υπόγεια Αντλησιοταμίευση Νερού (Underground Pumped Hydro Storage, UPHS)

Στην υπόγεια αντλησιοταμίευση νερού (UPHS) χρησιμοποιείται ηλεκτρική ενέργεια για να αντληθεί νερό από έναν χαμηλότερο σε έναν υψηλότερο υψομετρικά ταμιευτήρα και ανακτάται ενέργεια, αφού επιτρέπεται στο νερό να ρέει προς τα πίσω, δηλ. από τον υψηλότερο προς το χαμηλότερο ταμιευτήρα και μέσω στροβίλων να παράγεται ενέργεια. Ο ένας ή και οι δύο ταμιευτήρες νερού, χαμηλότερος και υψηλότερος υψομετρικά, αναπτύσσονται υπόγεια, είτε σε διαμορφούμενες με εκσκαφή κοιλότητες είτε σε εγκατελελειμμένα ορυχεία. Η βαρυτική ενέργεια καθορίζεται είτε από την υψομετρική διαφορά των δύο ταμιευτήρων (συνηθέστερα) είτε με τη χρήση μεγάλων εμβόλων [2, 3]. Εξαιτίας του υψηλού κόστους ανάπτυξης ενός τέτοιου συστήματος, αυτή η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη σε πειραματικό στάδιο. Μια πιλοτική μονάδα 650 kW λειτουργεί στη Δημοκρατία της Τσεχίας (ορυχείο Jeremenko κοντά στην Ostrava), ενώ μια πιλοτική μονάδα ισχύος 500 MW σχεδιάζεται στην Εσθονία [3, 11].

2.5. Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας (Thermal Energy Storage, TES)

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας (TES) καλύπτει ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών τεχνολογιών, οι οποίες διακρίνονται στις ακόλουθες κατηγορίες: (α) Αποθήκευση Αισθητής Θερμότητας (Sensible Heat Storage, SHS), όπου η αποθήκευση θερμότητας επιτυγχάνεται με τη μεταφορά της θερμότητας στο μέσο αποθήκευσης (στερεό ή υγρό) και την άνοδο της θερμοκρασίας του. (β) Αποθήκευση Λανθάνουσας Θερμότητας (Latent Heat Storage, LHS), όπου θερμότητα απορροφάται ή απελευθερώνεται από ένα μέσο/υλικό το οποίο υφίσταται αλλαγή φάσης (Phase Change Material, PCM), δηλ. από στερεή σε υγρή ή από υγρή σε αέρια ή αντίστροφα. (γ) Θερμοχημική Αποθήκευση (Thermo-chemical Storage, TCM), όπου η ενέργεια αποθηκεύεται ή εκλύεται μέσω θερμοχημικών αντιδράσεων. Σήμερα, τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (TES) βασίζονται στην Αποθήκευση Αισθητής Θερμότητας (SHS), που είναι εμπορικά διαθέσιμα, ενώ τα συστήματα TCS και LHS με βάση PCMs είναι κυρίως υπό ανάπτυξη και επίδειξη [2, 3].

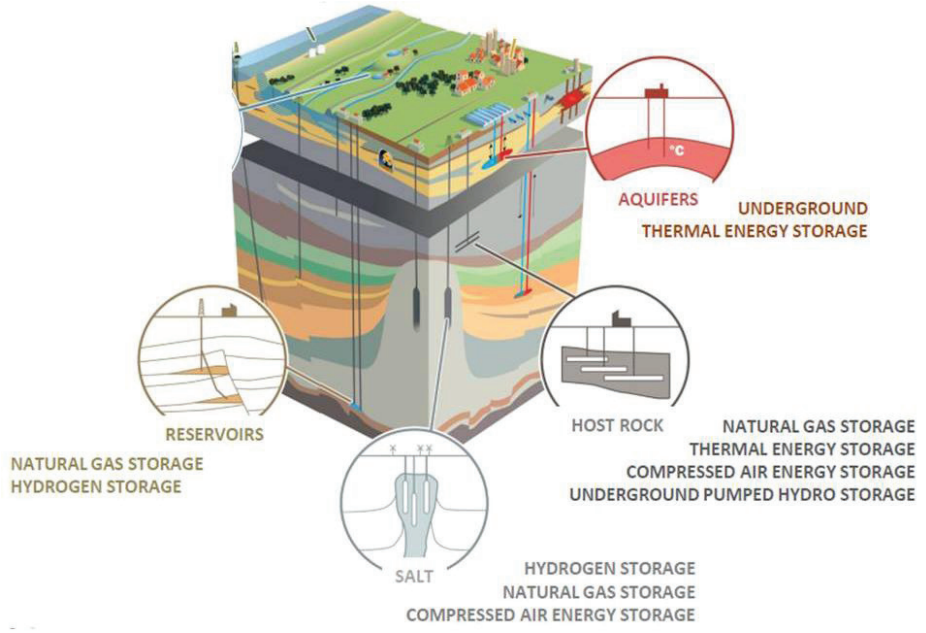
Η Αποθήκευση Αισθητής Θερμότητας (SHS) αναπτύσσεται σε μεγάλης κλίμακας συστήματα υπόγεια και περιλαμβάνει τις ακόλουθες μορφές:
(α) Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας σε Υδροφορέα (Aquifer Thermal Energy Storage, ATES). Πρόκειται για σύστημα ανοιχτού βρόχου, που χρησιμοποιεί ένα φυσικό υπόγειο υδροπερατό στρώμα ως μέσο για την αποθήκευση θερμικής ενέργειας και υπόγειου νερού καθώς και ως φορέα θερμικής ενέργειας. Ο υδροφορέας βρίσκεται μεταξύ αδιαπέρατων στρωμάτων. Στην περίπτωση αυτή, η ενέργεια είτε μπορεί να εγχυθεί σε υδροφορείς είτε να εξαχθεί από αυτούς, χρησιμοποιώντας μία η περισσότερες γεώτρησης έγχυσης και παραγωγής (που απέχουν σημαντικά μεταξύ τους για αποτροπή θερμικής σύζευξης) συνδεδεμένων με υδραυλικές αντλίες και εναλλάκτες θερμότητας. Η τεχνική αυτή μπορεί να συνδυασθεί με τις Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας (ΓΑΘ), οπότε, στην περίπτωση αυτή, το χειμώνα, το νερό αντλείται από τις θερμότερες γεωτρήσεις και το ψυχθέν νερό εισάγεται στις ψυχρότερες, ενώ το καλοκαίρι ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία. Η ATES είναι η γεωθερμική τεχνολογία με την υψηλότερη ενεργειακή απόδοση, αλλά βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις σωστές ιδιότητες και συνθήκες του υδροφορέα (πάχος, θερμοχωρητικότητα). Επίσης, είναι ευνοϊκή για μεγάλης κλίμακας αποθήκευση ενέργειας, π.χ. σε εποχική βάση [2, 3]. Στην Ευρώπη, υπάρχουν αρκετές εκατοντάδες συστήματα ATES σε συνδυασμό με ΓΑΘ, τα περισσότερα εκ των οποίων βρίσκονται στην Ολλανδία (1976 στα τέλη του 2015) και ακολουθούν η Σουηδία (160 στα τέλη του 2015), το Βέλγιο και η Δανία, και χρησιμοποιούνται για θέρμανση-ψύξη μεγάλων κτηριακών συγκροτημάτων (νοσοκομεία, γραφεία, αεροδρόμια, μουσεία, ξενοδοχεία, διαμερίσματα) [12, 13].
(β) Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας σε Γεώτρηση (Borehole Thermal Energy Storage, BTES). Πρόκειται για σύστημα κλειστού βρόχου, το οποίο αποθηκεύει θερμική ενέργεια στο υπέδαφος χρησιμοποιώντας γεωεναλλάκτες θερμότητας στο εσωτερικό γεωτρήσεων (μερικές φορές άνω των 100 γεωτρήσεων). Η BTES δεν περιορίζεται σε συγκεκριμένες θέσεις ταμιευτήρα, όπως οι υδροφορείς. Είναι κατάλληλη για εφαρμογές μικρής και μεγάλης κλίμακας ανάλογα με τον αριθμό των εγκατεστημένων γεωεναλλακτών θερμότητας. Αυτή η τεχνολογία καθιστά δυνατή την αποθήκευση θερμότητας, η οποία π.χ. αποσπάται από ένα κτήριο κατά τη θερινή περίοδο ή συλλέγεται μέσω ηλιακών συλλεκτών και στη συνέχεια επαναχρησιμοποιείται κατά τη χειμερινή περίοδο [2, 3]. Τα

συστήματα BTES στην Ευρώπη είναι ιδιαίτερα αναπτυγμένα στη Σουηδία (650 στα τέλη του 2015), Γερμανία και Ολλανδία (100 στα τέλη του 2015) [12, 13].

(γ) Αποθήκευση Θερμικής Ενέργειας σε Έγκοιλα (Cavern Thermal Energy Storage, CTES). Στην περίπτωση αυτή, θερμό/ψυχρό νερό αποθηκεύεται υπόγεια σε μεγάλους ταμιευτήρες, όπως είναι τεχνητά έγκοιλα σε πετρώματα και εγκαταλελειμμένα ορυχεία. Η CTES έχει το πλεονέκτημα να παρέχει, στις περισσότερες περιπτώσεις, υψηλή ισχύ φόρτισης/αποφόρτισης απλά με την ταχύτερη άντληση νερού μέσα στα έγκοιλα και έξω από τα έγκοιλα. Εξαιτίας του υψηλού επενδυτικού κόστους, υπάρχει σήμερα ένας πολύ μικρός αριθμός εφαρμογών [2, 3]. Τέτοια συστήματα υπάρχουν, για παράδειγμα, στη Σουηδία (Lyckebo με αποθηκευτικό όγκο 115.000 m^3 και θερμοκρασία αποθήκευσης 60-90^oC, Avesta με όγκο 15.000 m^3) [14].

3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΠΟΓΕΙΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Γεωλογικές δομές, κατάλληλες για την ανάπτυξη συστημάτων υπόγειας αποθήκευσης ενέργειας είναι οι ακόλουθες: (α) εξαντλημένοι ταμιευτήρες υδρογονανθράκων, (β) αλατούχοι σχηματισμοί και έγκοιλα, (γ) εγκαταλελειμμένα ορυχεία και λοιπά τεχνητά (ανθρωπογενή) έγκοιλα σε γεωλογικούς σχηματισμούς, ευνοϊκούς για τη διάνοιξή τους και (δ) υδροφορείς - παγίδες με κακή ποιότητα νερού. Η πραγματική καταλληλότητα ενός συγκεκριμένου γεωλογικού σχηματισμού ή μιας θέσης για ορισμένο τύπο αποθήκευσης ενέργειας πρέπει να προσδιορίζεται από λεπτομερείς έρευνες και περιλαμβάνει πρόσθετα επιχειρήματα σε τεχνικά κριτήρια [3].



Εικόνα 1: Συνολική παρουσίαση υπόγειων θέσεων κατάλληλων για αποθήκευση ενέργειας με αναγραφή των αντίστοιχων μορφών αποθηκευόμενης ενέργειας [15]

3.1. Εξαντλημένοι ταμιευτήρες υδρογονανθράκων

Οι εξαντλημένοι ταμιευτήρες υδρογονανθράκων αντιπροσωπεύουν συγκεκριμένα τμήματα ενός πορώδους σχηματισμού (συχνά ψαμμίτες και ανθρακικά πετρώματα) μέσα στον οποίο έχει παγιδευθεί πετρέλαιο ή φυσικό αέριο και στη συνέχεια παράγεται. Αυτοί οι ταμιευτήρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση φυσικού αερίου [3]. Οι εξαντλημένοι ταμιευτήρες υδρογονανθράκων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση φυσικού αερίου (ώριμη

τεχνολογία) καθώς και την αποθήκευση ενέργειας πεπιεσμένου αέρα ή υδρογόνου (ενδεχόμενες/υπό διερεύνηση και μελλοντικες τεχνολογίες) [2, 3].

3.2. Αλατούχοι σχηματισμοί και έγκοιλα

Οι αλατούχοι σχηματισμοί αντιστοιχούν σε πετρώματα που αποτελούνται από το ορυκτό αλίτη (NaCl) ή γενικά ορυκτό αλάτι και έχουν σχηματισθεί ως αποτέλεσμα εξάτμισης αλμυρών νερών, κυρίως μέσα σε (ημι)περιορισμένες λεκάνες. Το πάχος των αλατούχων στρωμάτων κυμαίνεται από μερικά εκατοστά (cm) έως εκατοντάδες μέτρα (m). Οι φυσικοί κύκλοι των εβαποριτών συχνά περιλαμβάνουν την απόθεση ανυδρίτη/γύψου καθώς και ανθρακικών πετρωμάτων, που εναλλάσονται με τα αλατούχα στρώματα. Το αλάτι χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά χαμηλή διαπερατότητα και θεωρείται διαπέρατο για τις περισσότερες ουσίες, με αποτέλεσμα να διασφαλίζει την πολύ καλή συγκράτηση και απομόνωση των αποθηκευόμενων ρευστών, είτε ευρισκόμενο ως πέτρωμα-κάλυμμα πάνω από έναν ταμιευτήρα είτε με τη δημιουργία ενός εγκοίλου μέσα σ' αυτό. Οι αλατούχοι σχηματισμοί χαρακτηρίζονται από χαμηλή πυκνότητα σε σχέση με άλλα ιζηματογενή πετρώματα και αυτή η διαφορά πυκνότητας σε συνδυασμό με την πλαστικο-ιξώδη συμπεριφορά τους σε υψηλές τιμές θερμοκρασίας και πίεσης έχει οδηγήσει τοπικά σε ροή άλατος και σχηματισμό ανυψώσεων και στηλών άλατος, που μερικές φορές φτάνουν σε ύψος αρκετών km πάνω από την αρχική βάση του αλατούχου στρώματος (φαινόμενα διαπειρισμού). Όταν το ρέον αλάτι ανέρχεται σε διαστήματα βάθους λιγότερο από περίπου 2.000-1.500m, γίνεται πιο σταθερό και κατάλληλο για την ανάπτυξη εγκοίλων. Τα αλατούχα έγκοιλα δημιουργούνται με τη διαδικασία της εξόρυξης με διάλυση, κατά την οποία γλυκό νερό εγχέεται μέσω μιας γεώτρησης σε έναν αλατούχο σχηματισμό με σκοπό τη διάλυση του άλατος και, στη συνέχεια, η προκύπτουσα άλμη εξάγεται, διαμορφώνοντας έτσι σταδιακά ένα έγκοιλο κυλινδρικού σχήματος. Αυτά τα έγκοιλα βρίσκονται συνήθως σε βάθη 200-2.000m και είναι επιμήκη, με ύψος αρκετών εκατοντάδων και διάμετρο μερικών δεκάδων μέτρων (m), ενώ ο όγκος του μπορεί να είναι αρκετές εκατοντάδες χιλιάδες m^3. Η σταθερότητα των εγκοίλων παρακολουθείται περιοδικά [2, 3]. Οι αλατούχες δομές με/χωρίς υπάρχοντα έγκοιλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση φυσικού αερίου (ώριμη τεχνολογία), υδρογόνου ή ενέργειας πεπιεσμένου αέρα (δοκιμασμένες τεχνολογίες) [2, 3].

3.3. Εγκαταλελειμμένα ορυχεία και λοιπά τεχνητά έγκοιλα

Τα ορυχεία (έγκοιλα εξόρυξης) αποτελούνται από μία ή περισσότερες υπόγειες στοές, που έχουν εκσκαφεί σε πετρώματα και βρίσκονται σε βάθη 70-200m. Για την επιλογή τους ως χώρων αποθήκευσης πρέπει να πληρούνται τα ακόλουθα κριτήρια: (i) Το πέτρωμα που φιλοξενεί το έγκοιλο θα πρέπει να είναι αδιαπέρατα και χωρίς διαρρήξεις ώστε να περιορίζεται η διαρροή. (ii) Το πέτρωμα θα πρέπει να είναι αρκετά σκληρό, ώστε να απαιτείται ελάχιστη έως καθόλου τεχνητή στήριξη της οροφής του εγκοίλου για δεδομένες διαστάσεις. Όσο πιο σκληρό είναι το πέτρωμα, τόσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του εγκοίλου που μπορεί να κατασκευασθεί. (iii) Το πέτρωμα θα πρέπει να είναι ομοιόμορφο και να έχει ελάχιστες έως καθόλου διακλάσεις, ρήγματα και άλλες ασυνέχειες (π.χ. ζώνη διάτμησης). Αυτό επηρεάζει την αντοχή του πετρώματος, τη δυνητική διαρροή και τις διαστάσεις των υπόγειων ανοιγμάτων. (iv) Για οικονομικούς λόγους, το πέτρωμα θα πρέπει να μπορεί να εκσκαφεί εύκολα. (v) Οι αργιλικοί σχίστες και οι ιλυόλιθοι είναι τα πιο ευνοϊκά ιζηματογενή πετρώματα επειδή είναι αδιαπέρατα και είναι σχετικά εύκολο να εκσκαφούν. Όμως, αυτά τα πετρώματα απαιτούν εκτενή τεχνητά υποστηρίγματα, όπως κοχλίες οροφής. (vi) Τα πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα είναι αδιαπέρατα, ώστε να μπορούν να σχηματίσουν στεγανά έγκοιλα, και αρκετά σκληρά προκειμένου να μπορούν να στηρίξουν μόνα τους τις οροφές των εγκοίλων. Μεγάλα έγκοιλα μπορούν να κατασκευασθούν σε τέτοιους τύπους πετρωμάτων [2, 3].

Η διαφυγή του αποθηκευμένου προϊόντος (ενέργειας) αποτρέπεται με βάση την αρχή της υδραυλικής συγκράτησης: τα έγκοιλα βρίσκονται σε τέτοιο βάθος που η υδροστατική πίεση του υδροφόρου ορίζοντα είναι μεγαλύτερη από την πίεση του αποθηκευμένου προϊόντος. Υπάρχει, συνεπώς, μια βαθμίδα πίεσης προς το εσωτερικό του εγκοίλου που αποτρέπει τη μετανάστευση του αποθηκευμένου προϊόντος. Η πίεση του νερού στο πέτρωμα μπορεί να ενισχυθεί τεχνητά με ειδικά συστήματα τροφοδοσίας νερού, «τα παραπετάσματα νερού». Μια κατηγορία των εγκοίλων εξόρυξης είναι τα «επενδυμένα έγκοιλα εξόρυξης», στα οποία χρησιμοποιείται ειδική μεμβράνη ανάσχεσης και συγκράτησης [2, 3]. Τα υφιστάμενα τεχνητά έγκοιλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση φυσικού αερίου, θερμικής ενέργειας ή την υπόγεια αντλησιοταμίευση νερού (δοκιμασμένες τεχνολογίες) καθώς και την αποθήκευση πεπιεσμένου αέρα ή υδρογόνου (ενδεχόμενες/υπό διερεύνηση και μελλοντικές τεχνολογίες) [2, 3].

Τα κλασσικά ορυχεία δημιουργούνται για την εκσκαφή πολύτιμων ορυκτών πρώτων υλών και άνθρακα. Οπότε, ο σχεδιασμός τους γενικά δεν διέπεται από τα κριτήρια για την υπόγεια αποθήκευση.

Μερικά, όμως, από τα εγκαταλελειμμένα ορυχεία μπορεί να είναι κατάλληλα για υπόγεια αντλησιοταμίευση νερού ή για αποθήκευση θερμικής ενέργειας (π.χ. αποθήκευση θερμικής ενέργειας νερού σε ορυχείο στη Νότια Ολλανδία) [2, 3].

3.4. Υδροφορείς

Οι υδροφορείς είναι πορώδεις γεωλογικοί σχηματισμοί που φέρουν νερό, το οποίο σε μεγάλα βάθη είναι κυρίως αλμυρό. Οι υδροφορείς συχνά εκτείνονται σε μεγάλες περιοχές, έκτασης δεκάδων έως εκατοντάδων km^2, όπου το βάθος, το πάχος και οι λιθολογικές ιδιότητές τους μπορεί να παρουσιάζουν σημαντική διαφοροποίηση. Αυτές οι διακυμάνσεις εξαρτώνται κυρίως από την ανάπτυξη της γεωλογικής λεκάνης (π.χ. σχήμα, μέγεθος, ρυθμός βύθισης), τα περιβάλλοντα απόθεσης (π.χ. ποτάμιο, θαλάσσιο, αιολικό, χερσαίο, λιμναίο) και τη γεωλογική και τεκτονική εξέλιξη της περιοχής μετά την απόθεση. Τα κενά των πόρων ενός υδροφορέα είναι κατάλληλα για αποθήκευση σε περιοχές όπου ο υδροφορέας στεγανοποιείται από ένα αδιαπέρατο πέτρωμα-κάλυμμα (π.χ. αλάτι, ανυδρίτη, αργίλους, μάργες) και όπου οι τεκτονικές κινήσεις και οι στρωματογραφικές διατάξεις οδηγούν στη δημιουργία τοπικών γεωλογικών παγίδων. Η καταλληλότητα ενός υδροφορέα για δυνητική αποθήκευση πρέπει να αποδεικνύεται και να δοκιμάζεται μέσω συστηματικής και λεπτομερούς γεωλογικής έρευνας [2, 3]. Οι υδροφορείς και παγίδες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση φυσικού αερίου ή θερμικής ενέργειας (ώριμες τεχνολογίες αποθήκευσης) καθώς και για την αποθήκευση υδρογόνου (ενδεχόμενη/υπό διερεύνηση και μελλοντική τεχνολογία αποθήκευσης). Στην περίπτωση της αποθήκευσης φυσικού αερίου, απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα αερίου βάσης και μεγαλύτερη παρατήρηση της επίδοσης απόληψης και έγχυσης, ενώ τα ποσοστά απόληψης μπορούν να ενισχυθούν με την παρουσία ενός ενεργού μηχανισμού εξώθησης με νερό [2, 3].

4. ΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΕΡΓΟ ESTMAP: ΣΤΟΧΟΣ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το Έργο ESTMAP (**E**nergy **St**orage **Ma**pping and **P**lanning), που χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή μέσω του χρηματοδοτικού προγράμματος Horizon 2020, ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2015 και ολοκληρώθηκε το Δεκέμβριο του 2016. Συντονιστής του Έργου ήταν το TNO (the Netherlands Organization for Applied Scientific Research, Ολλανδία), με εταίρους το BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Γαλλία), την CGS (Czech Geological Survey, Τσεχία), το ECOFYS και το VITO (Flemish Institute for Technological Research, Βέλγιο) και με τη συμμετοχή Γεωλογικών Ινστιτούτων, Ερευνητικών, Ακαδημαϊκών και Τεχνολογικών Κέντρων από όλη σχεδόν την Ευρώπη, μέσω των δικτύων ENeRG και EuroGeoSurveys [1, 15, 16]. Από ελληνικής πλευράς, συμμετείχε το Ι.Γ.Μ.Ε. μέσω του δικτύου ENeRG. Στα πλαίσια του Έργου ESTMAP έγιναν τα πρώτα σημαντικά βήματα για την εκτίμηση του δυναμικού της υπόγειας αποθήκευσης ενέργειας στην Ευρώπη [1].

Κύριος στόχος του Έργου ESTMAP ήταν η ανάπτυξη μιας γεωγραφικής βάσης δεδομένων με πληροφορίες για υφιστάμενες και πιθανές μελλοντικές θέσεις αποθήκευσης ενέργειας (υπόγειες και υπέργειες) στην Ευρώπη, ώστε αυτή η βάση να χρησιμοποιηθεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή προκειμένου να πραγματοποιηθούν αναλύσεις πάνω Ευρωπαϊκό ενεργειακό σύστημα. Το Έργο περιελάμβανε τρία κύρια στοιχεία: (α) συλλογή και σύνθεση των διαθέσιμων δημόσιων χωρικών πληροφοριών για υπάρχουσες θέσεις αποθήκευσης ενέργειας και το δυναμικό για μελλοντικές θέσεις, (β) ανάπτυξη και συμπλήρωση μιας εναρμονισμένης χωρικής βάσης δεδομένων, ικανής να διατηρεί, ενσωματώνει και διαχέει αυτές τις πληροφορίες, και (γ) επίδειξη του τρόπου με τον οποίον η βάση δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μελέτες μοντελοποίησης πανευρωπαϊκών και περιφερειακών ενεργειακών συστημάτων [1, 16].

Στη βάση δεδομένων του Έργου ESTMAP, μια θέση αποθήκευσης ενέργειας περιγράφεται από δύο αλληλένδετα τμήματα [3, 16]: (α) την επιφανειακή και συνδεδεμένη με το δίκτυο εγκατάσταση αποθήκευσης, η οποία είναι υπεύθυνη για τη λειτουργία και ρύθμιση της πρόσληψης, μετατροπής και εξόδου της ενέργειας, με όλες τις περιγραφικές παραμέτρους (όνομα εγκατάστασης, τοποθεσία, τύπος αποθήκευσης, βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά, στάδιο ανάπτυξης, σύνδεση δικτύου, τεχνικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν την επίδοση της εγκατάστασης, χαρακτηριστικά των δαπανών της εγκατάστασης, πηγή και ποιότητα δεδομένων) και (β) έναν ή περισσότερους φυσικούς ή τεχνητούς ταμιευτήρες αποθήκευσης. Ενώ οι υφιστάμενες θέσεις αποθήκευσης καλύπτουν κάποιον συγκεκριμένο τύπο τεχνολογίας, οι δυνητικές-μελλοντικές θέσεις περιλαμβάνουν πολλαπλές επιλογές, στην περίπτωση που ο ταμιευτήρας είναι κατάλληλος για την ανάπτυξη αυτών, με βάση τα χαρακτηριστικά του [16].

Για κάθε υπόγειο ταμιευτήρα αποθήκευσης, πολλές παράμετροι περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων του ESTMAP. Οι κατηγορίες παραμέτρων με τους επιμέρους προσδιορισμούς είναι οι ακόλουθοι [2, 3]:
(α) Ταυτότητα του ταμιευτήρα. Περιλαμβάνονται όνομα, σύντομος κωδικός, μοναδικό αλφαριθμητικό αναγνωριστικό (ID), αναγνωριστικό ID της συνδεδεμένης με αυτόν επιφανειακής εγκατάστασης.
(β) Τοποθεσία και γεωμετρία του ταμιευτήρα. Περιλαμβάνονται γεωμετρία-GIS (πολύγωνο), χωρική ιεραρχία (καθορισμός του επιπέδου ακρίβειας, συγκεκριμενοποίηση της δεδομένης γεωμετρίας και χωρικός καθορισμός, δηλ. αν είναι περιφερειακά ή τοπικά καθορισμένος με καταχωρήσεις «μοναδικός», «συνδεδεμένος», «συσσωρευμένος», «ομάδα», «περιφερειακός»), γεωγραφικό πλάτος και γεωγραφικό μήκος του κέντρου του ταμιευτήρα (σε σύστημα συντεταγμένων ETRS-89), κωδικός χώρας, καθώς και ονόματα πολιτείας/επαρχίας, πόλης, γεωλογικής περιοχής και γεωλογικής δομής που σχετίζονται με τον ταμιευτήρα για τη διευκόλυνση των χωρικών επιλογών.
(γ) Χαρακτηρισμός ταμιευτήρα. Περιλαμβάνει τον κύριο τύπο του ταμιευτήρα (π.χ. υδροφορέας, αλατούχος σχηματισμός, εξαντλημένος ταμιευτήρας, εγκαταλελειμμένο ορυχείο, κλπ), τον υποτύπο του ταμιευτήρα (π.χ. φυσικού αερίου/πετρελαίου, παγίδα, στρώμα/στήλη/δόμος άλατος, ορυχείο μεταλλεύματος/άνθρακα κλπ), τη λιθοστρωματογραφία, το επίπεδο λιθοστρωματογραφίας (π.χ. υπερομάδα, ομάδα, υπο-ομάδα, σχηματισμός, στρώμα, σύμπλεγμα, λιθολογικός ορίζοντας), τη χρονοστρωματογραφία, την κύρια λιθολογία (π.χ. ψαμμίτης, ιλυόλιθος, ασβεστόλιθος, αλάτι, γρανίτης κλπ), τη λιθολογία του στεγανού πετρώματος που καλύπτει ή περιβάλλει τον ταμιευτήρα (π.χ. αλάτι, αργιλόλιθος, γύψος/ανυδρίτης κλπ) και το ρευστό πλήρωσης του ταμιευτήρα (π.χ. πετρέλαιο, φυσικό αέριο, γλυκό νερό, άλμη, υδρογόνο, αέρα).
(δ) Ιδιότητες του ταμιευτήρα (ανά τύπο). Περιλαμβάνονται όλες οι εγγενείς και φυσικές ιδιότητες του, δηλ. οι διαστάσεις (βάθος, πάχος, ύψος, έκταση), ο συνολικός όγκος, ο συνολικός όγκος των πόρων, το καθαρό πορώδες, ο συνολικός όγκος εγκοίλων, ο συνολικός όγκος εξορυσσόμενου πετρώματος, ο συνολικός επί τόπου όγκος του φυσικού αερίου/πετρελαίου αρχικά, ο αναμενόμενος τελικός ανακτήσιμος όγκος φυσικού αερίου/πετρελαίου, ο αριθμός των εγκοίλων, η διαπερατότητα, η μεταβιβαστικότητα, η παραγωγικότητα, η πίεση, η θερμοκρασία και η επί τόπου θερμότητα. Κάθε τιμή μπορεί να οριστεί ως μέση, ελάχιστη ή μέγιστη. Επιπλέον, παρέχεται και μια ένδειξη για το επίπεδο εμπιστοσύνης (εικασία, εκτίμηση, αξιολόγηση, μέτρηση, κατά προσέγγιση).
(ε) Εκτιμήσεις αποθήκευσης. Ανάλογα με τον τύπο του ταμιευτήρα και τη μορφή αποθηκευόμενης ενέργειας, υπάρχει καταχωρημένη εκτίμηση η οποία περιλαμβάνει τη σκοπιμότητα (αποδεδειγμένη, πιθανή, δυνητική, υποθετική, ακατάλληλη), το επίπεδο εμπιστοσύνης (εικασία, εκτίμηση, αξιολόγηση, προσέγγιση, μέτρηση), την πηγή (βιβλιογραφική αναφορά) και το σήμα ποιότητας της εκτίμησης. Εκτός αυτών, υπάρχει και μια εκτίμηση παραμέτρων αναμενόμενης επίδοσης, όπως είναι ο συνολικός όγκος, ο ωφέλιμος όγκος, ο όγκος βάσης, ο λόγος του ωφέλιμου όγκου προς τον όγκο βάσης και το συνολικό ποσό της ισοδύναμης ηλεκτρικής ενέργειας για τις περιπτώσεις αποθήκευσης φυσικού αερίου, υδρογόνου και πεπιεσμένου αέρα. Επίσης, εκτιμώνται η συνολική θερμική χωρητικότητα καθώς και η μέση θερμική χωρητικότητα ανά μονάδα έκτασης του ταμιευτήρα στην περίπτωση της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας καθώς και ο συνολικός όγκος νερού, ο ωφέλιμος αντλούμενος όγκος νερού και το συνολικό ποσό της ισοδύναμης ηλεκτρικής ενέργειας στην περίπτωση της αντλησιοταμίευσης νερού. Στις περιπτώσεις όπου καταχωρούνται - ως δεδομένα - συγκεκριμένες τιμές, αυτές μπορεί να είναι μέσες, ελάχιστες ή μέγιστες.
(στ) Καθεστώς ανάπτυξης του ταμιευτήρα αποθήκευσης. Στην κατηγορία αυτή καταγράφονται όλες οι πληροφορίες που σχετίζονται με την ανάπτυξη του ταμιευτήρα, όπως η διαθεσιμότητα, η τρέχουσα κατάσταση και η σχεδιαζόμενη ανάπτυξή του (π.χ. εκτός παραγωγής, εγκαταλελειμμένος, παραγωγή φυσικού αερίου/πετρελαίου/άλατος, εξόρυξη, αποθήκευση φυσικού αερίου/αποβλήτων/CO_2/νερού/άλμης/αζώτου/πεπιεσμένου αέρα/υδρογόνου/θερμότητας), το όνομα του φορέα λειτουργίας ή του κατόχου άδειας λειτουργίας, η αδειοδότηση, η ιδιοκτησία, το έτος ολοκλήρωσης της τρέχουσας δραστηριότητας ή άδειας, το όνομα της εγκατάστασης αποθήκευσης, η σύνδεση με το δίκτυο (π.χ. φυσικού αερίου, πετρελαίου, ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας κλπ) και ο αριθμός των γεωτρήσεων. Υπάρχει χώρος για να επισημανθούν κάποιοι περιορισμοί που σχετίζονται με περιοχές Natura2000, προστασία υπόγειων νερών, αστική ανάπτυξη, άλλοι επιφανειακοί περιορισμοί, αντικρουόμενες δραστηριότητες (π.χ. εξόρυξη, γεωθερμία, υδρογονάνθρακες, παραγωγή άλατος, έγχυση κλπ) ή εναλλακτικές χρήσεις (π.χ. γεωλογική αποθήκευση CO_2).
(ζ) Ποιότητα δεδομένων και ανίχνευση. Πρόκειται για μια διαχειριστική κατηγορία της βάσης, όπου περιγράφονται η πηγή (βιβλιογραφία), η ποιότητα και η ημερομηνία των πληροφοριών που περιλαμβάνονται σε ένα συγκεκριμένο ταμιευτήρα αποθήκευσης.

Η βάση δεδομένων του ESTMAP καλύπτει συνολικά 33 χώρες της Ευρώπης, μεταξύ των οποίων κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, κράτη της Ευρωπαϊκής Ζώνης Ελευθέρων Συναλλαγών (EFTA), κράτη της Ενεργειακής Κοινότητας και την Τουρκία. Στα πλαίσια του Έργου συλλέχθηκαν όλα

τα διαθέσιμα και δημόσια δεδομένα για υφιστάμενες και μελλοντικές δυνητικές υπόγειες θέσεις αποθήκευσης περιλαμβάνοντας τις παραμέτρους και τα χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων, που προαναφέρθηκαν. Συμπληρώθηκαν όλα τα υποχρεωτικά πεδία δεδομένων με σωστή μορφή και πρότυπα (δεδομένα κατανεμημένα σε διάφορα φύλλα σε αρχείο μορφής Excel), λαμβάνοντας υπόψη λεπτομερείς οδηγίες, ενώ κάποιες πληροφορίες έχουν παραμείνει ενδεικτικές. Εκτός από τα δεδομένα σε μορφή Excel, περαιτέρω χωρικές πληροφορίες για τη θέση και την έκταση των ταμιευτήρων αποθήκευσης παρέχονται σε αρχεία GIS (shape files σε προβολικό σύστημα ETRS89), τα οποία συνδέονται με τις πληροφορίες του Excel μέσω μοναδικών αλφαριθμητικών αναγνωριστικών (Object_ID). Όταν δεν μπορεί να παρασχεθούν τα χαρακτηριστικά του περιγράμματος των υπόγειων χαρακτηριστικών, η θέση αντιπροσωπεύεται από τις συντεταγμένες ενός κατά προσέγγιση μέσου σημείου [3].

Μετά τη συγκέντρωση των πληροφοριών από τις διάφορες χώρες, έγινε ο κύριος έλεγχος της ποιότητάς τους, που περιελάμβανε την αναγνώριση της εσωτερικής συνοχής των σχετικών παραμέτρων, τη διασφάλιση της ορθής χρήσης των αριθμητικών δεδομένων, τη συμπλήρωση πληροφοριών για την εκτίμηση του δυναμικού αποθήκευσης, την επαλήθευση και επεξεργασία των δεδομένων GIS. Ακολούθησαν τροποποιήσεις και αναθεωρήσεις, όπου ήταν απαραίτητο. Μια δεύτερη διαδικασία ελέγχου ποιότητας πραγματοποιήθηκε με τη δοκιμή φόρτωσης στο μοντέλο της βάσης δεδομένων ESTMAP και όπου εντοπίσθηκαν προβλήματα μονάδων, μη έγκυρων ή ασυνεπών καταχωρήσεων, μη συμβατών μηκών ή χαρακτήρων στα πεδία καταχώρησης κλπ έγιναν οι αναγκαίες βελτιώσεις. Καθώς τα δεδομένα προετοιμάσθηκαν για εισαγωγή στην ανάλυση των ενεργειακών συστημάτων, έγιναν αναθεωρήσεις και προσαρμογές, συμπεριλαμβανομένων ορισμένων προσθηκών στο μοντέλο δεδομένων, όπως διορθώσεις σφαλμάτων στις μετατροπές των μονάδων, φιλτράρισμα μη φυσιολογικών τιμών, επεκτάσεις κάποιων κατηγοριών πληροφοριών, προσθήκη νέων κατηγοριών τιμών για καθορισμούς σκοπιμότητας και συμπλήρωση τυχόν ελλειπουσών τιμών, προσθήκη και επικαιροποίηση των συνδέσμων μεταξύ των επιφανειακών εγκαταστάσεων και των ταμιευτήρων αποθήκευσης, ορισμός και προσθήκη ενός πεδίου καθεστώτος χρήσης και προσθήκη νέων τιμών [3].

Η χωρική βάση δεδομένων GIS με τις υπάρχουσες και δυνητικες θέσεις αποθήκευσης, τόσο τις υπόγειες όσο και υπέργειες, και τις χωρητικότητες για μελλοντική μεγάλης κλίμακας κεντρική αποθήκευση ενέργειας εφαρμόζεται σε αναλύσεις πανευρωπαϊκών και περιφερειακών ενεργειακών συστημάτων. Για την προετοιμασία αυτών των αναλύσεων τα δεδομένα υποβλήθηκαν σε επεξεργασία προκειμένου (α) να διασφαλισθεί ότι τα χαρακτηριστικά κόστους και επίδοσης των υφιστάμενων εγκαταστάσεων συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις των εργαλείων ανάλυσης TIMES και PowerFys και (β) να μεταφρασθούν οι πληροφορίες των δυνητικών ταμιευτήρων αποθήκευσης σε παραμετροποιημένες μελλοντικές εγκαταστάσεις αποθήκευσης με βάση τα δεδομένα και τις βιβλιογραφικές τιμές των αποκαλούμενων γενικών σχεδίων πλασματικής ανάπτυξης [16].

Τα δεδομένα για μεγάλης κλίμακας δυναμικό αποθήκευσης από 28 κράτη-μέλη της ΕΕ που συλλέχθησαν στη βάση του ESTMAP και ελέγχθηκαν ποιοτικά, συνδέθηκαν με το ευρύτερο ενεργειακό σύστημα, αναλύθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση του ενεργειακού συστήματος με παράδειγμα εφαρμογής το έτος 2050 [16]. Στην ανάλυση αυτή δόθηκε έμφαση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την κεντρική αποθήκευση και το ρόλο της στο δίκτο μεταφοράς καθώς και τη ζήτηση. Έγινε συνδυαστική χρήση των GIS και των μοντέλων TIMES και PowerFys. Ο συνδυασμός των μοντέλων TIMES και PowerFys επιτρέπει τόσο τη βελτιστοποίηση της διαμόρφωσης των θέσεων αποθήκευσης και των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής όσο και τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας αυτών των εγκαταστάσεων [15]. Ως πρώτο βήμα, οι δαπάνες σύνδεσης των εγκαταστάσεων στη βάση δεδομένων του ESTMAP με το διασυνδεδεμένο δίκτυο έχουν υπολογισθεί χρησιμοποιώντας μοντελοποίηση GIS. Ως δεύτερο βήμα, η λειτουργικότητα της βάσης δεδομένων δοκιμάσθηκε στη μοντελοποίηση ενεργειακών συστημάτων χρησιμοποιώντας το μοντέλο TIMES, το οποίο υπολογίζει μια οικονομική βέλτιστη διαμόρφωση του συνολικού ενεργειακού συστήματος μέχρι το 2050. Στη συνέχεια, ένα πιο λεπτομερές μοντέλο TIMES με υψηλότερη χρονική ανάλυση έχει χρησιμοποιηθεί για καλύτερη γνώση σε πιο λεπτομερές επίπεδο σε μια περιοχή αποτελούμενη από τη Γερμανία, την Ολλανδία και το Βέλγιο. Τα αποτελέσματα της βέλτιστης διαμόρφωσης των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και αποθήκευσης του περιφερειακού μοντέλου TIMES για το έτος 2050 χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα εισόδου για το μοντέλο PowerFys, το οποίο έχει υπολογίσει τη βέλτιστη αποστολή και λειτουργία του μελλοντικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα το λειτουργικό κόστος [16]. Τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης επιτρέπουν την επιλογή τεχνολογιών και θέσεων αποθήκευσης με βάση τη βελτιστοποίηση του κόστους, όμως επηρεάζονται από τους μηχανισμούς που περιγράφονται από τα μοντέλα, καθώς και από τις βασικές παραδοχές και τα δεδομένα εισαγωγής και, συνεπώς, θεωρούνται ως παράδειγμα [15]. Εντούτοις, η άσκηση μοντελοποίησης δείχνει ότι η βάση δεδομένων του ESTMAP μπορεί να

συνδυασθεί με επιτυχία και να εφαρμοσθεί για ολοκληρωμένη εργασία μοντελοποίησης του ενεργειακού συστήματος [16]. Τα αποτελέσματα αποτελούν εξαιρετικό σημείο εκκίνησης για την περαιτέρω διερεύνηση των δυνητικών ρόλων της αποθήκευσης ενέργειας στον πραγματικό κόσμο, χαλαρώνοντας τις εξιδανικευμένες παραδοχές και τις αναλύσεις ευαισθησίας [15] και καταδεικνύουν ότι τα προκύπτοντα από την ανάλυση του ενεργειακού συστήματος εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από βασικές παραμέτρους της τεχνολογίας αποθήκευσης (π.χ. προβλέψεις κόστους). Η ρύθμιση της βάσης δεδομένων επιτρέπει τη μεταβολή και επικαιροποίηση αυτών των παραμέτρων. Το Έργο ESTMAP παρέχει μια άριστη εργαλειοθήκη, με ευέλικτη ρύθμιση [16], για περαιτέρω ποσοτικοποίηση του ρόλου της μεγάλης κλίμακας αποθήκευσης ενέργειας, την εκτίμηση βασικών κινητήριων μοχλών, παραγόντων και κινδύνων [15] και τη μελλοντική μοντελοποίηση του ενεργειακού συστήματος [16].

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟΥ ΕΡΓΟΥ ESTMAP ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΥΠΟΓΕΙΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

5.1. Αποτελέσματα του Ευρωπαϊκού Έργου ESTMAP σε Πανευρωπαϊκό επίπεδο

Η βάση δεδομένων του ESTMAP περιλαμβάνει πληροφορίες και δεδομένων 4.271 ταμιευτήρων αποθήκευσης (υπόγειων και υπέργειων) από 33 χώρες της Ευρώπης, που είτε χρησιμοποιούνται είτε μπορούν να χρησιμοποιηθούν μελλοντικα [3, 16]. Από αυτούς, οι 1.513 ταμιευτήρες είναι υπόγειοι, εκ των οποίων οι 493 (μέγιστος αριθμός) καταγράφονται στη Γερμανία. Η κατανομή των υπόγειων ταμιευτήρων έχει ως εξής: 599 ταμιευτήρες υδρογονανθράκων, 307 υδροφορείς, 289 αλατούχοι σχηματισμοί, 128 εγκατελειμμένα ορυχεία, 122 αλατούχα έγκοιλα, 63 φιλοξενούντα πετρώματα και 5 έγκοιλα εξόρυξης [3, 17].

Οι ταμιευτήρες υδρογονανθράκων συνιστούν ένα συνήθη και ευρέως διαδεδομένο τύπο ταμιευτήρα στην Ευρώπη. Οι περισσότερες θέσεις εντοπίζονται στη Γερμανία, την Αυστρία, την Ολλανδία και την Πολωνία. Η κυρίαρχη τεχνολογία αποθήκευσης σ' αυτούς τους ταμιευτήρες είναι η αποθήκευση φυσικού αερίου (UGS), με ποσοστό >30% εξ αυτών να βρίσκονται είτε σε φάση ανάπτυξης είτε σε φάση σχεδιασμού για την ανάπτυξή τους. Η αποθήκευση υδρογόνου (HES) θεωρείται ως μια καλή εναλλακτική λύση, αλλά η καταλληλότητα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη στεγανότητα. Σχεδόν οι μισές θέσεις παρουσιάζουν έχουν σχετικά καλές ενδείξεις διαθέσιμης χωρητικότητας (π.χ. συνολικός ή ωφέλιμος όγκος). Για τις υπόλοιπες μισές δεν υπάρχουν προσδιορισμοί χωρητικότητας, πιθανότατα εξαιτίας θεμάτων εμπιστευτικότητας [3, 15, 17].

Οι υδροφορείς αποτελούν έναν, επίσης, συνήθη και ευρέως διαδεδομένο τύπο υπόγειου ταμιευτήρα στην Ευρώπη. Περίπου οι μισές από τις θέσεις καθορίζουν ένα δυναμικό για συγκεκριμένη θέση. Γι' αυτές τις καταχωρήσεις, υπάρχει - σε πολλές περιπτώσεις - μια σχετικά καλή ένδειξη της διαθέσιμης χωρητικότητας. Οι άλλες μισές αφορούν περιφερειακούς σχηματισμούς χωρίς προσδιορισμούς της χωρητικότητας και του δυναμικού για τις συγκεκριμένες θέσεις. Στην περίπτωση αυτή, οι εκτιμήσεις της χωρητικότητας είτε κυρίως απουσιάζουν είτε προσδιορίζονται σε πολύ περιορισμένο βαθμό (έκταση, πάχος). Αυτοί οι υδροφορείς μπορούν να θεωρηθούν ως περιοχές ενδιαφέροντος για περαιτέρω έρευνα και επιβεβαίωση του δυναμικού. Η βασική τεχνολογία αποθήκευσης για τους υδροφορείς είναι η αποθήκευση φυσικού αερίου (UGS), με ποσοστό περίπου 10% για βεβαιωμένες και πιθανές θέσεις και 30% για δυνητικές, ενώ ως δεύτερη συνήθης τεχνολογία εμφανίζεται η υπόγεια αποθήκευση θερμότητας (UTES), με ποσοστό περίπου 3% για βεβαιωμένες και πιθανές θέσεις και περίπου 50% για δυνητικές. Συχνά, η αποθήκευση υδρογόνου (HES) εμφανίζεται ως πεδίο περαιτέρω έρευνας βάσει γεωλογικών κριτηρίων. Επίσης, εκτός από την αποθήκευση ενέργειας, οι υδροφορείς είναι συχνά ανταγωνιστικοί στόχοι για γεωλογική αποθήκευση CO_2 ή αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας [3, 15, 17].

Οι αλατούχοι σχηματισμοί και τα σχετιζόμενα με αυτούς έγκοιλα συνιστούν ιδιαίτερους βασικούς στόχους για αποθήκευση φυσικού αερίου (UGS), υδρογόνου (HES) και πεπιεσμένου αέρα (CAES). Η καταλληλότητά τους έγκειται στη δυνατότητα να κατασκευαστούν ειδικά έγκοιλα για το σκοπό της αποθήκευσης, τις επιλογές για κλιμάκωση της αποθηκευτικής ικανότητας (πολλαπλά έγκοιλα), την πολύ καλή στεγανότητα του άλατος και τη δυνατότητα επίτευξης υψηλής ρυθμών εισόδου/εξόδου. Μειονέκτημα είναι ότι η ανάπτυξη αλατούχων εγκοίλων στηρίζεται σε σημαντικό βαθμό στις τοπικές υπεδαφικές συνθήκες, όπως επαρκές πάχος ομοιογενούς άλατος σε βάθος 300-2.000m, που δεν είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές στην Ευρώπη. Ευνοϊκές συνθήκες εμφανίζονται στις λεκάνης της ΒΔ Ευρώπης και ιδιαίτερα στη Γερμανία, όπου έχουν καταγραφεί πολλές αλατούχες δομές (232 θέσεις αλατούχων σχηματισμών, 54 θέσεις αλατούχων εγκοίλων). Η πιο συνήθης τεχνολογία που εφαρμόζεται είναι η αποθήκευση φυσικού αερίου (>70% για βεβαιωμένες και πιθανές θέσεις αλατούχων εγκοίλων και

περίπου 7% για βεβαιωμένες και πιθανές θέσεις αλατούχων σχηματισμών). Οι καταχωρήσεις στη βάση δεδομένων είναι κυρίως τοπικά καθορισμένες και περιλαμβάνουν στις περισσότερες περιπτώσεις ενδείξεις καλής χωρητικότητας (ωφέλιμοι όγκοι αερίων, όγκοι εγκοίλων). Οι περιφερειακής έκτασης σχηματισμοί χρήζουν περαιτέρω αναγνώρισης και επιβεβαίωσης των κατάλληλων θέσεων [3, 15, 17].

Οι βραχώδεις (σκληροί) σχηματισμοί και τα έγκοιλα σ' αυτούς συνιστούν αραιά κατανεμημένες θέσεις κατάλληλες για αποθήκευση ενέργειας στην Ευρώπη. Σημαντικοί ανασταλτικοί παράγοντες ανάπτυξης αυτών είναι το κόστος και οι τεχνικές δυσκολίες. Η Νορβηγία έχει πολλούς βραχώδεις σχηματισμούς που χρησιμοποιούνται για υπόγεια αποθήκευση θερμότητας (UTES). Οι χωρητικότητες είναι σαφώς καθορισμένες, σε ποσοστό περίπου 70% (αποθηκευτική ικανότητα θερμικής ενέργειας). Τα έγκοιλα των σκληρών πετρωμάτων αναπτύσσονται περιστασιακά και για υπόγεια αποθήκευση φυσικού αερίου [3, 17].

Τα εγκαταλελειμμένα ορυχεία θεωρούνται πρωτίστως δυνητικά υποψήφια στην Τσεχία (100 καταχωρημένες θέσεις) και τη Φινλανδία (16 καταχωρημένες θέσεις). Το συνολικό επίπεδο εκτίμησης εξακολουθεί να μην είναι ώριμο, ενώ οι παράμετροι για τον υπολογισμό της χωρητικότητας απουσιάζουν. Τα ορυχεία θεωρούνται ως χώροι για την υπόγεια αποθήκευση θερμικής ενέργειας (UTES) και υπάρχουν δύο θέσεις σε λειτουργία στην Ευρώπη σήμερα [3, 17].

Από τις καταχωρήσεις στη βάση δεδομένων προκύπτει ότι χώρες όπως η Ιρλανδία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Νορβηγία, η Εστονία, η Λιθουανία, η Ουκρανία, η Βουλγαρία, η Κροατία, η Αλβανία, η Ελλάδα και η Τουρκία παρουσιάζουν πολύ χαμηλά ποσοστά των μελλοντικών θέσεων αποθήκευσης σε σχέση με το συνολικό αριθμό των υπόγειων ταμιευτήρων. Σε πολλές χώρες υπάρχει μεγάλο ποσοστό θέσεων αποθήκευσης με καθορισμένο τοπικό δυναμικό. Η προκαταρκτική αναγνώριση δυνητικών περιοχών αποθήκευσης, λόγω των ευνοϊκών γεωλογικών συνθηκών, αποτελεί ένα πρώτο βήμα για συστηματική διερεύνηση συγκεκριμένων θέσεων. Συγκεκριμένες λειτουργικές ικανότητες (π.χ. όγκοι ωφέλιμων αερίων, χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας και θερμότητας) καθορίζονται πλήρως σε λίγες μόνον χώρες, κυρίως εκεί όπου υπάρχουν υφιστάμενες ή σχεδιαζόμενες θέσεις [3].

5.2. Αποτελέσματα του Ευρωπαϊκού Έργου ESTMAP σε εθνικό επίπεδο

Για την Ελλάδα, συλλέχθηκαν δεδομένα για δυνητικές και πιθανές θέσεις για διάφορες τεχνολογίες υπόγειας αποθήκευσης ενέργειας σε ταμιευτήρες υδρογονανθράκων, υδροφορείς, αλατούχους σχηματισμούς και εγκαταλελειμμένα ορυχεία. Συνολικά προτάθηκαν 37 θέσεις, εκ των οποίων 22 σε υδροφορείς, 4 σε ταμιευτήρες υδρογονανθράκων, 7 σε αλατούχους σχηματισμούς και 4 σε εγκαταλελειμμένα ορυχεία [17]. Από τις θέσεις αυτές, μόνο μία (1) χαρακτηρίζεται ως «σχεδιασμένη» και αφορά τη μετατροπή του εξαντλημένου κοιτάσματος φυσικού αερίου South Kavala σε υπόγεια αποθήκη φυσικού αερίου [18]. Οι υπόλοιπες 36 είναι «δυνητικές», εντοπίσθηκαν και εκτιμήθηκαν σε πολύ προκαταρκτικό επίπεδο, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα γενικότερα γεωγραφικά και γεωλογικά δεδομένα των θέσεων όσο και συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των γεωλογικών δομών, ανάλογα με τον τύπο της αποθήκευσης. Πιο συγκεκριμένα:
(α) Προτάθηκαν 22 θέσεις αποθήκευσης σε υδροφορείς, καθορισμένους τοπικά έως και περιφερειακά. Από τις θέσεις αυτές, οι 14 έχουν ως στόχο την υπόγεια αποθήκευση θερμότητας (UTES) και οι υπόλοιπες 8 προτείνονται ως θέσεις υπόγειας αποθήκευσης φυσικού αερίου (UGS). Οι θέσεις εποχιακής υπόγειας αποθήκευσης θερμότητας εντοπίζονται σε ιζηματογενείς λεκάνες της ηπειρωτικής Ελλάδας (λεκάνες Ξάνθης-Κομοτηνής, Στρυμόνα, Θεσσαλονίκης και Μεγαλόπολης, Αττική) καθώς και σε νησιά (Εύβοια, Λήμνος, Λέσβος, Χίος, Σάμος, Κως, Ρόδος), δίνοντας έμφαση σε περιοχές όπου υπάρχουν θερμοηλεκτρικές μονάδες και επάλληλοι υδροφορείς (σενάρια αποθήκευσης θερμού νερού στον έναν υδροφορέα και ψυχρού στον άλλον) για μεγάλης κλίμακας αποθηκεύσεις. Θέσεις υπόγειας αποθήκευσης φυσικού αερίου έχουν προταθεί σε βαθείς υδροφορείς της Λεκάνης Θεσσαλονίκης, της Μεσοελληνικής αύλακας και του συγκλίνου Μποτσαρά στην Ήπειρο.
(β) Προτάθηκαν 3 θέσεις αποθήκευσης σε ταμιευτήρες υδρογονανθράκων αποσκοπώντας στην υπόγεια αποθήκευση φυσικού αερίου, μετά την εξάντληση των αποθεμάτων τους. Οι θέσεις αυτές είναι η Επανομή Θεσσαλονίκης, το Κατάκωλο και ο Πρίνος.
(γ) Προτάθηκαν 7 συγκεκριμένες θέσεις σε αλατούχους σχηματισμούς. Από τις θέσεις αυτές, οι 3 θεωρούνται κατ' αρχήν κατάλληλες για την υπόγεια αποθήκευση φυσικού αερίου (περιοχές Μαζαρακιάς Θεσπρωτίας, Ηρακλείου Κρήτης και Δελβινακίου Ιωαννίων) και οι υπόλοιπες 4 για αποθήκευση υδρογόνου (αλατούχοι δόμοι Τρύφου και Αχυρών Αιτωλοακαρνανίας, Κεφαλονιάς και Κέρκυρας) και 2 εναλλακτικές χρήσεις ως θέσεις αποθήκευσης ενέργειας πεπιεσμένου αέρα (Τρύφου και Αχυρών Αιτωλοακαρνανίας).

(δ) Τέλος, προτάθηκαν 4 θέσεις εγκαταλελειμμένων ορυχείων, από τις οποίες οι 3 αφορούν υπόγεια αποθήκευση θερμότητας (Μάνδρα και Χαϊδάρι Αττικής, Αλιβέρι Εύβοιας) και 1 υπόγεια αντλησιοταμίευση νερού (Ερμιόνη Αργολίδας).

Όλες οι παραπάνω προτάσεις των 36 δυνητικών θέσεων αποθήκευσης συνιστούν αρχικά σενάρια βασιζόμενες στην υπάρχουσα γνώση των τοπικών και περιφερειακών γεωλογικών συνθηκών. Χρειάζεται να γίνουν περαιτέρω ενέργειες ωρίμανσης και ενδεχομένως επέκτασης των δυνατοτήτων, με επιβεβαίωση της καταλληλότητας των προτεινόμενων θέσεων και των αναμενόμενων χωρητικοτήτων, διερεύνηση εναλλακτικών δυνατοτήτων στους ίδιους ταμιευτήρες ή και επέκταση του δυναμικού βάσει της χαρτογράφησης της ευρύτερης περιοχής και εκτίμησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] ENeRG, 2017, Energy Storage in the Subsurface: An Important Component of Transition to Low Carbon Energy, ENeRG Position Paper, June 2017, 4 p.

[2] van Gessel, S., Leynet, A., Mulder, A., Koorneef, J., Harcouet-Menou, V., Bader, A.-G., Holoček, J., and Hopman, J., 2015, ESTMAP Technical Support Document: Subsurface Data Specification, ESTMAP-D3.02

[3] van Gessel, S., Bader, A.-G., Bialkowski, A., Beccaletto L., Begemann, E., Jaudin, F., Kolejka, V., Holoček, J., and Hopman, J., 2016, ESTMAP Energy Storage Data Collection Report, ESTMAP-D3.04

[4] http://www.gasinfocus.com/en/indicator/underground-storage-sites-for-natural-gas-in-europe/

[5] http://www.gie.eu/download/maps/2016/GSE Storage Map Database 2016 - final.xlsx

[6] Crotogino, F., Mohmeyer, K., and Scharf, R., 2001. “Huntorf CAES: More than 20 Years of Successful Operation”, Spring 2001 Meeting, Orlando, Florida, USA, 15-18 April 2001.

[7] PowerSouth Energy Cooperative, 2010, CAES: McIntosh Power Plant, www.powersouth.com

[8] FIZ Karlsruhe, Compressed air energy storage power plants, http://www.bine.info/fileadmin/content/Publikationen/Englische_Infos/projekt_0507_engl_internetx.pdf

[9] Crotogino, F., Donadei, S., Bünger, U. and Landinger, H., 2010, “Large-scale Hydrogen Underground Storage for Securing Future Energy Supplies”, Detlef Stolten, Thomas Grube (eds), 18th World Hydrogen Energy Conference 2010 - WHEC 2010

[10] Leighty, W., 2008, “Running the World on Renewables: Hydrogen Transmission Pipelines and Firming Geologic Storage”, Int. J. Energy Res., 32(5), pp. 408-426.

[11] Project ENE 1001, 2010, Brief description of the Muuga Seawater-Pumped Hydro Accumulation Power Plant, http://energiasalv.ee/wp-content/uploads/2012/07/muuga_HAJ_17_02_2010_ENG.pdf http://energiasalv.ee/en/

[12] Bakema, G., Schoof, F., etc, 2016, “Geothermal Energy Use, Country Update for The Netherlands”, Proc. European Geothermal Congress 2016, Strasbourg, France, 8 pp.

[13] Gehlin, S., and Andersson, O., 2016, “Geothermal Energy Use, Country Update for Sweden”, Proc. European Geothermal Congress 2016, Strasbourg, France, 11 pp.

[14] Lee, K. S., 2013, Underground Thermal Energy Storage, Springer

[15] ESTMAP Consortium, 2016, “ESTMAP Final Review Meeting, WP3-4-5-6: Data Collection, Database, Analyses”, Presentation, Brussels, 25 November 2016

[16] van Gessel, S., Meinke Huberny, F., Jaudin, F., Haesen , E., Hladik, V., and Hopman, J., 2017, ESTMAP Public Project Summary, ESTMAP-D1.05

[17] van Gessel, S., Hladik, V., Kolejka, V., Bader, A.-G., Begeman, E., Subcontractors, and Hopman, J., 2017, ESTMAP D3.05: Country Energy Storage Evaluation, ESTMAP-D3.05

[18] Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, 2010, Μετατροπή του Υπό Εξάντληση Κοιτάσματος Φυσικού Αερίου «Νότιος Καβάλα» (South Kavala) σε Αποθηκευτικό Χώρο Φυσικού Αερίου, Αθήνα

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΑΝΘΡΑΚΩΝ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ H_2 ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΣΕ ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΥΨΗΛΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Α. Καφετζής[1], Χ. Ζιώγου[2*], Σ. Παπαδοπούλου[2,3], Σ. Βουτετάκης[2],Π. Σεφερλής[1]

[1]Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη

[2]Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων, Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ), Θεσσαλονίκη

e-mail: cziogou@cperi.certh.gr

[3]Τμήμα Μηχανικών Αυτοματισμού, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης , Θεσσαλονίκη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της εργασίας είναι να παρουσιάσει μια συστηματική μεθοδολογία για την ανάπτυξη και έλεγχο ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τη χρήση υδρογόνου. Το βασικό κίνητρο είναι ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη ενός αυτόνομου αυτοματοποιημένου και βιώσιμου συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Όταν πολλαπλά ετερογενή υποσυστήματα πρέπει να συνδεθούν για να σχηματίσουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα, υπάρχουν πολλές προκλήσεις που προκύπτουν από τις πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις και τις γρήγορες και αργές δυναμικές αποκρίσεις των υποσυστημάτων. Ο στόχος της εργασίας είναι να μελετήσει την απόκριση του συστήματος και να αναπτύξει κατάλληλους ελεγκτές για την αποδοτική και αποτελεσματική συνολική λειτουργία. Για την επίτευξη των στόχων αυτών αναπτύχθηκε ένα προηγμένο συστήματος προβλεπτικού ελέγχου (Model Predictive Control - MPC). Η μεθοδολογία εφαρμόζεται σε μια αυτόνομη μονάδα φόρτισης μπαταριών Ιόντων-Λιθίου και αποτελείται από ένα σύστημα κυψελών καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης υψηλής θερμοκρασίας (HT-PEM – High Temperature Polymer Electrolyte Membrane) και σε αναμορφωτή LPG (Liquid Petroleum Gas). Η κυψέλη καυσίμου HT-PEM χρησιμοποιείται ως κύρια πηγή ενέργειας για τη φόρτιση των μπαταριών. Το απαραίτητο υδρογόνο παρέχεται είτε από σταθμό παραγωγής ανανεώσιμου υδρογόνου είτε από τον αναμορφωτή LPG, τα οποία λειτουργούν στο ΕΚΕΤΑ. Αρχικά αναπτύχθηκαν τα μαθηματικά μοντέλα του ολοκληρωμένου συστήματος (αναμόρφωσης υγραερίου, κυψέλη καυσίμου, μπαταρία). Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξη των μεθόδων προηγμένης ρύθμισης που βασίζεται σε μαθηματικά μοντέλα χρησιμοποιώντας αλγόριθμους προβλεπτικού ελέγχου. Έχοντας ως βάση την πλήρη μοντελοποίηση του συστήματος, καταγράφονται οι στόχοι του ελέγχου και προσδιορίζονται οι χειραγωγούμενες και οι ρυθμιζόμενες μεταβλητές με τους κατάλληλους περιορισμούς. Το πλαίσιο του ελέγχου ολοκληρώνεται με την προσομοίωση του συστήματος σε πραγματικά σενάρια λειτουργίας τα οποία αφορούν την τήρηση των απαιτήσεων φόρτισης της μπαταρίας και την ανάγκη για λειτουργία σε διαφορετικά δυναμικά επίπεδα (αύξηση/μείωση παραγωγής ενέργειας). Η συνολική λειτουργία αξιολογείται από την άποψη της κατανάλωσης καυσίμου, της αποδοτικότητας, του χρόνου προετοιμασίας των υποσυστημάτων κατά τα στάδια εκκίνησης, κλπ. Καθορίζεται ένα σύνολο μετρήσεων απόδοσης και αξιολογείται η συμπεριφορά του ολοκληρωμένου συστήματος μέσω ενός συνόλου διαφορετικών συνθηκών φόρτισης.

Λέξεις Κλειδιά: Κυψέλη καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας, ολοκληρωμένο σύστημα, αναμόρφωση υγραερίου

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

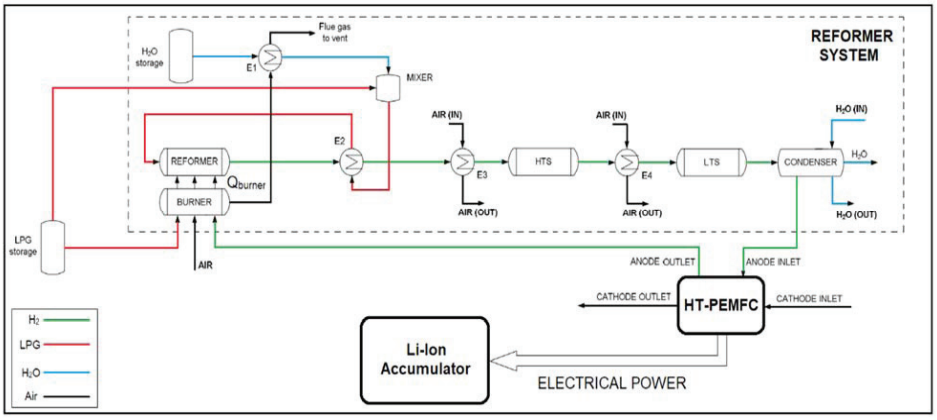
Η αντιμετώπιση του προβλήματος της κλιματικής αλλαγής κάνει επιτακτική τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου μέσω της χρήσης εναλλακτικών μορφών ενέργειας και συστημάτων με χαμηλό λειτουργικό αποτύπωμα άνθρακα. Σε αυτή την κατεύθυνση έχουν αναπτυθεί διάφορα συστήματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που βασίζονται σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Η χρήση υδρογόνου αποτελεί μια πιθανή εναλλακτική για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργεις όταν συνδυάζεται με κυψέλες καυσίμου. Γενικά η κυψέλη καυσίμου είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή η οποία μετατρέπει την χημική ενέργεια ενός καυσίμου απευθείας σε ηλεκτρική. Λόγω της μονοβηματικής φύσης της μετατροπής ενέργειας αυτής της διεργασίας, από χημική σε ηλεκτρική, υπάρχουν διάφορα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις πολυβηματικές διεργασίες, που εμπλέκονται στις τεχνολογίες εσωτερικής καύσης και μετατρέπουν τη χημική σε θερμική, μετά σε μηχανική και τελικά σε ηλεκτρική ενέργεια. Από την άλλη μεριά, οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν μία αποδοτική και «καθαρή» μέθοδο μετατροπής ενέργειας. Η χρήση τους σε συνδυασμό με ανανεώσιμες πηγές και υδρογόνο, τις καθιστά ως τις συσκευές μετατροπής ενέργειας του μέλλοντος και τις πλέον κατάλληλες για μια αειφόρο ανάπτυξη. Η έλλειψη, επίσης, κινούμενων μερών σημαίνει λειτουργία χωρίς θόρυβο ή ταλαντώσεις, ενώ η απλή κατασκευή τους επιτρέπει την παραγωγή ενέργειας σε σταθερές ή φορητές εφαρμογές καθώς και την εφαρμογή τους στον τομέα των μεταφορών. Εν συντομία, οι κυψέλες καυσίμου προσφέρουν μια καθαρή, αποδοτική και ευέλικτη τεχνολογία μετατροπής ενέργειας από χημική σε ηλεκτρική.

Το ολοκληρωμένο αυτόνομο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που μελετάται στη παρούσα εργασία περιλαμβάνει μια συστοιχία κυψελών καυσίμου η οποία τροφοδοτείται με υδρογόνο μέσω ενός αναμορφωτή υγραερίου (μίγμα βουτανίου προπάνιου) και το σύστημα αποθήκευσης το οποίο αποτελείται από μια συστοιχία συσσωρευτών ιόντων λιθίου. Στόχος του συστήματος είναι η ικανοποίηση ενός φορτίου το οποίο ακολουθεί ένα γνωστό χρονικό προφίλ. Ο βέλτιστος έλεγχος του συστήματος (Εικόνα 1), το οποίο αποτελείται από πολλά επιμέρους υποσυστήματα με διαφορετική δυναμική το καθένα, αποτελεί επίσης βασικό στόχο. Οι διαφορετικές δυναμικές των υποσυστημάτων αποτελούν και τη μεγαλύτερη πρόκληση στο κομμάτι του ελέγχου, διότι θα πρέπει να συνδυαστούν και να ρυθμιστούν κατάλληλα ώστε το προφίλ του φορτίου να ικανοποιείται πάντα χωρίς καθυστέρηση και σπατάλη ενέργειας. Η επίτευξη των στόχων έγκειται στην ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους του συστήματος ως συνάρτηση της κατανάλωσης καυσίμου της συστοιχίας κυψελών υδρογόνου, των φορτίων των βοηθητικών συστημάτων, της απόδοσης του συστήματος διαχείρισης της ηλεκτρικής ισχύος, των αναγκών σε θέρμανση/ψύξη των κυψελών.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Το ολοκληρωμένο σύστημα αξιοποίησης υδρογόνου που χρησιμοποιήθηκε, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από το εργαστήριο Ανάπτυξης Ολοκληρωμένων Συστημάτων και Διεργασιών (ΑΝΟΣΥΣ) του ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ και αποτελείται από διάφορα υποσυστήματα τα οποία διασυνδέονται και αλληλεπιδρούν. Πιο συγκεκριμένα, η συστοιχία κυψελών καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας (HT-PEMFC) αποτελείται από μία κυψέλη καυσίμου με 36 κελιά μέγιστης ισχύος 1 kW. Υπάρχει, επίσης, το σύστημα παραγωγής υδρογόνου μέσω του αναμορφωτή LPG με ονομαστική δυναμικότητα 1.3 Nm^3/h σε πίεση 0,2 bar. Τέλος, χρησιμοποιείται ένα υποσύστημα συσσωρευτών λιθίου-ιόντων (120Ah/48V) για την κάλυψη των άμεσων ενεργειακών απαιτήσεων και την αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας. Η εικόνα 1 παρουσιάζει τα υποσυστήματα και τις συνδέσεις του αυτόνομου συστήματος.

Τα αντιδρώντα που συμμετέχουν σε όλες τις διεργασίες του διαγράμματος ροής είναι LPG, νερό (ατμός και υγρή φάση), αέρας και υδρογόνο. Αρχικά, το LPG χωρίζεται σε δύο ρεύματα, ένα που κατευθύνεται προς τον καυστήρα και ένα που κατευθύνεται προς τον αναμορφωτή. Το πρώτο ρεύμα και η παροχή αέρα εισέρχονται στον καυστήρα (Burner) όπου διεξάγονται οι αντιδράσεις καύσης και αποδίδεται θερμότητα στον αντιδραστήρα αναμόρφωσης και στην ατμογεννήτρια Ε1 μέσω τον καυσαερίων.



Εικόνα 1. Διάγραμμα ροής του ολοκληρωμένου συστήματος

Παράλληλα, το δεύτερο ρεύμα αναμειγνύεται με τον ατμό που προέρχεται από την ατμογεννήτρια Ε1 και αφού προθερμαθεί και άλλο με τη βοήθεια του ρεύματος εξόδου του αντιδραστήρα αναμόρφωσης (υδρογόνο αναμόρφωσης) στον εναλλάκτη Ε2, τότε εισέρχεται στον αντιδραστήρα όπου και θα αναμορφωθεί σε υδρογόνο και άλλα παράγωγα (CO, CO_2, H_2O, CH_4).

Στη συνέχεια, το ρεύμα εξόδου του αντιδραστήρα αναμόρφωσης ψύχεται από τον εναλλάκτη Ε2, εναλλάσσοντας μέρος της θερμότητάς του με το μίγμα LPG και ατμού. Πριν την εισαγωγή του ρεύματος αυτού στον αντιδραστήρα HTS (High Temperature Shift), γίνεται μια περαιτέρω ψύξη στο εναλλάκτη Ε3. Στον αντιδραστήρα HTS λαμβάνει χώρα η αντίδραση μείωσης του CO κατά την αντίδραση μετάθεσης νερού. Μετά τον HTS το ρεύμα ψύχεται ακόμα περισσότερο στον Ε4 για να εισαχθεί στον αντιδραστήρα LTS (Low Temperature Shift), του οποίου η έξοδος πλέον είναι μίγμα πλούσιο σε υδρογόνο αλλά και νερό. Για το λόγο αυτό, το ρεύμα οδηγείται στον συμπυκνωτή (Condenser) όπου και τελείται η απομάκρυνση του νερού και η ψύξη του ρεύματος μέχρι την κατάλληλη θερμοκρασία για ένα εισαχθεί στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου. Η ψύξη στον συμπυκνωτή πραγματοποιείται με τη χρήση νερού σε αντίθεση με τους εναλλάκτες Ε3 και Ε4 όπου χρησιμοποιείται αέρας.

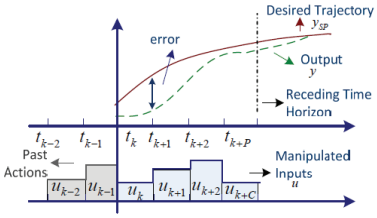
Τέλος, στην κυψέλη καυσίμου λαμβάνει χώρα η αντίδραση του υδρογόνου (είσοδος ανόδου) με τον αέρα (είσοδος καθόδου) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και νερού. Η ηλεκτρική αυτή ενέργεια είτε οδηγείται προς άμεση χρήση είτε προς αποθήκευση στους συσσωρευτές ιόντων λιθίου. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 1, η έξοδος της ανόδου συνδέεται με τον αντιδραστήρα αναμόρφωσης. Τα απαέρια της ανόδου περιέχουν την περίσσεια υδρογόνου μετά την αντίδραση στη μεμβράνη της κυψέλης. Αυτό το υδρογόνο προστίθεται στο ρεύμα εισόδου του καυστήρα μαζί με το LPG από τη φιάλη αποθήκευσης. Με τον τρόπο αυτό το σύστημα αποκτά έναν παραπάνω βαθμό πολυπλοκότητας αλλά παράλληλα χαρακτηρίζεται ως ένα αυτόνομο και ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος.

3. ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ – ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στο κεφάλαιο, αυτό θα γίνει παρουσίαση της μεθοδολογίας ελέγχου που εφαρμόστηκε, που είναι ο βέλτιστος μη-γραμμικός προβλεπτικός ή προρρητικός έλεγχος (Nonlinear MPC - NMPC). Η στρατηγική αυτή, είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα λόγω της ικανότητάς της να χειριστεί δυναμικές μη γραμμικές διεργασίες. Στον πυρήνα αυτής της μεθόδου υπάρχει ένα πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου το οποίο λύνεται κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο της στρατηγικής ελέγχου. Τέλος, πραγματοποιείται η διαμόρφωση του προβλήματος βέλτιστου ελέγχου, με τις βασικές μεταβλητές (χειραγωγούμενες και ρυθμιζόμενες) να επεξηγούνται και να παρουσιάζεται το βασικό πλαίσιο γύρω από το οποίο εφαρμόζεται ο NMPC.

3.1. Βέλτιστος προβλεπτικός έλεγχος (MPC)

Ο προβλεπτικός έλεγχος (Model Predictive Control ή MPC), είναι μέλος μιας οικογένειας μεθόδων βασισμένων στη βελτιστοποίηση, οι οποίες επιλύουν ένα πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου ανοιχτού βρόχου πεπερασμένου ορίζοντα για τον προσδιορισμό των μελλοντικών δράσεων ελέγχου κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος [1]. Ο MPC βασίζεται στο γεγονός ότι οι παρελθοντικές και οι μελλοντικές δράσεις ελέγχου επηρεάζουν τη μελλοντική απόκριση του συστήματος [2]. Ο κύριος στόχος είναι να ληφθεί μια δράση ελέγχου ελαχιστοποιώντας μια τετραγωνική αντικειμενική συνάρτηση η οποία σχετίζεται με συγκεκριμένους στόχους ή προδιαγραφές για την απόδοση του συστήματος. Καθώς οι συνθήκες και η δυναμική του συστήματος αλλάζουν και εξελίσσονται με το πέρασμα του χρόνου, το πρόβλημα βελτιστοποίησης πρέπει να επιλυθεί παράλληλα με τη λειτουργία του συστήματος σε διαδοχικά χρονικά διαστήματα. Επομένως, σε κάθε διάστημα δειγματοληψίας επιλύεται ένα πρόβλημα βέλτιστου ελέγχου πεπερασμένου ορίζοντα για κάποιο ορίζοντα πρόβλεψης (T_p), χρησιμοποιώντας την παρούσα κατάσταση του συστήματος σαν αρχική συνθήκη. Η βελτιστοποίηση παρέχει μια ακολουθία βέλτιστου ελέγχου ($u_k \ldots u_{k+Nc}$) σε ένα ορίζοντα ελέγχου (T_c) και μόνο η πρώτη δράση ελέγχου u_k για την τωρινή χρονική στιγμή εφαρμόζεται και οι υπόλοιπες υπολογισμένες δράσεις της ακολουθίας απορρίπτονται. Στην επόμενη χρονική στιγμή ο ορίζοντας πρόβλεψης μετατοπίζεται κατά ένα διάστημα δειγματοληψίας και το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται ξανά χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες των μετρήσεων που αποκτήθηκαν από το σύστημα [3]. Η έννοια του κινούμενου χρονικού ορίζοντα προσθέτει μια ανάδραση στην όλη προσέγγιση που κάνει δυνατή την αντιστάθμιση διαταραχών που επηρεάζουν το σύστημα ή ανακριβειών της μοντελοποίησης (Εικόνα 2).



Εικόνα 2. Η έννοια του κινούμενου χρονικού ορίζοντα

Αυτή η μεθοδολογία χρησιμοποιεί ένα μοντέλο της διεργασίας για να βελτιστοποιήσει την προβλεπόμενη μελλοντική συμπεριφορά του συστήματος. Στην παρούσα εργασία, καθώς ενδιαφερόμαστε για μη-γραμμικές διεργασίες, το μαθηματικό μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί για την εφαρμογή του ελέγχου θα είναι μη γραμμικό. Επομένως, πλέον θα γίνεται αναφορά σε βέλτιστο μη-γραμμικό προβλεπτικό έλεγχο (Nonlinear Model Predictive Control, NMPC). Το μοντέλο μιας διεργασίας πάντα συνοδεύεται από κάποιες υποθέσεις ή απλοποιήσεις σε σχέση με το σύστημα, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε μικρά σφάλματα. Επίσης, η επίδραση των διαταραχών στο σύστημα μπορεί να προσθέσει και αυτή κάποιο επιπλέον σφάλμα συγκριτικά με την απόκριση του μοντέλου της διεργασίας. Οι αποκλίσεις των προβλέψεων του μοντέλου από την πραγματική διεργασία υπολογίζονται σε κάθε χρονικό διάστημα δειγματοληψίας και θεωρούνται ως το σφάλμα του μοντέλου της διεργασίας. Αυτό το σφάλμα καθορίζει έναν όρο στην αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται για να διορθώσει μελλοντικές προβλέψεις και θεωρείται σταθερό καθόλη τη διάρκεια του βήματος του ορίζοντα πρόβλεψης. Η μαθηματική περιγραφή του αλγόριθμου του MPC είναι η εξής [2,4]:

$$\min J = \sum_{j=1}^{N_p} \left(\hat{y}_{k+j} - y_{sp,k+j} \right)^T Q \left(\hat{y}_{k+j} - y_{sp,k+j} \right) + \sum_{l=1}^{N_c-1} \Delta u_{k+l}^T R \Delta u_{k+l} \qquad (1)$$

s.t.:

$$\dot{x} = f_d(x,u), \quad y = g(x,u) \qquad (2)$$

$$e_k = \left(y^{meas} - y^{pred} \right)_k \qquad (3)$$

$$\hat{y}_{k+j} = y_{k+j}^{pred} + e_k \qquad (4)$$

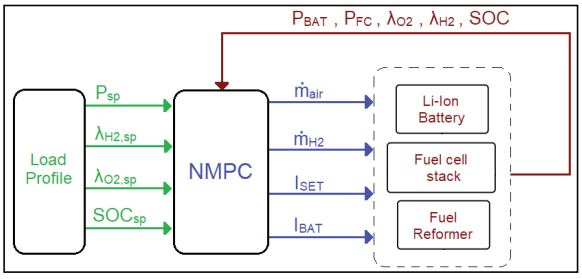
$$N_c = (T_c - T_k) / \Delta t_c, \quad N_p = (T_p - T_k) / \Delta t_p \qquad (5)$$

$$u^L \le u \le u^U, \quad y^L \le y \le y^U \qquad (6)$$

Η ελαχιστοποίηση του συναρτησιακού J (εξ. 1) εξαρτάται από τους περιορισμούς των χειραγωγούμενων (u) και των ρυθμιζόμενων (y) μεταβλητών (εξ. 6). Το $y_{sp,k}$ υποδηλώνει την επιθυμητή τροχιά αναφοράς, ενώ το f_d είναι οι διαφορικές εξισώσεις και το *g* υποδηλώνει τις εξισώσεις των μεταβλητών εξόδου. Η διαφορά e_k μεταξύ των μετρούμενων μεταβλητών y^{meas} και των αντίστοιχων προβλεπόμενων τιμών y^{pred} τη χρονική στιγμή *k* θεωρείται σταθερή καθόλη τη διάρκεια των χρονικών βημάτων (N_p) του ορίζοντα πρόβλεψης T_p, το T_c υποδηλώνει τον χρονικό ορίζοντα τον οποίο φτάνουμε μετά από N_c διαστήματα. Οι παράμετροι ρύθμισης του αλγορίθμου είναι οι όροι του βάρους στην αντικειμενική συνάρτηση (*Q*,*R*) και το μήκος του ορίζοντα πρόβλεψης και ελέγχου.

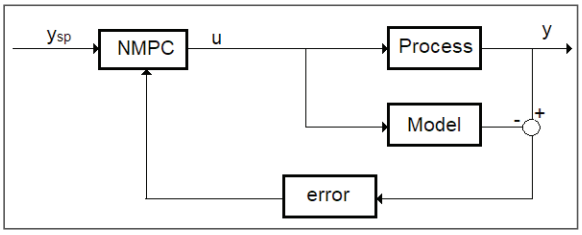
3.2. Διαμόρφωση προβλήματος NMPC

Στο σημείο αυτό θα παρουσιαστεί το πρόβλημα όπως αυτό διαμορφώθηκε στην ολοκληρωμένη και πιο σύνθετή του μορφή. Θα επεξηγηθούν οι όροι της αντικειμενικής συνάρτησης, όλες οι μεταβλητές κατάστασης (ρυθμιζόμενες μεταβλητές), οι χειραγωγούμενες μεταβλητές καθώς και οι περιορισμοί του συστήματος. Η διαμόρφωση του προβλήματος έγινε σταδιακά, ξεκινώντας από ένα απλό σενάριο λειτουργίας. Όσο αυξάνονταν οι υπολογιστικοί στόχοι και οι απαιτήσεις του προβλήματος τόσο αυξανόταν και η πολυπλοκότητά του. Η εικόνα 3 απεικονίζει τη διαμόρφωση του συστήματος ελέγχου.



Εικόνα 3. Διαμόρφωση συστήματος ελέγχου

Το διάγραμμα ροής του συστήματος κλειστού βρόχου κατά τον προβλεπτικό έλεγχο φαίνεται στην εικόνα 4. Η υλοποίηση του NMPC περιλαμβάνει την επίλυση του προβλήματος υπολογισμού της βέλτιστης δράσης ελέγχου. Το y_{sp} είναι η επιθυμητή τροχιά.



Εικόνα 4. Σύστημα NMPC κλειστού βρόχου

Το μαθηματικό μοντέλο (Model) χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της πραγματικής διεργασίας, η οποία αντιπροσωπεύεται από το μη γραμμικό μοντέλο διαφορικών εξισώσεων. Η βαθμίδα “Process” συμβολίζει την πραγματική διεργασία, η οποία αντιπροσωπεύεται από το ίδιο μοντέλο μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων, μόνο που στην προκειμένη περίπτωση, είναι ελαφρώς διαφοροποιημένο. Η βαθμίδα “error” αφορά την εκτίμηση καταστάσεων που δεν είναι μετρήσιμες στην πραγματική διεργασία. Στην παρούσα εργασία, είναι ο υπολογισμός του σφάλματος μεταξύ του μοντέλου και της διεργασίας. Στο πρόβλημα του μη γραμμικού βέλτιστου ελέγχου υπάρχουν τέσσερις χειραγωγούμενες μεταβλητές, η ροή του αέρα προερχόμενη από τον συμπιεστή, η ροή υδρογόνου προερχόμενη από τον αντιδραστήρα αναμόρφωσης, το ρεύμα της μπαταρίας και το ρεύμα της κυψέλης καυσίμου $u = (\dot{m}_{air}, \dot{m}_{H_2}, I_{SET,FC}, I_{BAT})$. Υπάρχουν, επίσης, και πέντε ελεγχόμενες μεταβλητές

$y = (P_{BAT}, P_{FC}, \lambda_{O_2}, \lambda_{H_2}, SOC)$, εκ των οποίων οι τρεις είναι μετρούμενες, η ισχύς της μπαταρίας, η ισχύς της κυψέλης καυσίμου και η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας και δύο μη μετρούμενες, η περίσσεια υδρογόνου και η περίσσεια οξυγόνου. Επιπλέον, υπάρχει ακόμα μια μεταβλητή, η οποία είναι ο χρονικός ορίζοντας εφαρμογής του ελέγχου (t_f). Για το συγκεκριμένο πρόβλημα επιλέχθηκε να είναι σταθερός και ίσος με μία ώρα. Τελευταίο τμήμα της διαμόρφωσης του προβλήματος αποτελεί ο καθορισμός των απαραίτητων περιορισμών. Οι περιορισμοί αφορούν τα πάνω και κάτω όρια των χειραγωγούμενων μεταβλητών καθώς και των ρυθμιζόμενων μεταβλητών, που προκύπτουν είτε από τα φυσικά λειτουργικά όρια του συστήματος, ή από υποκειμενικά κριτήρια σχετικά με τις περιοχές εντός των οποίων είναι επιθυμητή η λειτουργία της διάταξης.

4. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΙΣΧΥΟΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει ανάλυση σεναρίων προσομοιωμένης λειτουργίας σε συνθήκες ανοιχτού βρόχου με χρήση των δυναμικών μοντέλων που αναπτύχθηκαν και με βάση τη δομή ελέγχου που επιλέχθηκε στην ενότητα 3. Ακόμα θα αναλυθεί η δυναμική συμπεριφορά του ολοκληρωμένου συστήματος παραγωγής ισχύος για κάθε ένα από τα σενάρια λειτουργίας. Τα σενάρια θα είναι τα εξής:

Σενάριο 1ο: Λειτουργία της συστοιχίας κυψελών καυσίμου παράλληλα με τον συσσωρευτή ιόντων λιθίου προς ικανοποίηση της ζήτησης ισχύος.

Σενάριο 2ο: Λειτουργία της συστοιχίας κυψελών καυσίμου και προς ικανοποίηση της ζήτησης ισχύος αλλά και για τη φόρτιση του συσσωρευτή.

Η αντικειμενική συνάρτηση διαμορφώνεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να επιτυγχάνεται πάντα η ικανοποίηση της τροχιάς αναφοράς του εκάστοτε προφίλ και με τους ανάλογους περιορισμούς στην κάθε περίπτωση. Τα δύο σενάρια έχουν μεταξύ κάποια κοινά σημεία ως προς την εφαρμογή του βέλτιστου προβλεπτικού ελέγχου. Ένα από αυτά είναι ο ορίζοντας ελέγχου Tc ο οποίος ορίστηκε να είναι ίσος με 1 λεπτό. Η επιλογή έγινε με βάση τη δυναμική όλων των επιμέρους υποσυστημάτων. Ο χρόνος αυτός είναι αρκετός έτσι ώστε τα γρήγορα δυναμικά του συσσωρευτή και των κυψελών καυσίμλου να φτάσουν σε μια μόνιμη κατάσταση. Ακόμη, όπως θα γίνει αντιληπτό στην παρουσίαση της κάθε αντικειμενικής συνάρτησης, υπάρχουν ορισμένοι ίδιοι περιορισμοί. Οι περιορισμοί αυτοί ορίστηκαν έτσι ώστε το προσομοιωμένο σύστημα να λειτουργεί μέσα στα όρια του πραγματικού συστήματος και να μην τα υπερβαίνει. Ένα σημείο που παρουσιάζει ένα ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι το αργό δυναμικό του αναμορφωτή καυσίμου, ο οποίος λειτουργεί με μια καθυστέρηση χρόνου δύο λεπτών, πράγμα που σημαίνει ότι αυτός καθορίζει την απόκριση του ολοκληρωμένου συστήματος σε πολύ μεγάλο βαθμό. Για την προσομοίωση και την προτυποποίηση των συστημάτων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MATLAB®. Η ανάπτυξη των αλγορίθμων για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης που διαμορφώθηκε βασίστηκε σε τεχνικές μη γραμμικού βέλτιστου προβλεπτικού ελέγχου (Nonlinear Model Predictive Control) .

4.1. Σενάριο 1ο: Ικανοποίηση φορτίου από τις κυψέλες καυσίμου σε συνδυασμό με τον συσσωρευτή Li-Ion

Το πλαίσιο του συγκεκριμένου σεναρίου αποτελείται από τις κυψέλες καυσίμου, τον αναμορφωτή υδρογόνου και τον συσσωρευτή ιόντων λιθίου. Σε πρώτο στάδιο, ο συσσωρευτής και οι κυψέλες θα λειτουργούν ξεχωριστά για την ικανοποίηση του φορτίου αναφοράς. Αυτό σημαίνει ότι δεν θα υπάρχει καμία αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο και ότι θα λειτουργούν σαν δύο μεμονωμένες πηγές ισχύος που ικανοποιούν την ίδια ζήτηση. Ο σκοπός της αντικειμενικής συνάρτησης είναι αφενός η ελαχιστοποίηση της απόκλισης από την επιθυμητή τροχιά της ισχύος και αφετέρου η λειτουργία των κυψελών καυσίμου κοντά (αν όχι ακριβώς) στους λόγους οξυγόνου και υδρογόνου $\lambda_{O2,SP}$=1,8, $\lambda_{H2,SP}$=1,8 που έχουν οριστεί ως στόχοι. Ο πρώτος τετραγωνικός όρος της συνάρτησης αντιπροσωπεύει την παρακολούθηση της τροχιάς αναφοράς. Όπως φαίνεται, περιέχει και την εκτίμηση του λάθους μεταξύ της διεργασίας και του μοντέλου η θα είναι ίδια και για τα δύο σενάρια που θα παρουσιασθούν. Οι άλλοι δύο όροι αντιπροσωπεύουν την τήρηση της λειτουργίας των κυψελών καυσίμου στα επιθυμητά επίπεδα για την αποφυγή έλλειψης υδρογόνου (starvation) και οξυγόνου στην άνοδο και κάθοδο αντίστοιχα. Ο όρος P_{BAT} αντιπροσωπεύει την ισχύ που προσδίδει ο συσσωρευτής στο σύστημα. Όπως φαίνεται, η ισχύς αυτή αθροίζεται με την ισχύ των κυψελών καυσίμου έτσι ώστε να επιτευχθεί η ισχύς αναφοράς P_{SP}. Επίσης, ως I_{BAT} ορίζεται η χειραγωγούμενη μεταβλητή που αντιπροσωπεύει την ένταση του ρεύματος συσσωρευτή. Ως περιορισμός για τη λειτουργία του συσσωρευτή ορίζεται η κατάσταση φόρτισής της SOC, με άνω όριο για την πρόληψη της υπερφόρτισης και κάτω όριο για την πρόληψη της εξάντλησής της.

$$\min J(x) = \left\{ P_{SP} - \left[\left(P_{FC,ideal} - \underbrace{(P_{FC,ideal} - P_{FC,process})}_{\text{Error estimation}} \right) + P_{BAT} \right] \right\}^2 + \left(\lambda_{O_2,SP} - \lambda_{O_2} \right)^2 + \left(\lambda_{H_2,SP} - \lambda_{H_2} \right)^2 \quad (7)$$

$$u = \left[\dot{m}_{air},\ \dot{m}_{H_2},\ I_{SET,FC},\ I_{BAT} \right]$$

$$0 \le I_{SET,FC} \le 11 \quad [A]$$

$$0 \le I_{BAT} \le 30 \quad [A]$$

$$1.6 \le \lambda_{O_2} \le 2.1$$

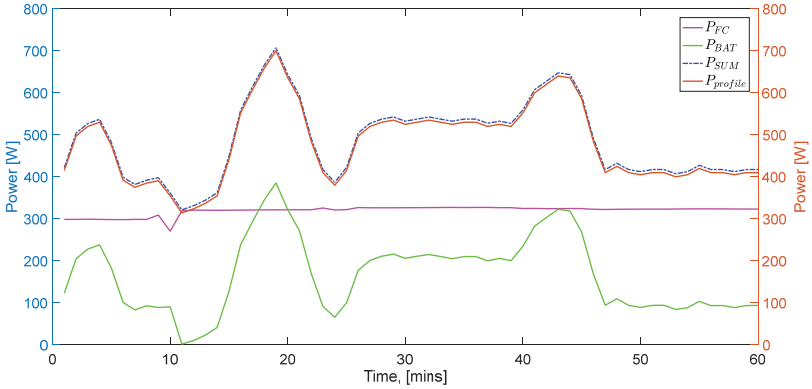
$$1.1 \le \lambda_{H_2} \le 2.3 \quad (7a)$$

$$20 \le \dot{m}_{air} \le 60 \quad [l/min]$$

$$12 \le \dot{m}_{H_2} \le 22 \quad [l/min]$$

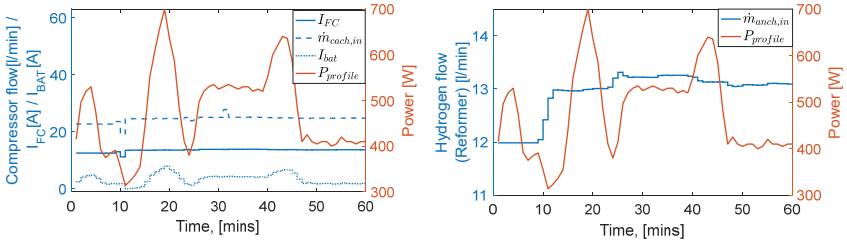
$$30 \le SOC \le 90 \quad [\%]$$

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του βέλτιστου ελέγχου των κυψελων καυσίμου με τον αναμορφωτή καυσίμου και τον συσσωρευτή ιόντων λιθίου. Να σημειωθεί ότι ο ορίζοντας πρόβλεψης T_P επιλέχθηκε μετά από μελέτη για 1,2,3 και λεπτά να είναι 2 λεπτά. Η επιλογή έγινε με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και με κριτήριο το γεγονός ότι η αύξηση του χρονικού ορίζοντα πρόβλεψης σημαίνει και παράλληλη αύξηση του υπολογιστικού χρόνου του αλγορίθμου επίλυσης. Επομένως η επιλογή του μικρότερου δυνατού ορίζοντα είναι η επιθυμητή.

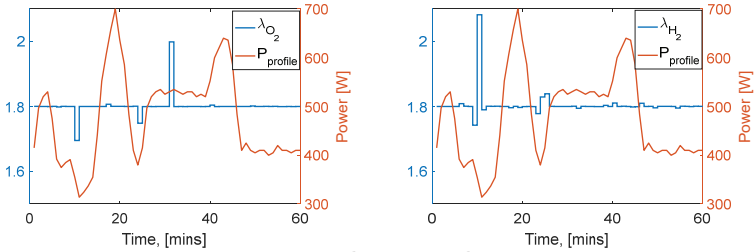


Εικόνα 5. Ισχύς των κυψελών καυσίμου, της μπαταρίας Li-ion σε σχέση με την ισχύ αναφοράς

Από την εικόνα 5 είναι εμφανής ο ρόλος των δύο συσκευών. Η κυψέλη καυσίμου, έχοντας μια πιο αργή απόκριση (λόγω της αργής δυναμικής του αναμορφωτή) σε σχέση με τον συσσωρευτή, φαίνεται να παρέχει μια σχεδόν σταθερή ισχύ. Από την άλλη, ο συσσωρευτής, με την ταχεία απόκρισή του, αναλαμβάνει να προσδώσει στο σύστημα την αναγκαία ισχύ έτσι ώστε αυτό να ανταποκριθεί στην απότομη αύξηση του φορτίου. Το άθροισμα των δύο ισχύων P_{SUM} δεν έχει καμία σημαντική απόκλιση από την τροχιά αναφοράς, επομένως, το σύστημα επιτυγχάνει τον βασικό του στόχο.

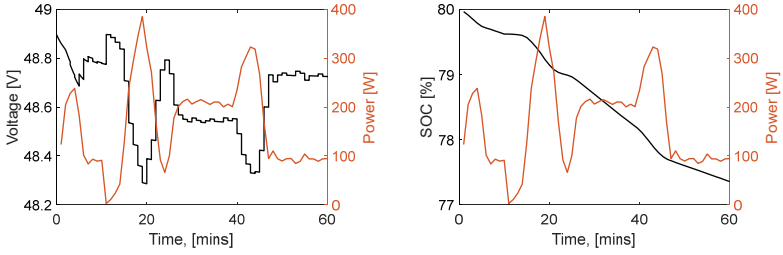


Εικόνα 6. Χειραγωγούμενες μεταβλητές σε σχέση με την ισχύ αναφοράς



Εικόνα 7. (Αριστερά) Περίσσεια οξυγόνου. (Δεξιά) Περίσσεια υδρογόνου

Η συμπεριφορά των χειραγωγούμενων μεταβλητών στην εικόνα 6 είναι η αναμενόμενη, με τις εντάσεις των ρευμάτων και την ροή του αέρα να ακολουθούν την πορεία της καμπύλης αναφοράς. Η ροή του υδρογόνου από τον αναμορφωτή αυξάνεται σταδιακά κατά 1 l/min περίπου στο πέρας της προσομοίωσης. Η εικόνα 7 απλά επιβεβαιώνει ότι τα επίπεδα λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου ήταν εντός ορίων καθόλη τη διάρκεια της λειτουργίας.



Εικόνα 8. (Αριστερά) Τάση της μπαταρίας σε σχέση με την ισχύ της. (Δεξιά) Επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας SOC σε σχέση με την ισχύ της

Σημαντικοί παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη λειτουργία της μπαταρίας και την κατάστασή της είναι η τάση και το επίπεδο φόρτισής της. Παρατηρείται ότι η τάση της μπαταρίας πέφτει όταν η ισχύς που παρέχει είναι μεγαλύτερη (εικόνα 8,αριστερά). Ακόμη, όσο πιο μεγάλη είναι η ισχύς που προσφέρει η μπαταρία στο σύστημα τόσο πιο μεγάλος είναι και οπ ρυθμός με τον οποίο εκφορτίζεται. Η κλίση της ευθείας στην εικόνα 8 δεξιά απεικονίζει το ρυθμό εκφόρτισης η οποία είναι πιο απότομη στις υψηλές κορυφές της ισχύος από ότι στα χαμηλά επίπεδα.

4.2. Σενάριο 2ο: Ικανοποίηση φορτίου από τις κυψέλες καυσίμου και τον συσσωρευτή Li-Ion με παράλληλη φόρτιση του συσσωρευτή από τι κυψέλες καυσίμου

Στο προηγούμενο σενάριο, οι κυψέλες καυσίμου και ο συσσωρευτής προσομοιώθηκαν σαν δύο ανεξάρτητες πηγές ισχύος. Σκοπός αυτού του σεναρίου είναι η σύνδεση των δύο συσκευών με στόχο όχι μόνο την κάλυψη του φορτίου αλλά και την διατήρηση του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας σε κάποιο επιθυμητό επίπεδο. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει οι κυψέλες καυσίμου όχι μόνο να

παρέχουν μια ισχύ προς ικανοποίηση της ζήτησης αλλά να παρέχουν και μια επιπλέον ισχύ (όταν βρίσκονται στο κατάλληλο επίπεδο λειτουργίας) για την φόρτιση της μπαταρίας. Ο συσσωρευτής συνεχίζει να προσδίδει τις απότομες αυξήσεις στη ζήτηση της ισχύος αλλά σταματάει όταν είναι να φορτιστεί. Η διαμόρφωση του προβλήματος σε αυτό το σενάριο λειτουργίας οδηγεί σε ένα διαφορετικό πρότυπο προγραμματισμού. Το πρώτο σενάριο επιλύθηκε με μη γραμμικό προγραμματισμού (Nonlinear Programing, NLP), αλλά σε αυτή την περίπτωση η εισαγωγή δύο καινούριων ακέραιων μεταβλητών (i, j) μετατρέπει το πρόβλημα σε μικτό ακέραιο μη γραμμικό προγραμματισμό (Mixed Integer Nonlinear Programming, MINLP).

Αντικειμενική συνάρτηση

Η ισχύς για τη φόρτιση του συσσωρευτή προέρχεται από τις κυψέλες καυσίμου. Για αυτό το λόγο στον όρο P_{SP} προστίθεται ο όρος $P_{BAT,char}$, έτσι ώστε η φόρτιση του συσσωρευτή να αυξάνει την ισχύ αναφοράς των κυψελών. Αυθαίρετα ορίστηκε ότι η ισχύς φόρτισης θα είναι 100W. Το $P_{BAT,disch}$ αντιπροσωπεύει ότι και το P_{BAT} στο προηγούμενο σενάριο, την ισχύ, δηλαδή, που ο συσσωρευτής προσδίδει στο σύστημα. Ο τελευταίος όρος της αντικειμενικής θέτει έναν στόχο στο σύστημα, οποίος είναι η επίτευξη του επιπέδου φορτίσεως αναφοράς SOC_{SP}=90%. Ο συντελεστής βάρους 0,1 που πολλαπλασιάστηκε από μπροστά έχει ως στόχο να μειώσει τη σημαντικότητα αυτού του όρου έτσι ώστε να επιτρέπεται στον συσσωρευτή και η εκφόρτιση. Ακόμη, υπάρχουν τρείς νέοι περιορισμοί οι οποίοι, πρώτον, εξασφαλίζουν ότι οι μοναδικές τιμές που θα λαμβάνουν οι ακέραιες μεταβλητές θα είναι 0 και 1 και ότι ποτέ δεν θα μπορούν να είναι και οι δύο ταυτόχρονα 1 ή 0. Αυτό στην πορεία μεταφράζεται ως η ικανότητα του συσσωρευτή να εκτελεί μια διεργασία τη φορά, μόνο φόρτισης ή εκφόρτισης.

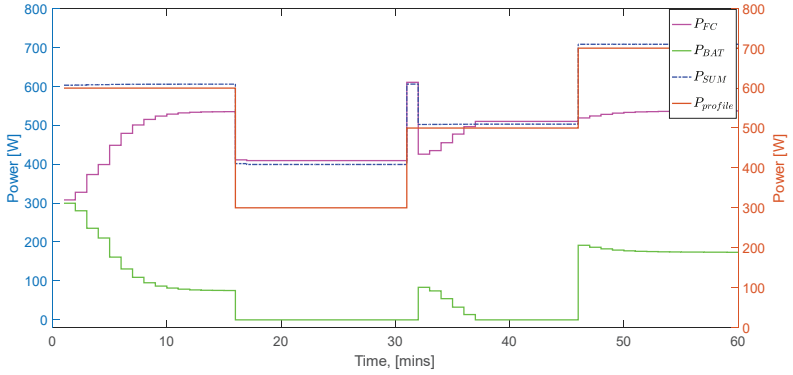
$$J(x) = \left\{ \left(P_{SP} + P_{BAT,char} \cdot i\right) - \left[\left(P_{FC,ideal} - \underbrace{\left(P_{FC,ideal} - P_{FC,process}\right)}_{\text{Error estimation}} \right) + P_{BAT,disch} \cdot j \right] \right\}^2 + \tag{8}$$

$$\left(\lambda_{O_2,SP} - \lambda_{O_2}\right)^2 + \left(\lambda_{H_2,SP} - \lambda_{H_2}\right)^2 + w_{SOC}\left(SOC_{SP} - SOC\right)^2$$

$$u = \left[\dot{m}_{air},\ \dot{m}_{H_2},\ I_{SET,FC},\ I_{BAT},\ i,\ j\right]$$

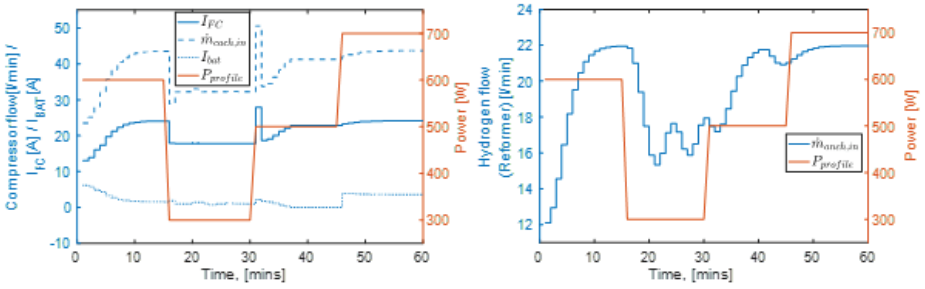
$$\begin{aligned}
&0 \le I_{SET,FC} \le 11 \quad [A] \\
&0 \le I_{FC} \le 30 \quad [A] \\
&1.6 \le \lambda_{O_2} \le 2.1 \\
&1.1 \le \lambda_{H_2} \le 2.3 \\
&20 \le \dot{m}_{air} \le 60 \quad [l/min] \\
&12 \le \dot{m}_{H_2} \le 22 \quad [l/min] \\
&30 \le SOC \le 90 \quad [\%] \\
&0 \le i \le 1, 0 \le j \le 1
\end{aligned} \tag{8a}$$

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του βέλτιστου μη γραμμικού προβλεπτικού ελέγχου με χρήση μικτού ακεραίου μη γραμμικού προγραμματισμού. Για λόγους απλότητας και μείωσης του υπολογιστικού χρόνου, επιλέχθηκε ένα διαφορετικό προφίλ με σταθερές περιοχές ζήτησης ισχύος. Να σημειωθεί, επίσης, ότι ο ορίζοντας πρόβλεψης και ελέγχου επιλέχθηκαν να είναι 1 λεπτό.



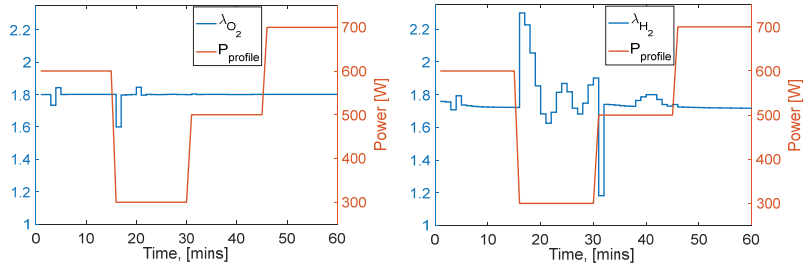
Εικόνα 9. Ισχύς των κυψελών καυσίμου, της μπαταρίας Li-ion σε σχέση με την ισχύ αναφοράς

Στην εικόνα 9 φαίνεται η απόκριση του ολοκληρωμένου συστήματος. Η κυψέλη καυσίμου στην αρχή της προσομοίωσης ξεκινά από ένα επίπεδο το οποίο είναι αρκετά πιο χαμηλά από αυτό που απαιτείται για την ικανοποίηση του φορτίου. Αρχικά, ο συσσωρευτής καλύπτει τη διαφορά αυτή μέχρι η αργή δυναμική του αναμορφωτή να φτάσει σε σημείο να μπορεί να παρέχει τη ροή υδρογόνου που χρειάζεται η κυψέλη καυσίμου για να παράγει την ισχύ που απαιτείται. Η φόρτιση του συσσωρευτή, που αποτελεί και το βασικό σκοπό αυτού του σεναρίου, επιτυγχάνεται στην περιοχή της καμπύλης αναφοράς που βρίσκεται μεταξύ 15 και 30 λεπτών. Αυτή η περιοχή επιτρέπει τη φόρτιση διότι το επίπεδο λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου είναι ήδη σε υψηλό σημείο και έχει τη δυνατότητα να καλύψει με ένα κομμάτι της ισχύος της τη ζήτηση και παράλληλα να δώσει την υπόλοιπη ισχύ της στον συσσωρευτή. Μόλις η ζήτηση αυξηθεί και πάλι, η κυψέλη καυσίμου σταματά να παρέχει ισχύ στον συσσωρευτή, και αφιερώνει όλη τη δυναμικότητά της στην κάλυψη του φορτίου. Εδώ παρατηρείται ότι τη στιγμή που γίνεται η αύξηση στην καμπύλη αναφοράς, ο συσσωρευτής υποβοηθάει την κυψέλη καυσίμου μέχρι αυτή να φτάσει στο επίπεδο που απαιτείται.



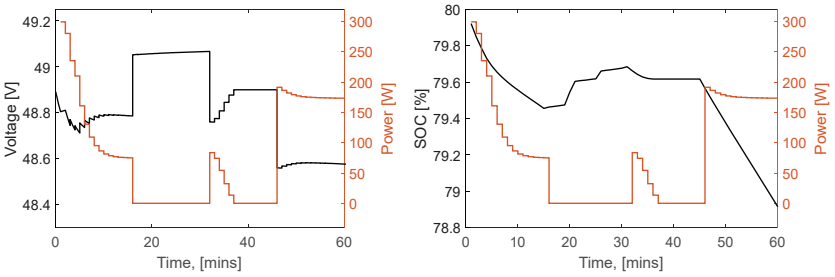
Εικόνα 10. Χειραγωγούμενες μεταβλητές σε σχέση με την ισχύ αναφοράς

Στην εικόνα 10, οι χειραγωγούμενες μεταβλητές, και συγκεκριμένα η ένταση του ρεύματος της κυψέλης καυσίμου και η ροή αέρα από τον συμπιεστή, ακολουθούν την ίδια πορεία με την ισχύ της κυψέλης. Η ένταση του ρεύματος του συσσωρευτή ακολουθεί την πορεία της ισχύος του συσσωρευτή, με μόνη διαφορά την περίοδο φόρτισης όπου η ένταση αλλάζει πρόσημο και παίρνει τιμή που καθορίζεται από την τάση του συσσωρευτή στο συγκεκριμένο χρονικό βήμα και την ισχύ φόρτισης ($P_{BAT,char}$ = 100W). Επιπλέον στην εικόνα 10 φαίνεται η συμπεριφορά της ροής υδρογόνου από τον αναμορφωτή. Είναι ξεκάθαρο ότι η δυναμική του αναμορφωτή είναι αυτή που στο τέλος καθορίζει και τη δυναμική της κυψέλης καυσίμου, μειώνοντας την ταχύτητα με την οποία επιτυγχάνεται το επιθυμητό επίπεδο λειτουργίας της.



Εικόνα 11. (Αριστερά) Περίσσεια οξυγόνου. (Δεξιά) Περίσσεια υδρογόνου

Στην εικόνα 11 είναι εμφανές ότι η λειτουργία της κυψέλης πραγματοποιείται μέσα στα επιθυμητά όρια. Η περίσσεια υδρογόνου αυξάνεται απότομα με την πτώση του φορτίου διότι μειώνεται η ποσότητα του υδρογόνου που καταναλώνεται από την κυψέλη και έτσι αυξάνεται ο λόγος $\frac{\text{παροχή } H_2}{\text{κατανάλωση } H_2}$. Η καμπύλη της περίσσειας οξυγόνου είναι καθόλη τη διάρκεια σχεδόν στο σημείο αναφοράς ($\lambda_{O2,SP}$ = 1,8).



Εικόνα 12. (Αριστερά) Τάση της μπαταρίας σε σχέση με την ισχύ της. (Δεξιά) Επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας SOC σε σχέση με την ισχύ της

Στην εικόνα 12 το επίπεδο φόρτισης, στις περιόδους όπου γίνεται εκφόρτιση του συσσωρευτή μειώνεται με διαφορετικό ρυθμό ανάλογα με την ένταση του ρεύματος. Κατά την περίοδο φόρτισης, μεταξύ 15 και 32 λεπτών, παρατηρούμε να αυξάνεται, πάλι με διαφορετικούς ρυθμούς ανάλογα με την ένταση του συσσωρευτή.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε μια θεωρητική και πειραματική μελέτη ενός ολοκληρωμένου συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος με εκμετάλλευση αναμορφωμένου υδρογόνου. Μεγάλο κομμάτι της εργασίας αφιερώθηκε στην ανάπτυξη των μαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση του συστήματος ισχύος. Κάποια από τα μοντέλα αναπτύχθηκαν από την αρχή (αναμορφωτής καυσίμου) και κάποια ήταν έτοιμα και προσαρμόστηκαν στις ανάγκες και τις προδιαγραφές του συστήματος που αντιπροσώπευαν. Επιπροσθέτως, πραγματοποιήθηκε πειραματική πιστοποίηση των μοντέλων, με πειράματα τα οποία πραγματοποιήθηκαν στο ΕΚΕΤΑ/ΙΔΕΠ. Ως επόμενο βήμα της μελέτης ήταν η διαμόρφωση του προβλήματος βέλτιστου μη γραμμικού προβλεπτικού ελέγχου. Ορίστηκαν οι χειραγωγούμενες μεταβλητές του προβλήματος καθώς και οι περιορισμοί που προέκυψαν από τα φυσικά όρια του συστήματος. Τα σενάρια αυτά, παρουσιάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει μια σταδιακή αύξηση της πολυπλοκότητάς τους, με τελευταίο σενάριο να είναι αυτό που αντιπροσωπεύει το ολοκληρωμένο σύστημα. Οι στόχοι του κάθε σεναρίου επιτεύχθηκαν σε ικανοποιητικό βαθμό και η απόκριση του συστήματος ήταν η προβλεπόμενη. Οι περιορισμοί δεν παραβιάστηκαν και τα επίπεδα λειτουργίας παρέμειναν μέσα στα επιθυμητά όρια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] F. Allgöwer, R. Findeisen and Z. K. Nagy, “Nonlinear Model Predictive Control: From Theory to Application,” *Jounral of the Chinese Institute of Chemical Engineers,* no. 35, pp. 299-315, 2004.

[2] H. Chen and F. Allgöwer, “A Quasi-Infinite Horizon Nonlinear Model Predictive Control Scheme with Guaranteed Stability,” *Automatica,* vol. 10, no. 34, pp. 1205-1217, 1998.

[3] D. Mayne, J. Rawlings, C. Rao and P. O. M. Scokaert, “Constrained model predictive control: Stability and optimality,” *Automatica,* pp. 789-814, 2000.

[4] S. Qin and T. Badgwell, “A survey of industrial model predictive control technology,” *Control Engineering Practice,* no. 11, pp. 733-764, 2003.

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗ ΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΕ ΥΓΡΗ ΦΑΣΗ ΑΚΑΤΕΡΓΑΣΤΗΣ ΒΙΟΓΛΥΚΕΡΟΛΗΣ

Α. Σερέτης, Α. Βουζάβαλης, Σ. Γεωργαντάς, Α. Μπρούζγου, Σ. Κόντου, Π. Τσιακάρας*

Εργαστήριο Εναλλακτικών Συστημάτων Μετατροπής Ενέργειας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πεδίον Άρεως, Βόλος 38334, e-mail: tsiak@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία υγρό διάλυμα ακατέργαστης γλυκερόλης με νερό τοποθετήθηκε σε αντιδραστήρα μη-συνεχούς ροής που περιείχε εμπορικό καταλύτη νικελίου σε φορέα αλούμινα-πυρίτια.

Από τις συνθήκες που επιλέχθηκαν και τα προϊόντα της αντίδρασης προέκυψε ότι πραγματοποιούνται κυρίως δυο αντιδράσεις: η αναμόρφωση της γλυκερόλης, και (με μέρος του υδρογόνου που παράγεται από αυτή) η υδρογονόλυση της γλυκερόλης.

Εξετάστηκε η επίδραση: i) των προσμίξεων της (ακατέργαστης) γλυκερόλης, ii) της θερμοκρασίας λειτουργίας του αντιδραστήρα (200-240^{o}C) και iii) της συγκέντρωσης της ακατέργαστης γλυκερόλης (10-40 wt%).

Τα κύρια προϊόντα αέριας φάσης ήταν H_2, CH_4 και CO_2, ενώ τα κύρια προϊόντα υγρής φάσης ήταν προπυλενογλυκόλη, αιθυλενογλυκόλη, αιθανόλη και ακετόλη. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα η εκλεκτικότητα των αέριων και υγρών προϊόντων δεν επηρεάζεται σημαντικά από την προσθήκη χαμηλής συγκέντρωσης προσμίξεων μεθανόλης και χλωριούχου νατρίου. Η μετατροπή της γλυκερόλης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης της γλυκερόλης. Η συνολική μετατροπή τόσο για την καθαρή όσο και για την ακατέργαστη γλυκερόλη είναι >90%. Η απόδοση παραγωγής του σημαντικότερου προϊόντος υγρής φάσης (προπυλενογλυκόλη) φτάνει έως και 30% για διάλυμα γλυκερόλης 40 wt% σε θερμοκρασία 240 ^{o}C και χρόνο αντίδρασης 4 ώρες.

Λέξεις Κλειδιά: ακατέργαστη βιογλυκερόλη, υδατική φάση, υδρογονόλυση, υδρογόνο, προπυλενογλυκόλη

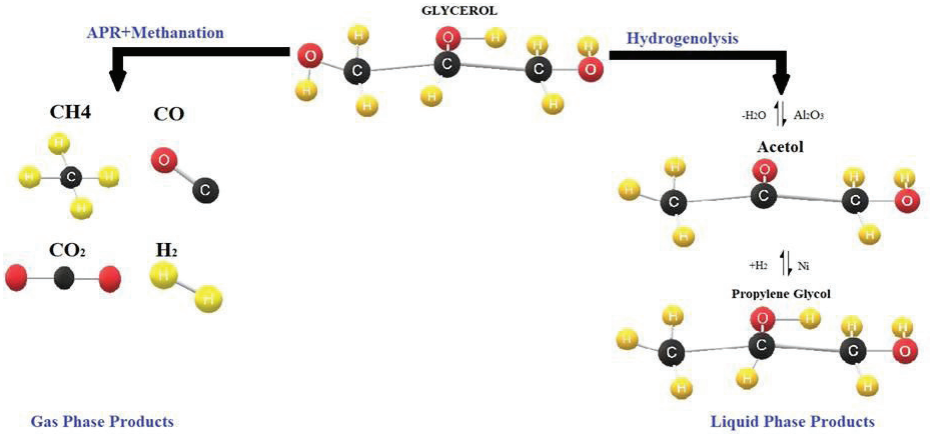
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Καθώς η παγκόσμια κατανάλωση πετρελαίου αυξάνεται με σταθερό ρυθμό, η ανάπτυξη ανανεώσιμων καυσίμων, όπως το βιοντίζελ, κρίνεται απαραίτητη. Η ραγδαία ανάπτυξη της βιομηχανίας του βιοντίζελ έχει αποφέρει περίσσεια ακατέργαστης γλυκερόλης. Εξαιτίας του υψηλού κόστους κατεργασίας για την αξιοποίησής της για χρήση στη βιομηχανία τροφίμων, τη φαρμακευτική και τη βιομηχανία καλλυντικών, είναι αναγκαία η εύρεση εναλλακτικών μεθόδων για τη διάθεσή της [1],[2]. Όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία, είναι δυνατή η χρήση της γλυκερόλης για την παραγωγή διάφορων χημικών και καυσίμων όπως το υδρογόνο, το οποίο είναι το απλούστερο και υπάρχει σε μεγάλες ποσότητες, αλλά δεν είναι ελεύθερα διαθέσιμο στη φύση [3-6]. Ένα ακόμα χρήσιμο χημικό που παράγεται από τη γλυκερόλη είναι η προπυλενογλυκόλη, η οποία έχει εφαρμογές υψηλής αξίας στη φαρμακευτική βιομηχανία, στην αυτοκινητοβιομηχανία και στη βιομηχανία καλλυντικών και τροφίμων [7].

Μία από τις πλέον αναπτυσσόμενες διεργασίες καταλυτικής αντίδρασης της γλυκερόλης είναι η καταλυτική αναμόρφωση στην υγρή της φάση (catalytic Aqueous Phase Reforming, APR) [8]. Η μέθοδος αυτή παρουσιάζεται ως μια πολλά υποσχόμενη διεργασία για τους εξής λόγους: i) μπορεί να πραγματοποιηθεί σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία T, ii) δεν είναι απαραίτητο να εξατμίζει νερό και γλυκερόλη και iii) οι ανεπιθύμητες αντιδράσεις αποσύνθεσης ελαχιστοποιούνται. Οι καταλύτες πλατίνας [9-14] και νικελίου [12, 15, 16] έχουν διερευνηθεί εκτενώς για την αναμόρφωση της γλυκερόλης με στόχο την παραγωγή υδρογόνου σε αντιδραστήρα. Ωστόσο, η διεργασία που έχει μελετηθεί περισσότερο όσον αφορά τη μετατροπή της γλυκερόλης είναι η παραγωγή υδρογόνου κατά την καταλυτική αναμόρφωση σε υγρή φάση (Aqueous Phase Hydrogenolysis, APH) με μεταλλικό καταλύτη και σε ατμόσφαιρα υδρογόνου, με σκοπό την παραγωγή προπυλενογλυκόλης [17-26]. Το μειονέκτημα της παραπάνω διεργασίας είναι η ακριβή ανάγκη χρήσης υδρογόνου ως αντιδρόν από εξωτερική πηγή.

Μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική για την αποφυγή της χρήσης εξωτερικής πηγής υδρογόνου είναι η επί τόπου παραγωγή του απαιτούμενου υδρογόνου στον αντιδραστήρα από τη διεργασία APR.

Σχεδόν όλα τα αποτελέσματα των ερευνών που μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία έχουν αποκτηθεί με τη χρήση καθαρής εμπορικής γλυκερόλης, ενώ λίγες αναφορές έχουν γίνει με χρήση ακατέργαστης γλυκερόλης ως πρώτη ύλη [27, 28]. Καμία αναφορά δεν έχει πραγματοποιηθεί για το συνδυασμό των διεργασιών APR και APH. Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι ο συνδυασμός των δύο διεργασιών χρησιμοποιώντας ακατέργαστη γλυκερόλη με επί τόπου παραγωγή υδρογόνου, χρησιμοποιώντας για πρώτη εμπορικό καταλύτη νικελίου σε φθηνό φορέα αλουμίνα-πυρίτια, με στόχο την παραγωγή υψηλής αξίας προϊόντων. Με αυτό τον τρόπο, είναι δυνατόν να ξεπεραστούν τα δύο κύρια μειονεκτήματα, η χρήση εξωτερικής πηγής υδρογόνου και η διεργασία καθαρισμού της γλυκερόλης. Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται η κερδοφορία της συνολικής διεργασίας.



Εικόνα 1: Παραγωγή υδρογόνου κατά την καταλυτική αναμόρφωση σε υγρή φάση ακατέργαστης βιογλυκερόλης.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Υλικά

Χρησιμοποιήθηκε καθαρή γλυκερόλη (≥99.5%, Sigma-Aldrich) χωρίς περαιτέρω καθαρισμό. Η σύσταση της ακατέργαστης γλυκερόλης ήταν: 70 wt% γλυκερόλη, 20 wt% μεθανόλη, 3 wt% στάκτη, 2 wt% σαπούνι, 2 wt% νερό, 2 wt% καταλυτικός παράγοντας και <1 wt% ελεύθερα λιπαρά οξέα. Χρησιμοποιήθηκε σε μορφή σκόνης καταλύτης με ~65 wt% νικέλιου και εμβαδόν επιφάνειας 190 m^2/g καθαρισμένο με αναγωγή και σταθεροποίηση, σε φορέα αλουμίνα-πυρίτια. Όλα τα υπόλοιπα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία ήταν είτε αναλυτικά είτε βαθμού αντιδραστηρίου.

2.2. Χαρακτηρισμός καταλύτη

Οι μετρήσεις περίθλασης ακτίνων-Χ (X-ray Diffraction,XRD) πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του D/Max-IIIA (Rigaku Co., Japan) χρησιμοποιώντας Cu Kα (λ=0.15406 nm) ως πηγή ακτινοβολίας. Η σάρωση των δειγμάτων έγινε σε εύρος $10 \leq 2\theta \leq 75^{o}$.

2.3. Δοκιμές καταλύτη

Τα πειράματα για τη διεργασία APR πραγματοποιήθηκαν σε αντιδραστήρα υψηλής πίεσης (Parr Instrument Company-Model 4563), όγκου 600 ml. Τα επιλεγμένα εύρη των εξεταζόμενων παραμέτρων προέρχονται από προηγούμενη θερμοδυναμική εργασία [29] και από τις προκαταρκτικές πειραματικές δοκιμές. Το αντιδρών μίγμα (100 ml) ήταν ένα υγρό διάλυμα που περιείχε 10, 20 ή 40 wt% καθαρής ή ακατέργαστης γλυκερόλης με καταλύτη 65% Ni/SiO_2-Al_2O_3 (cat_{Ni}/gly=0.25 g/g). Μετά τη φόρτωση του μίγματος, ο αντιδραστήρα καθαρίστηκε με άζωτο και στη συνέχεια συμπιέστηκε στην επιθυμητή αρχική πίεση της αντίδρασης με άζωτο (1 bar). Οι δοκιμές του καταλύτη πραγματοποιήθηκαν στους 200, 220, 240 ^{o}C, καταλήγοντας σε μια αρχική αυτογενή πίεση 16, 23,5,33,5 bar αντίστοιχα. Ο ρυθμός ανάδευσης ρυθμίστηκε στα 300 rpm. Ένα αέριο και ένα υγρό δείγμα λήφθηκε μετά από 4 ώρες αντίδρασης. Το εκρέον αέριο ψύχθηκε σε συμπιεστή ώστε να υγροποιηθούν οι συμπιεσμένοι ατμοί και στη συνέχεια λήφθηκε ένα αέριο δείγμα με τη βοήθεια μιας σύριγγας των 5ml.

2.4. Ανάλυση προϊόντων

2.4.1. Ανάλυση αέριων προϊόντων

Η ανάλυση των αέριων προϊόντων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια χρωματογράφου αερίου (Shimadzu GC-14B) εξοπλισμένου με ανιχνευτές θερμικής αγωγιμότητας και ιονισμού φλόγας (Thermal Conductivity Detectors, TCD και Flame Ionization Detectors, FID). Η στήλη ήταν 60/80 Carboxen-1000, με διάμετρο 1/8 in και μήκος 15 ft. Οι ενώσεις που ανιχνεύθηκαν ήταν: H_2, CO, CH_4 και CO_2. Οι γραμμομοριακές συστάσεις των αέριων προϊόντων υπολογίστηκαν χωρίς να ληφθεί υπόψιν η ποσότητα του ατμού και η ποσότητα του αζώτου που χρησιμοποιήθηκε αρχικά. Ο θερμοκρασιακός προγραμματισμός της στήλης ήταν: 10 λεπτά στους 36 ^{o}C, στη συνέχεια αυξανόταν με ρυθμό θέρμανσης 10 ^{o}C/min μέχρι τους 140 ^{o}C, διατηρώντας αυτή τη θερμοκρασία μέχρι το τέλος της ανάλυσης. Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας πρότυπα αέρια μίγματα.

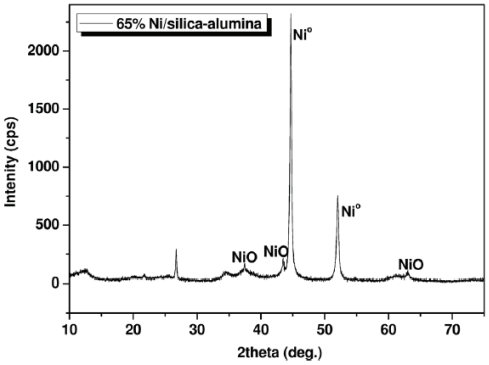
2.4.2. Ανάλυση υγρών προϊόντων

Η ανάλυση των υγρών προϊόντων πραγματοποιήθηκε σε χρωματογράφο αερίου (Agilent 7890A) εξοπλισμένος με στήλη DB-WAX (30 m × 0.53 mm × 1.0μm) και έναν ανιχνευτή ιονισμού φλόγας (FID). Οι ενώσεις που ανιχνεύθηκαν ήταν: ακεταλδεΰδη, ακετόνη, μεθανόλη, αιθανόλη, 1-προπανόλη, ακετόλη, λακτικό οξύ, προπυλενογλυκόλη, αιθυλενογλυκόλη και γλυκερόλη. Ο θερμοκρασιακός προγραμματισμός της στήλης ήταν ο ακόλουθος: 7 λεπτά στους 35 ^{o}C, στη συνέχεια η θερμοκρασία αυξήθηκε έως τους 215 ^{o}C με ρυθμό 5 ^{o}C/min και διατηρήθηκε στη θερμοκρασία αυτή μέχρι το τέλος της ανάλυσης. Το ακετονιτρίλιο χρησιμοποιήθηκε ως διαλυτικό μέσο στην ανάλυση του χρωματογράφου αερίου. Τα υγρά δείγματα καθαρίστηκαν με διάλυση και διήθηση πριν εισέλθουν στη στήλη του χρωματογράφου αερίου. Η μέθοδος πολλαπλών σημείων εσωτερικού προτύπου χρησιμοποιήθηκε για την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Η ακρίβεια των μετρηθέντων τιμών ήταν ±5% και τα πειράματα θα μπορούσαν να αναπραχθούν με σχετικό λάθος ±10%.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Χαρακτηρισμός καταλύτη

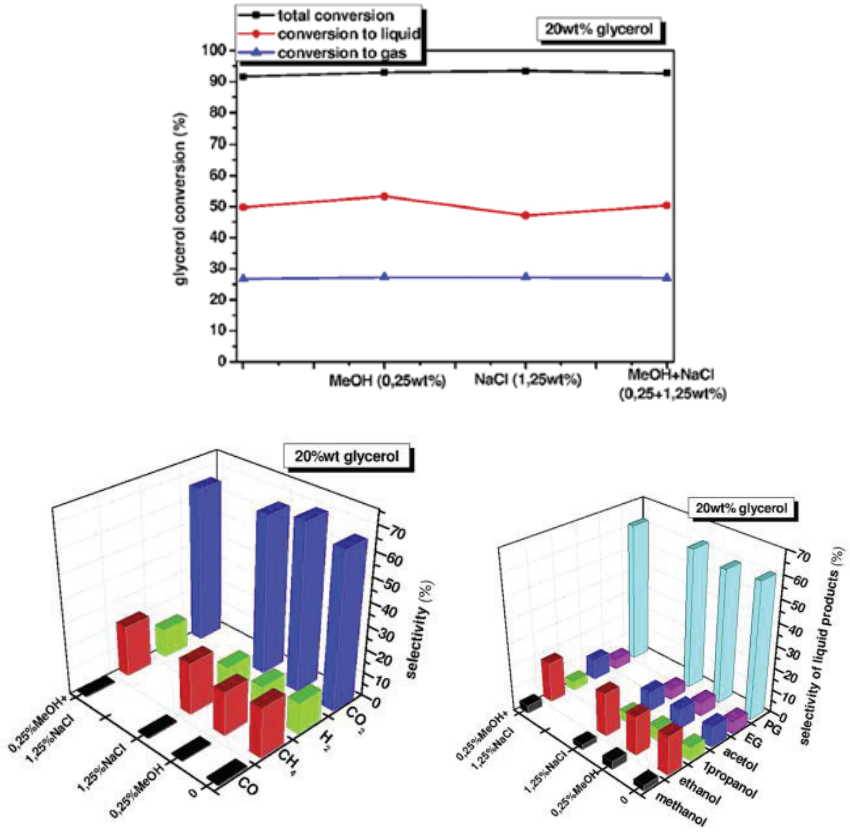
Ο χαρακτηρισμός του καταλύτη από την ανάλυση XRD φαίνεται στην Εικόνα 2. Το περιθλασίγραμμα δείχνει δύο κρυσταλλικές φάσεις: Τη φάση Ni^o (JCPDS 4-850) και τη φάση NiO (JCPDS 47-1049). Η φάση Ni δίνει κορυφές περίθλασης στις γωνίες $2\theta=44.5^o$ και $2\theta=51.8^o$, οι οποίες αντιστοιχούν στα επίπεδα (111) και (200) αντίστοιχα. Η φάση NiO δίνει κορυφές περίθλασης για 37.2^o, 43.3^o, 62.9^o, αντιστοιχώντας στα επίπεδα (111), (200) και (220), αντίστοιχα.



Εικόνα 2: Χαρακτηρισμός καταλύτη 65% Ni/SiO_2-Al_2O_3 με τη μέθοδο XRD

3.2. Επίδραση ακαθαρσιών στην καθαρισμένη γλυκερόλη

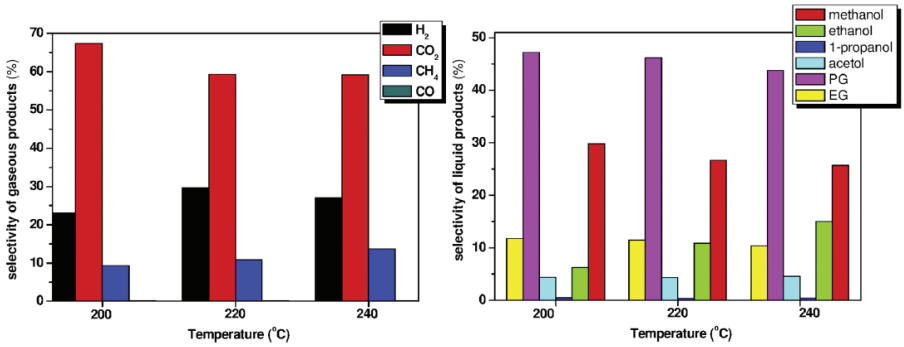
Η γλυκερόλη η οποία αποκτήθηκε από την παραγωγή βιοντίζελ αποτελεί ένα ακατέργαστο κλάσμα, που περιέχει αρκετές ακαθαρσίες ανάλογα με τη διεργασία που εφαρμόστηκε. Οι κύριες ακαθαρσίες σε ένα τυπικό ακατέργαστο μίγμα γλυκερόλης είναι μεθανόλη και μεταλλικά άλατα. Η σύνθεση της ακατέργαστης γλυκερόλης, που βασίζεται σε δεδομένα που λήφθηκαν από την εταιρεία βιοντίζελ Cargill Dow, είναι: ~80% γλυκερόλη, ~1% MeOH, ~5% NaCl και ~14% H_2O. Η παραπάνω σύσταση με 4 φορές αραίωση είναι: ~20% γλυκερόλη, ~0.25% MeOH και ~1.25% NaCl. Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση των ακαθαρσιών (MeOH και NaCl) σε διάλυμα με 20 wt% καθαρής γλυκερόλης, με καταλύτη 65% Ni/SiO_2-Al_2O_3 (cat_{Ni}/gly=0.25 g/g), στους 240 ^oC για 4 ώρες αντίδρασης. Τρεις διαφορετικές περιπτώσεις μελετώνται: 0.25 wt% MeOH, 1.25 wt% NaCl, και 0.25 wt% MeOH + 1.25 wt% NaCl. Η εκλεκτικότητα και η μετατροπή των αέριων και υγρών προϊόντων ως συνάρτηση των παραπάνω περιπτώσεων, σε διάλυμα με 20 wt% γλυκερόλη και 8g καταλύτη 65% Ni/SiO_2-Al_2O_3, όπως απεικονίζεται σχηματικά στην Εικόνα 3. Όπως φαίνεται, οι εκλεκτικότητες των αέριων και των υγρών προϊόντων δεν επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την προσθήκη χαμηλής συγκέντρωσης ακαθαρσιών μεθανόλης και χλωριούχου νατρίου. Ωστόσο, η μετατροπή στα υγρά προϊόντα μειώνεται ελαφρώς λόγω προσθήκης χλωριούχου νατρίου. Οι Lehnert και Claus [30] ερεύνησαν την επίδραση του μεγέθους σωματιδίου Pt σε καταλύτες γ-αλουμίνας στη διεργασία APR καθαρής και ακατέργαστης γλυκερόλης. Βρέθηκε ότι οι ακαθαρσίες της ακατέργαστης γλυκερόλης, οι οποίες είναι κυρίως ανόργανα άλατα (π.χ. NaCl) έχουν μεγάλη επίδραση στην καταλυτική δραστηριότητα. Η επίδραση αυτή, οφείλεται πιθανώς στη δηλητηρίαση του καταλύτη λόγω εμποδισμού των ενεργών του θέσεων. Τέλος, η απόδοση παραγωγής του υδρογόνου είναι ~1.6%, του μεθανίου ~6.5% και της προπυλενογλυκόλης ~30%.



Εικόνα 3: Εκλεκτικότητες και μετατροπές σε αέρια και υγρά προϊόντα ως συνάρτηση των ακαθαρσιών σε διάλυμα γλυκερόλης 20 wt% (T=240°C, χρόνος=4 ώρες, λόγος καταλύτη-γλυκερόλης: cat_{Ni}/gly=0.25 g/g).

3.3. Επίδραση της θερμοκρασίας της αντίδρασης στην ακατέργαστη γλυκερόλη

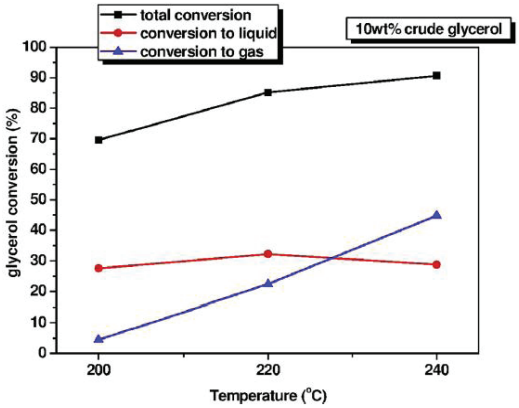
Με βάση προηγούμενα αποτελέσματα, η απόδοση του καταλύτη νικελίου είναι ενθαρρυντική για περαιτέρω μελέτη χρησιμοποιώντας μία πραγματική τροφοδοσία ακατέργαστης γλυκερόλης. Οι εκλεκτικότητες των αέριων και υγρών προϊόντων ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, σε διάλυμα που περιέχει 10 wt% καθαρή γλυκερόλη 4g καταλύτη 65% Ni/SiO_2-Al_2O_3, απεικονίζονται σχηματικά στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4: Εκλεκτικότητες των αέριων και υγρών προϊόντων ως συνάρτηση της θερμοκρασίας σε διάλυμα ακατέργαστης γλυκερόλης 10% κ.β (χρόνος=4 ώρες, λόγος καταλύτη-γλυκερόλης: cat_{Ni}/gly=0.25 g/g).

Όπως φαίνεται, η εκλεκτικότητα των χρήσιμων αέριων προϊόντων (H_2 και CH_4) είναι υψηλότερη στους 220 και 240°C. Συγκεκριμένα, η εκλεκτικότητα του μεθανίου αυξάνεται από την τιμή 9.3% στην τιμή 10.8% και καταλήγει στην τιμή 13.6%, ενώ για το υδρογόνο, η εκλεκτικότητα κυμαίνεται από 23.2% στην τιμή 29.7% καταλήγοντας στην τιμή 27% καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται από τους 200°C στους 220°C και στη συνέχεια στους 240°C αντίστοιχα. Η εκλεκτικότητα του υδρογόνου είναι υψηλότερη στους 220°C ενώ μειώνεται ελαφρώς στους 240°C, λόγω της υψηλότερης μετατροπής της μεθάνωσης και της υδρογόνωσης, που επιτυγχάνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες [8, 11]. Η εκλεκτικότητα του CO είναι σχεδόν αμελητέα, που σημαίνει ότι η αντίδραση μετατροπής νερού-αερίου ευνοείται σε μεγάλο βαθμό σε αυτές τις συνθήκες αντίδρασης. Όσον αφορά την υγρή φάση, το κύριο προϊόν είναι η προπυλενογλυκόλη, η εκλεκτικότητα της οποίας φτάνει στην υψηλότερη τιμή της, η οποία είναι 47%, στους 200°C [31]. Η εκλεκτικότητα της αιθανόλης αυξάνεται από την τιμή 6.25% στην τιμή 10.8% και στη συνέχεια 15%, ενώ της μεθανόλης μειώνεται από την τιμή 29.8% στην τιμή 26.6% και καταλήγει στην τιμή 25.7%. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η μεθανόλη είναι κυρίως αντιδρόν (ακαθαρσία της ακατέργαστης γλυκερόλης) και όχι τόσο προϊόν. Για αυτό το λόγο η εκλεκτικότητά του μειώνεται στις υψηλότερες θερμοκρασίες. Τέλος, οι θερμοκρασιακές αλλαγές δεν έχουν ισχυρή επίδραση τις εκλεκτικότητες των εναπομεινάντων προϊόντων. Συγκεκριμένα, οι τιμές τους είναι ~11% για την αιθυλενογλυκόλη, ~4.5% για την ακετόλη και ~0.5% για την 1-προπανόλη.

Η μετατροπή στα αέρια προϊόντα, η μετατροπή στα υγρά προϊόντα, και η συνολική μετατροπή του διαλύματος που περιέχει 10 wt% ακατέργαστη γλυκερόλη ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 5. Όπως φαίνεται, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία (200°C→ 220°C→240°C) η συνολική μετατροπή (69.5→85.2→90.6%) αυξάνεται. Παρομοίως, από τους Rhode et al. [32] ότι η συνολική μετατροπή της γλυκερολης αυξάνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, με εξωτερική προσθήκη υδρογόνου και καταλύτη χαλκού. Επίσης, σε άλλες εργασίες, στις οποίες χρησιμοποιήθηκαν καταλύτες νικελίου, παρουσιάστηκε η ίδια τάση. Ωστόσο, υπάρχει διαφορά στην επίδραση της θερμοκρασίας σε κάθε φάση. Προφανώς, η επίδραση της θερμοκρασίας είναι πιο έντονη στην αέρια φάση. Η μεταβολή στα αέρια προϊόντα αυξάνεται από την τιμή 4.5% στην τιμή 22.4% και στη συνέχεια στην τιμή 44.8%. Η μεταβολή στα υγρά προϊόντα δεν επηρεάζεται ισχυρά από τη θερμοκρασία, φτάνοντας στη μέγιστη τιμή, η οποία είναι 32%, στους 220°C. Η απόδοση παραγωγής των πιο σημαντικών προϊόντων αέριας και υγρής φάσης για τις 3 εξεταζόμενες θερμοκρασίες σε διάλυμα με 10 wt% ακατέργαστη γλυκερόλη, παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Η μέγιστη τιμή της απόδοσης παραγωγής της προπυλενογλυκόλης (~15%) παρατηρείται στους 220°C, ενώ η μέγιστη τιμή της απόδοσης παραγωγής του υδρογόνου (~7%) παρατηρείται στους 240°C.



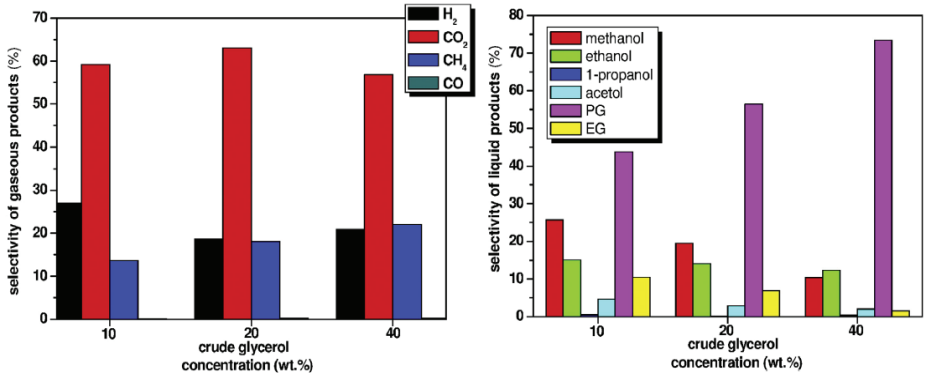
Εικόνα 5: Μετατροπή σε αέρια και υγρά προϊόντα και συνολική μετατροπή συναρτήσει της συγκέντρωσης της ακατέργαστης γλυκερόλης (T=240°C, χρόνος=4 ώρες, cat_{Ni}/gly=0.25 g/g).

Πίνακας 1: Απόδοση παραγωγής των σημαντικών αέριων και υγρών προϊόντων για τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες διάλυμα ακατέργαστης γλυκερόλης 10 wt% (χρόνος=4 ώρες, λόγος καταλύτη-γλυκερόλης: cat_{Ni}/gly=0.25 g/g).

Θερμοκρασία (°C)	***Απόδοση παραγωγής (%)***					
	H_2	**CH_4**	**EtOH**	**Ακετόλη**	**Προπυλενογλυκόλη**	**Αιθυλενογλυκόλη**
200	0.58	0.54	1.72	1.21	12.99	3.25
220	4.07	3.46	3.50	1.40	14.87	3.70
240	7.10	8.40	4.31	1.32	12.58	2.99

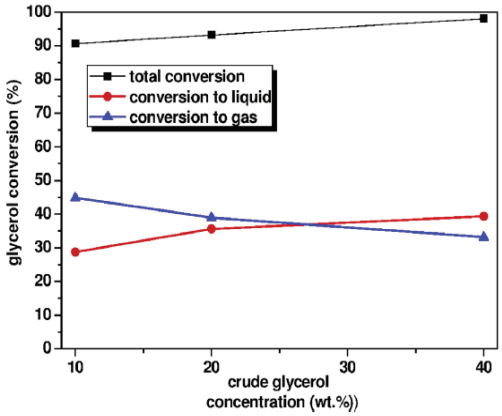
3.4. Επίδραση της συγκέντρωσης της ακατέργαστης γλυκερόλης

Στην Εικόνα 6 συνοψίζονται οι εκλεκτικότητες των αέριων και υγρών προϊόντων ως συνάρτηση της συγκέντρωσης της ακατέργαστης γλυκερόλης. Η θερμοκρασία είναι T=240°C, ο χρόνος αντίδρασης είναι 4 ώρες και χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος καταλύτης 65% Ni/SiO_2-Al_2O_3 (cat_{Ni} /gly=0.25 g/g). Είναι εμφανές ότι η εκλεκτικότητα του CH_4 αυξάνεται (13.6→18→22%) με την αύξηση της συγκέντρωσης της ακατέργαστης γλυκερόλης (10→20→40wt%). Η αυτογενής πίεση του αντιδραστήρα του αντιδραστήρα αυξάνεται επίσης (50→60→80 bar) με την αύξηση της συγκέντρωσης της ακατέργαστης γλυκερόλης. Κατά συνέπεια, οι αντιδράσεις μεθάνωσης ευνοούνται στις υψηλές πιέσεις. Αντιθέτως, η εκλεκτικότητα του υδρογόνου μειώνεται (27→18.6→20.8%) με την αύξηση της συγκέντρωσης της γλυκερόλης. Το υδρογόνο που παράγεται καταναλώνεται κατά τη διάρκεια των αντιδράσεων της μεθάνωσης και της υδρογόνωσης. Η αντίδραση μετατροπής νερού-αερίου ευνοείται επίσης σε αυτές τις συνθήκες και η εκλεκτικότητα του CO είναι σχεδόν αμελητέα. Η εκλεκτικότητα της προπυλενογλυκόλης ευνοείται σε μεγάλο βαθμό (43.7→56.4→73.3%) καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση της γλυκερόλης άρα και η πίεση του συστήματος [17, 33]. Εξαιτίας των παραπάνω, εκλεκτικότητες των υπόλοιπων υγρών προϊόντων μειώνονται ως εξής: 15→14.1→12.3% για την αιθανόλη, 25.7→19.4→10.4% για τη μεθανόλη και 10.4→6.8→1.4% για την αιθυλενογλυκόλη.



Εικόνα 6: Εκλεκτικότητες αέριων και υγρών προϊόντων συναρτήσει της συγκέντρωσης της ακατέργαστης γλυκερόλης (T=240°C, χρόνος=4 ώρες, cat_{Ni}/gly=0.25 g/g).

Η μετατροπή στα αέρια προϊόντα, η μετατροπή στα υγρά προϊόντα και η συνολική μετατροπή ως συνάρτηση της συγκέντρωσης της ακατέργαστης γλυκερόλης, σε θερμοκρασία T=240°C, για χρόνο αντίδρασης 4 ώρες και χρησιμοποιώντας λόγο καταλύτη-γλυκερόλης cat_{Ni} /gly=0.25 g/g, απεικονίζονται στην Εικόνα 7. Είναι εμφανές ότι καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση της γλυκερόλης (10→20→40 wt%), η συνολική μετατροπή αυξάνεται (90.6→93.2→98%). Ωστόσο, υπάρχει διαφορά στην επίδραση της ακατέργαστης γλυκερόλης στις δύο φάσεις. Παρατηρείται ότι η υγρή φάση ευνοείται περισσότερο από την αέρια φάση. Η μετατροπή στα αέρια προϊόντα μειώνεται από την τιμή 44.8% στην τιμή 39% και στη συνέχεια στην τιμή 33.2%, ενώ η μετατροπή στα υγρά προϊόντα αυξάνεται από την τιμή 28.7% στην τιμή 35.6% και έπειτα στην 39.3%, καθώς αυξάνεται η συγκέντρωση της γλυκερόλης. Αυτή η διαφορετική συμπεριφορά οφείλεται πιθανότατα στην επίδραση της αυτογενούς πίεσης της αντίδρασης, η οποία αυξάνεται ως εξής: 50→60→80bar με την αύξηση της συγκέντρωσης της γλυκερόλης, όπως αναφέρεται παραπάνω [17, 34]. Συνεπώς, υψηλότερες πιέσεις ευνοούν περισσότερο την υγρή φάση παρά την αέρια φάση. Τέλος, η απόδοση παραγωγής της προπυλενογλυκόλης παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή της, η οποία είναι 29%, σε διάλυμα με 40 wt% ακατέργαστη γλυκερόλης, ενώ η μέγιστη τιμή για το υδρογόνο, η οποία είναι ~7%, παρουσιάζεται σε διάλυμα 10 wt% κατέργαστης γλυκερόλης, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 2.



Εικόνα 7: Μετατροπή στα αέρια και υγρά προϊόντα και συνολική μετατροπή συναρτήσει της συγκέντρωση της ακατέργαστης γλυκερόλης (T=240°C, χρόνος=4 ώρες, cat_{Ni}/gly=0.25 g/g).

Πίνακας 2: Απόδοση παραγωγής των σημαντικών αέριων και υγρών προϊόντων για τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις ακατέργαστης γλυκερόλης (T=240°C, χρόνος=4 ώρες, cat_{Ni}/gly=0.25 g/g).

Συγκέντρωση ακατέργαστης γλυκερόλης (wt %	***Απόδοση παραγωγής (%)***					
	H_2	**CH_4**	**EtOH**	**Ακετόλη**	**Προπυλενογλυκόλη**	**Αιθυλενογλυκόλη**
10	7.1	8.4	4.31	1.32	12.58	2.99
20	3.8	8.6	5.03	1.01	20.13	2.45
40	3.7	9.2	4.86	0.79	28.88	0.58

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται η συνολική μετατροπή και απόδοση παραγωγής για την προπυλενογλυκόλη και για το υδρογόνο σε διάλυμα 20 wt% καθαρής και ακατέργαστης γλυκερόλης. Η θερμοκρασία είναι 240°C, ο χρόνος αντίδρασης είναι 4 ώρες και ο λόγος καταλύτη-γλυκερόλης είναι cat_{Ni}/gly=0.25 g/g. Όπως γίνεται αντιληπτό, η συνολική μετατροπή για την καθαρή και την ακατέργαστη γλυκερόλη είναι >90%. Η απόδοση παραγωγής της προπυλενογλυκόλης (~20%) σε διάλυμα ακατέργαστης γλυκερόλης είναι χαμηλότερη από την απόδοση παραγωγής της προπυλενογλυκόλης (~30%) σε διάλυμα καθαρής γλυκερόλης. Η απόδοση παραγωγής του υδρογόνου ακολουθεί αντίστροφη συμπεριφορά, γεγονός που σημαίνει ότι η παραγωγή υδρογόνου από την ακατέργαστη γλυκερόλη εμποδίζεται από τις ακαθαρσίες της ακατέργαστης γλυκερόλης. Ωστόσο, η απόδοση του καταλύτη νικελίου χρησιμοποιώντας πραγματική τροφοδοσία ακατέργαστης γλυκερόλης παραμένει υποσχόμενη.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν ταυτόχρονα οι διεργασίες APR και APH για ακατέργαστη γλυκερόλη με επιτόπου παραγωγή υδρογόνο με στόχο τη σύνθεση υψηλής αξίας προϊόντων, χρησιμοποιώντας φθηνό καταλύτη νικελίου σε φορέα SiO_2-Al_2O_3. Η συνολική μετατροπή αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και της συγκέντρωσης της γλυκερόλης. Συγκεκριμένα, υψηλές θερμοκρασίες ευνοούν το σχηματισμό των αέριων προϊόντων και υψηλές συγκεντρώσεις ευνοούν το σχηματισμό υγρών προϊόντων. Για αυτό το λόγο, η απόδοση παραγωγής της προπυλενογλυκόλης είναι υψηλότερη σε υψηλές συγκεντρώσεις και χαμηλές θερμοκρασίες, ενώ η απόδοση παραγωγής του υδρογόνου παρουσιάζει την αντίστροφη συμπεριφορά. Η παραγωγή υδρογόνου από ακατέργαστη γλυκερόλη αναστέλλεται μερικώς λόγω παρουσίας ακαθαρσιών. Ωστόσο, η απόδοση του καταλύτη νικελίου χρησιμοποιώντας πραγματική τροφοδοσία ακατέργαστης γλυκερόλης αποδείχτηκε πολλά υποσχόμενη.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα αυτή συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο-ΕΚΤ) και τα Ελληνικά εθνικά κονδύλια, μέσω του επιχειρησιακού προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Πρόγραμμα Χρηματοδότησης της Έρευνας: ΘΑΛΗΣ : Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου, αριθμός χορηγίας MIS 379333.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Nanda, M., Yuan, Z., Qin, W., Ma, P., Chunbao, X., 2015, "Purification of Crude Glycerol Using Acidification: Effects of Acid Types and Product Characterization," 1, pp.1-7.

[2] Purification of Crude Glycerol Using Acidification: Effects of Acid Types and Product Characterization, 2013, "Glycerol: production, consumption, prices, characterization and new trends in combustion," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 27, pp.475-493.

[3] Adhikari, S., Fernando, S. D., Haryanto, A., 2009, "Hydrogen production from glycerol: an update," Energy Conversion and Management, 50, pp.2600-2604.

[4] Lin, Y.-C., 2013, "Catalytic valorization of glycerol to hydrogen and syngas," International Journal of Hydrogen Energy, 38, pp.2678-2700.

[5] Zhou, C. H., Zhao, H., Tong, D. S., Wu, L. M., Yu, W. H., 2013, "Recent advances in catalytic conversion of glycerol," Catalysis Reviews, 55, pp.369-453.

[6] Vaidya, P. D., Rodrigues, A. E., 2009, "Glycerol reforming for hydrogen production: a review," Chemical & Engineering Technology, 32, pp.1463-1469.

[7] Martin, A., Armbruster, U., Gandarias, I., Arias, P. L., 2013, "Glycerol hydrogenolysis into propanediols using in situ generated hydrogen - a critical review," European Journal of Lipid Science and Technology, 115, pp.9-27.

[8] Cortright, R., Davda, R., Dumesic, J., 2002, "Hydrogen from catalytic reforming of biomass-derived hydrocarbons in liquid water," Nature, 418, pp.54-57.

[9] Barbelli, M. L., Pompeo, F., Santori, G. F., Nichio, N. N., 2013, "Pt catalyst supported on α-Al2O3 modified with CeO2 and ZrO2 for aqueous-phase-reforming of glycerol," Catalysis Today, 213, pp.58-64.

[10] Menezes, A. O., Rodrigues, M. T., Zimmaro, A., Borges, L. E. P., Fraga, M. A., 2011, "Production

of renewable hydrogen from aqueous-phase reforming of glycerol over Pt catalysts supported on different oxides," Renewable Energy, 36, pp.595-599.

[11] Ciftci, A., Ligthart, D. A. J. M., Sen, A. O., Van Hoof, A. J. F., Friedrich, H., Hensen, E. J. M., 2014, "Pt-Re synergy in aqueous-phase reforming of glycerol and the wateregas shift reaction," Journal of Catalysis, 311, pp.88-101.

[12] Meryemoglu, B., Kaya, B., Irmak, S., Hesenov, A., Erbatur, O., 2012, "Comparison of batch aqueous-phase reforming of glycerol and lignocellulosic biomass hydrolysate," Fuel, 97, pp.241-244.

[13] Seretis, A., Tsiakaras, P., 2016, "Aqueous phase reforming (APR) of glycerol over platinum supported on Al2O3 catalyst," Renewable Energy, 85, pp.1116-1126.

[14] Ozgur, D. O., Uysal, B. Z., 2011, "Hydrogen production by aqueous phase catalytic reforming of glycerine," Biomass Bioenergy, 35, pp.822-826.

[15] Manfro, R. L., Costa, A. F. d., Ribeiro, N. F. P., Souza, M. M. V. M., 2011, "Hydrogen production by aqueous-phase reforming of glycerol over nickel catalysts supported on CeO2," Fuel Processing Technology, 92, pp.330-335.

[16] Tuza, P. V., Manfro, R. L., Ribeiro, N. F. P., Souza, M. M. V. M., 2013, "Production of renewable hydrogen by aqueous-phase reforming of glycerol over NieCu catalysts derived from hydrotalcite precursors," Renewable Energy, 50, pp.408-414.

[17] Dasari, M. A., Kiatsimkul, P.-P., Sutterlin, W. R., Suppes, G. J., 2005, "Low-pressure hydrogenolysis of glycerol to propylene glycol," Applied Catalysis A: General, 281, pp.225-231.

[18] Xia, S., Yuan, Z., Wang, L., Chen, P., Hou, Z., 2011, "Hydrogenolysis of glycerol on bimetallic PdeCu/solid-base catalysts prepared via layered double hydroxides precursors," Applied Catalysis A: General, 403, pp.173-182.

[19] Gong, L., Lu, Y., Ding, Y., Lin, R., Li, J., Dong, W., Wang, T., Chen, W., 2010, "Selective hydrogenolysis of glycerol to 1,3-propanediol over a Pt/WO3/TiO2/SiO2 catalyst in aqueous media," Applied Catalysis A: General, 390, pp.119-126.

[20] Jimenez-Morales, I., Vila, F., Mariscal, R., Jimenez-Lopez, A., 2012, "Hydrogenolysis of glycerol to obtain 1,2-propanediol on Ce-promoted Ni/SBA-15 catalysts," Applied Catalysis B: Environmental, 117-118, pp.253-259.

[21] Perosa, A., Tundo, P., 2005, "Selective hydrogenolysis of glycerol with Raney nickel " Industrial & Engineering Chemistry Research, 44, pp.8535-8537.

[22] Yadav, G. D., Chandan, P. A., Tekale, D. P., 2012, "Hydrogenolysis of glycerol to 1,2-propanediol over nano-fibrous Ag-OMS-2 catalysts," Industrial & Engineering Chemistry Research, 51, pp.1549-1562.

[23] Amada, Y., Shinmi, Y., Koso, S., Kubota, T., Nakagawa, Y., Tomishige, K., 2011, "Reaction mechanism of the glycerol hydrogenolysis to 1,3-propanediol over IreReOx/ SiO2 catalyst," Applied Catalysis B: Environmental, 105, pp.117-127.

[24] Maris, E., Davis, R., 2007, "Hydrogenolysis of glycerol over carbon-supported Ru and Pt catalysts," Journal of Catalysis, 249, pp.328-337.

[25] Vasiliadou, E. S., Lemonidou, A. A., 2011, "Investigating the performance and deactivation behaviour of silica-supported copper catalysts in glycerol hydrogenolysis," Applied Catalysis A: General, 396, pp.177-185.

[26] Mane, R. B., Ghalwadkar, A. A., Hengne, A. M., Suryawanshi, Y. R., Rode, C. V., 2011, "Role of promoters in copper chromite catalysts for hydrogenolysis of glycerol," Catalysis Today, 164, pp.447-450.

[27] Dou, B., Rickett, G. L., Dupont, V., Williams, P. T., Chen, H., Ding, Y., Ghadiri, M., 2010, "B. Dou, G.L. Rickett, V. Dupont, P.T. Williams, H. Chen, Y. Ding, M. Ghadiri," Bioresource Technology, 101, pp.2436-2442.

[28] Slinn, M., Kendall, K., Mallon, C., Andrews, J., 2008, "Steam reforming of biodiesel byproduct to make renewable hydrogen," Bioresource Technology, 99, pp.5851-5858.

[29] Seretis, A., Tsiakaras, P., 2015, "A thermodynamic analysis of hydrogen production via aqueous phase reforming of glycerol," Fuel Processing Technology, 134.

[30] Lehnert, K., Claus, P., 2008, "Influence of Pt particle size and support type on the aqueous-phase reforming of glycerol," Catalysis Communications, 9, pp.2543-2546.

[31] Marinoiu, A., Ionita, G., Gaspar, C.-L., Cobzaru, C., Oprea, S., 2009, "Glycerol hydrogenolysis to propylene glycol," Reaction Kinetics and Catalysis Letters, 97, pp.315-320.

[32] Rode, C. V., Mane, R. B., Potdar, A. S., Patil, P. B., Niphadkar, P. S., Joshi, P. N., 2012, "Copper modified waste fly ash as a promising catalyst for glycerol hydrogenolysis," Catalysis Today, 190, pp.31-37.

[33] Ma, L., He, D., 2009, "Hydrogenolysis of glycerol to propanediols over highly active RueRe bimetallic catalysts," Topics in Catalysis, 52, pp.834-844.

[34] A. Seretis, P. T., 2016, "Hydrogenolysis of glycerol to propylene glycol by in situ produced hydrogen from aqueous phase reforming of glycerol over SiO2eAl2O3 supported nickel catalyst," Fuel Processing Technology, 142, pp.135-146.

ΠΡΟΩΘΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΟΛΟΥΣ

Άγγελος Νουσδίλης[1], Ελευθέριος Κόντης[1], Γεώργιος Κρυωνίδης[1], Γεώργιος Χριστοφορίδης[2], Σταύρος Αυξέντης[3], Γεώργιος Γεωργίου[3], Γρηγόρης Παπαγιάννης[1]

[1] Εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα
[2] Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη, Ελλάδα
[3] Ερευνητική Μονάδα Ενεργειακής Αειφορίας «ΦΩΣ», Πανεπιστήμιο Κύπρου, Λευκωσία, Κύπρος
e-mail: grigoris@eng.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση συστημάτων μπαταριών αναδύεται τα τελευταία χρόνια ως μια από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Αναμένεται μάλιστα να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), προσφέροντας επικουρικές υπηρεσίες στους διαχειριστές συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Σε επίπεδο καταναλωτών/ίδιο-παραγωγών, η χρήση μπαταριών εξισορροπεί τη διακοπτόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η οποία οφείλεται στη στοχαστική λειτουργία των μονάδων ΑΠΕ, αυξάνοντας σημαντικά τα επίπεδα ίδιο-κατανάλωσης, διασφαλίζοντας παράλληλα υψηλή ποιότητα παρεχόμενης ισχύος. Ωστόσο, για την ευρεία διάδοση και εδραίωση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, απαιτείται η περαιτέρω ανάπτυξή τους καθώς και η άρση τεχνικών περιορισμών που σχετίζονται πρωτίστως με το κόστος, την αξιοπιστία και την απόδοση αυτών των συστημάτων.

Η συγκεκριμένη εργασία περιγράφει συνοπτικά τη μεθοδολογία του ερευνητικού έργου Interreg MED StoRES “Προώθηση της διείσδυσης της διανεμημένης παραγωγής από φωτοβολταϊκά με εφαρμογή αποθήκευσης ενέργειας για όλους”, το οποίο έχει ως στόχο την καταγραφή και εξάλειψη προβλημάτων και αβεβαιοτήτων οι οποίες σχετίζονται με τη χρήση μπαταριών ως μέσο αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Στα πλαίσια του ερευνητικού έργου θα αναπτυχθούν σε πέντε χώρες πιλοτικές εγκαταστάσεις στις οποίες θα συνυπάρχουν φωτοβολταϊκά και συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Σε όλες τις πιλοτικές εγκαταστάσεις θα δοκιμαστούν και θα αξιολογηθούν τεχνικές βελτιστοποίησης της λειτουργίας των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, με στόχο την επίτευξη μεγαλύτερης διείσδυσης φωτοβολταϊκής ενέργειας.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, εξετάζονται οι τεχνολογίες συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας οι οποίες μπορούν να συνδυαστούν με φωτοβολταϊκά συστήματα και οι οποίες θα εξεταστούν στα πλαίσια του ερευνητικού έργου StoRES. Επιπλέον, περιγράφεται η διαδικασία και τα κριτήρια επιλογής των πιλοτικών εγκαταστάσεων σε κάθε χώρα. Τέλος, αναλύεται συνοπτικά η μεθοδολογία που θα ακολουθηθεί για την ανάκτηση και επεξεργασία των δεδομένων από τις πιλοτικές εγκαταστάσεις.

Λέξεις Κλειδιά: *Ίδιο-κατανάλωση, συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπαταριών, σύστημα διαχείρισης ενέργειας, φωτοβολταϊκά*.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τις τελευταίες δεκαετίες, περιβαλλοντικές ανησυχίες, που σχετίζονται κυρίως με τη μείωση εκπομπών αέριων θερμοκηπίου, έχουν στρέψει το ενδιαφέρον στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Η στροφή αυτή μάλιστα αντικατοπτρίζεται και στους πρόσφατους στόχους που έχουν τεθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) [1]. Συγκεκριμένα, η ΕΕ δεσμεύεται να επιτύχει μέχρι το 2020 μείωση των εκπομπών αέριων του θερμοκηπίου ίση με 20% (σε σχέση με τα επίπεδα του 1990) και μείωση ίση με 40% έως το 2030. Επιπρόσθετα, η ΕΕ στοχεύει έως το 2020 το 20% της ηλεκτροπαραγωγής να καλύπτεται από ΑΠΕ, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για το 2030 θα πρέπει να διαμορφωθεί στο 27%. Τέλος, στοχεύει σε βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά 20% και 30% έως το 2020 και το 2030, αντίστοιχα.

Σε αυτό το νέο πλαίσιο, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ΑΠΕ καθίσταται μια βιώσιμη και ταυτόχρονα επιβεβλημένη λύση, η οποία είναι σε θέση αφενός να μειώσει την εξάρτηση της ηλεκτροπαραγωγής από τα ορυκτά καύσιμα και αφετέρου να συμβάλει αποτελεσματικά στην αποκεντροποίηση του ηλεκτρικού δικτύου και στην αύξηση της διείσδυσης μονάδων διανεμημένης παραγωγής (ΔΠ) σε αυτό. Η αύξηση ωστόσο των μονάδων ΔΠ στα υπάρχοντα δίκτυα, ενδέχεται να οδηγήσει σε σοβαρά ζητήματα ποιότητας ισχύος, αξιοπιστίας και ασφάλειας. Οι διακυμάνσεις στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εξαιτίας της στοχαστικής φύσης των μονάδων ΑΠΕ, η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε περιόδους συννεφιάς, νωρίς τη νύκτα, καθώς και μια σειρά προβλημάτων που σχετίζονται με υπερτάσεις, συμφορήσεις δικτύου κλπ., εξαιτίας της αντίστροφης ροής ισχύος στα δίκτυα διανομής, είναι προβλήματα που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά, ώστε να διασφαλιστεί η επάρκεια ισχύος στο δίκτυο.

Για την αντιμετώπιση τέτοιων ζητημάτων προτείνεται, τόσο στη διεθνή βιβλιογραφία όσο στο μακροπρόθεσμο πλαίσιο για το κλίμα και την ενέργεια της ΕΕ, η χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (ΣΑΕ) [2]. Τα συστήματα αυτά είναι σε θέση να εξαλείψουν προβλήματα που σχετίζονται με την υψηλή διείσδυση μονάδων ΔΠ, καθώς και να ενισχύσουν την ευελιξία και την αξιοπιστία των υφιστάμενων δικτύων [3], καλύπτοντας τις ενεργειακές ανάγκες των καταναλωτών σε χρονικές περιόδους κατά τις οποίες οι μονάδες ΑΠΕ δε μπορούν να συνεισφέρουν σε ισχύ.

Παρ' όλα αυτά, σήμερα, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας δε χρησιμοποιούνται ευρέως ούτε από τους διαχειριστές δικτύων διανομής αλλά ούτε και από τους τελικούς καταναλωτές. Τα σημαντικότερα ζητήματα που εμποδίζουν την ανάπτυξη τους σχετίζονται με το υψηλό κόστος αγοράς των μπαταριών καθώς και με την απουσία οικονομικών κινήτρων για την εγκατάστασή τους. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, το κόστος εγκατάστασης μονάδων ΑΠΕ, και ιδιαίτερα το κόστος των φωτοβολταϊκών συστημάτων, μειώνεται ραγδαία [4]. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την πτώση των τιμών των μπαταριών αλλά και με την εξίσωση του ανηγμένου κόστους παραγωγής των μονάδων ΑΠΕ με το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (grid parity), αναμένεται να δημιουργήσει νέες προοπτικές για τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας, καθιστώντας τα μια βιώσιμη εναλλακτική λύση, η οποία χρήζει συστηματικής διερεύνησης από όλους τους εμπλεκόμενους φορείς.

Στόχος του ερευνητικού έργου StoRES είναι η διερεύνηση των βέλτιστων πολιτικών για την αποτελεσματική και αποδοτική ενσωμάτωση και συνεργασία των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας με τις ΑΠΕ. Βασική πρόκληση είναι να αντιμετωπιστούν οι υφιστάμενοι τεχνικοί και οικονομικοί περιορισμοί, ώστε να καταστεί δυνατή μέσω της χρήσης μονάδων αποθήκευσης η περαιτέρω διείσδυση μονάδων ΑΠΕ, και κυρίως οικιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων, στο ενεργειακό μίγμα των νησιών και των αγροτικών περιοχών της Μεσογείου.

Στα πλαίσια του ερευνητικού έργου, θα υλοποιηθεί στις χώρες που συμμετέχουν στο πρόγραμμα μια σειρά από πιλοτικές εγκαταστάσεις. Έτσι, πιλοτικές εγκαταστάσεις θα αναπτυχθούν στην Ελλάδα, την Κύπρο, την Ιταλία, την Ισπανία και την Πορτογαλία. Στις χώρες αυτές απαντώνται διαφορετικές ανάγκες και ιδιαιτερότητες. Η μελέτη και ανάλυση αυτών των διαφορετικών ιδιαίτερων συνθηκών θα οδηγήσει στην ανάπτυξη κοινών τεχνικών λύσεων, οι οποίες θα μπορούν να εφαρμοστούν στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου. Συγκεκριμένα, οι λύσεις που θα προταθούν στοχεύουν στην αύξηση της ίδιο-κατανάλωσης των κατοικιών, στις οποίες υπάρχουν εγκατεστημένα μικρά φωτοβολταϊκά συστήματα, μέσω της ενσωμάτωσης μονάδων αποθήκευσης ενέργειας. Για την επίτευξη αυτού του στόχου θα αναλυθούν και θα εξεταστούν με χρήση των πιλοτικών εγκαταστάσεων διαφορετικές τεχνικές βελτιστοποίησης της ίδιο-κατανάλωσης. Επιπρόσθετα, εκτός από την εγκατάσταση διεσπαρμένων μονάδων αποθήκευσης ενέργειας σε επίπεδο κατοικιών, θα μελετηθεί και η χρήση κεντρικών μονάδων αποθήκευσης ενέργειας. Οι μονάδες αυτές εγκαθίστανται και ελέγχονται από τον

εκάστοτε διαχειριστή δικτύου. Στα πλαίσια του έργου StoRES, μια μονάδα κεντρικής αποθήκευσης θα εγκατασταθεί σε δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας της Κύπρου. Στόχος είναι αφενός να αξιολογηθεί και να συγκριθεί συστηματικά η αποτελεσματικότητα και αποδοτικότητα κεντρικών και διεσπαρμένων μονάδων αποθήκευσης ενέργειας, και αφετέρου να διερευνηθούν οι επικουρικές υπηρεσίες που μπορεί να προσφέρει στους διαχειριστές συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας η χρήση κεντρικών συστημάτων αποθήκευσης. Επιπρόσθετα στα πλαίσια τους έργου, θα προταθούν τεχνικές και μέθοδοι με στόχο τη βέλτιστη διαστασιολόγηση τόσο των κεντρικών όσο και των διεσπαρμένων μονάδων αποθήκευσης ενέργειας προς όφελος όλων των εμπλεκόμενων φορέων (καταναλωτών, ίδιο-παραγωγών, διαχειριστών δικτύων).

2. Επισκόπηση των εξεταζόμενων τεχνικών λύσεων

2.1. Τρόποι διασύνδεσης φωτοβολταϊκών συστημάτων και συστημάτων μπαταριών

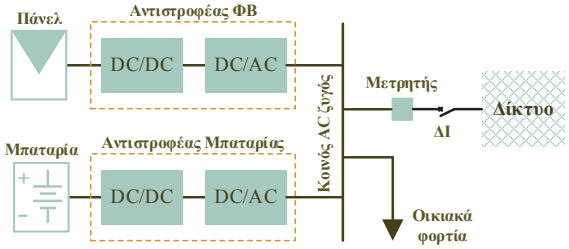
Στόχος του ερευνητικού έργου StoRES είναι η συστηματική αξιολόγηση των υφιστάμενων τεχνικών αποθήκευσης ενέργειας που στηρίζονται στη χρήση μπαταριών, ώστε να εντοπιστούν οι τεχνικοί περιορισμοί που παρουσιάζουν και να προταθούν λύσεις για την αποτελεσματική αντιμετώπισή τους. Για το σκοπό αυτό, στα πλαίσια του προγράμματος πραγματοποιήθηκε έρευνα αγοράς, ώστε να καταγραφούν οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση φωτοβολταϊκών συστημάτων και συστημάτων αποθήκευσης μπαταριών. Η σχετική έρευνα έδειξε ότι τα συστήματα φωτοβολταϊκών και μπαταριών διασυνδέονται με δύο διαφορετικού τρόπους: είτε σε ένα κοινό ζυγό εναλλασσόμενης τάσης (AC-coupled system), είτε σε ένα κοινό ζυγό συνεχούς τάσης (DC-coupled system).

AC-Coupled system. Στη συγκεκριμένη συνδεσμολογία, η οποία εμφανίζεται στην Εικόνα 1, το φωτοβολταϊκό σύστημα διασυνδέεται με τα φορτία του σπιτιού με τη βοήθεια ενός αντιστροφέα (inverter) μονόδρομης ροής ισχύος. Από την άλλη πλευρά, οι μπαταρίες διασυνδέονται στα οικιακά φορτία με τη βοήθεια ενός μετατροπέα αμφίδρομης ροής ισχύος. Φωτοβολταϊκό και μπαταρίες διασυνδέονται στον ίδιο κοινό ζυγό εναλλασσόμενης τάσης, εξυπηρετώντας από κοινού τα φορτία. Ο αντιστροφέας του φωτοβολταϊκού αποτελείται από ένα DC/DC μετατροπέα, ο οποίος χρησιμοποιείται ως σύστημα εύρεσης του σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking System - MPPT), καθώς και από έναν αντιστροφέα που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση του φωτοβολταϊκού στον κοινό ζυγό εναλλασσόμενης τάσης. Ο μετατροπέας της μπαταρίας αποτελείται από ένα DC/DC μετατροπέα, ο οποίος χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της φόρτισης της μπαταρίας, καθώς και από ένα μετατροπέα ο οποίος συνδέει και αποσυνδέει τη μπαταρία στον κοινό ζυγό με το φωτοβολταϊκό και τα φορτία. Το σύστημα φωτοβολταϊκού, μπαταριών και φορτίων διασυνδέεται στο κυρίως δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενός μετρητή αμφίδρομης ροής ηλεκτρικής ισχύος και ενός προαιρετικού διακόπτη ισχύος (ΔΙ). Ο μετρητής του συστήματος επικοινωνεί με τον μετατροπέα της μπαταρίας, ο οποίος χρησιμοποιείται ως κεντρικός ελεγκτής του συστήματος και ρυθμίζει τη ροή ισχύος από και προς τη μπαταρία και κατ' επέκταση από και προς το δίκτυο. Ακολουθώντας αυτήν την προσέγγιση, η μπαταρία αξιοποιείται αποτελεσματικά για την υλοποίηση επικουρικών υπηρεσιών και άλλων λειτουργιών (π.χ. μεγιστοποίηση της ίδιο-κατανάλωσης). Από την άλλη πλευρά, ο διακόπτης ισχύος χρησιμοποιείται για την απομόνωση του συστήματος από το κυρίως δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό μπορεί να συμβεί σε περιπτώσεις διακοπής ρεύματος (απώλεια δικτύου). Σε τέτοιες περιπτώσεις, αν οι κανονισμοί δικτύου το επιτρέπουν, το σύστημα φωτοβολταϊκού-μπαταρίας μπορεί να παράσχει την απαραίτητη εφεδρεία για την τροφοδοσία των τοπικών φορτίων.

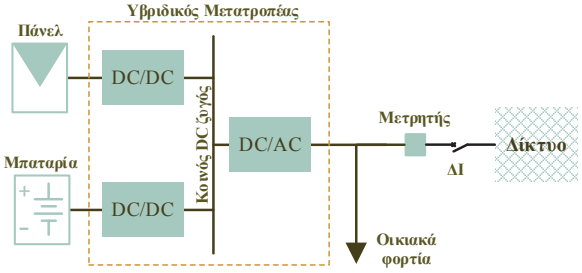
Μειονέκτημα αυτής της συνδεσμολογίας αποτελεί το ότι σε περιπτώσεις εφεδρικής λειτουργίας, ο αντιστροφέας του φωτοβολταϊκού μπορεί να παρέχει ισχύ μόνο εάν και ο αντιστροφέας της μπαταρίας βρίσκεται σε λειτουργία. Σε περίπτωση που ο αντιστροφέας της μπαταρίας σταματήσει απροσδόκητα τη λειτουργία του, τότε το φωτοβολταϊκό δε μπορεί να παρέχει μόνο του ισχύ στα φορτία. Στην πραγματικότητα, σε μια τέτοια περίπτωση, το φωτοβολταϊκό θα σταματήσει αυτόματα τη λειτουργία του, εξαιτίας της αποκαλούμενης λειτουργίας αντί-νησιδοποίησης (anti-islanding mode) με την οποία είναι εφοδιασμένα τα συστήματα φωτοβολταϊκών. Επιπλέον, μια άλλη συνέπεια της λειτουργίας αντί-νησιδοποίησης είναι ότι σε περιπτώσεις που το σύστημα μπαταρίας-φωτοβολταϊκού δεν είναι συνδεδεμένο στο κυρίως δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, τότε ο αντιστροφέας του φωτοβολταϊκού δε μπορεί να παρέχει ενέργεια για τη φόρτιση της μπαταρίας.

DC-Coupled system. Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται δύο διαφορετικές συνδεσμολογίες. Η πρώτη στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρεται με τον όρο "σύστημα επαναπροσαρμογής" (Retrofit system). Σε αυτή ο αντιστροφέας του φωτοβολταϊκού συστήματος χρησιμοποιείται και για τον έλεγχο της φόρτισης/εκφόρτισης της μπαταρίας. Ο συγκεκριμένος τύπος συστήματος μπορεί εύκολα να

χρησιμοποιηθεί σε υφιστάμενες εγκαταστάσεις οικιακών φωτοβολταϊκών. Ωστόσο, αυτή η λύση εμφανίζει μια σειρά μειονεκτημάτων τα οποία οφείλονται στο σχεδιασμό του αντιστροφέα του φωτοβολταϊκού συστήματος. Για αυτό δε θα εξεταστεί στα πλαίσια του ερευνητικού έργου. Η δεύτερη συνδεσμολογία αναφέρεται συνήθως με τον όρο “υβριδικό σύστημα” (Hybrid system). Αυτή απαιτεί την ύπαρξη ενός υβριδικού μετατροπέα. Σε αυτή τη συνδεσμολογία, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 2, το φωτοβολταϊκό σύστημα και η μπαταρία διασυνδέονται σε έναν κοινό ζυγό συνεχούς ρεύματος, ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό του υβριδικού μετατροπέα. Ο μετατροπέας αυτός, αποτελείται από το DC/DC μετατροπέα του φωτοβολταϊκού συστήματος, ο οποίος λειτουργεί ως σύστημα εύρεσης του σημείου λειτουργίας μέγιστης ισχύος, από ένα δεύτερο DC/DC μετατροπέα που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας, καθώς και από ένα αντιστροφέα ισχύος που αναλαμβάνει τη διασύνδεση του συστήματος φωτοβολταϊκού και μπαταρίας με τα φορτία της εγκατάστασης και το κυρίως δίκτυο. Η διασύνδεση με το κυρίως δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται μέσω ενός μετρητή αμφίδρομης ροής ηλεκτρικής ισχύος και ενός προαιρετικού διακόπτη ισχύος. Ο μετρητής επικοινωνεί με τον υβριδικό μετατροπέα, ο οποίος λειτουργεί ως κεντρικός ελεγκτής του συστήματος και ρυθμίζει τη ροή ισχύος από και προς τη μπαταρία και κατ’ επέκταση από και προς το δίκτυο. Και σε αυτή την περίπτωση ο διακόπτης ισχύος χρησιμοποιείται για την απομόνωση του συστήματος από το κυρίως δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, αν οι κανονισμοί δικτύου το επιτρέπουν, το σύστημα φωτοβολταϊκού-μπαταρίας μπορεί να παράσχει την απαραίτητη εφεδρεία για την τροφοδοσία των τοπικών φορτίων. Πλεονέκτημα της συγκεκριμένης συνδεσμολογία αποτελεί το γεγονός ότι εξαλείφει τα μειονεκτήματα του AC-Coupled συστήματος που συζητήθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 1. AC-Coupled συνδεσμολογία.



Εικόνα 2. DC-Coupled συνδεσμολογία.

Συγκριτική αξιολόγηση AC-coupled και DC-coupled συστημάτων. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των δύο συνδεσμολογιών συνοψίζονται επιγραμματικά στον Πίνακα 1. Βασικό πλεονέκτημα των AC-Coupled συστημάτων αποτελεί το γεγονός ότι παρέχουν τη δυνατότητα εύκολης μελλοντικής επέκτασης μέσω της σύνδεσης παράλληλων συστημάτων. Αντίθετα, τα DC-Coupled συστήματα μπορούν να επεκταθούν μόνο μέσω της αναβάθμισης του αντίστοιχου υβριδικού μετατροπέα. Σημαντικό ωστόσο πλεονέκτημα των DC-Coupled συστημάτων έναντι των AC-Coupled, αποτελεί τοι γεγονός ότι η φόρτιση του συστήματος μπαταριών μπορεί να επιτευχθεί ακόμα και σε περιπτώσεις αποσύνδεσης από το κυρίως δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Πίνακας 1. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των AC-Coupled και DC-Coupled συστημάτων.

	AC-Coupled System	**DC-Coupled System**
Πλεονεκτήματα:	1) Εύκολη εφαρμογή σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις 2) Δυνατότητα εύκολης επεκτασιμότητας	1) Απαίτηση λιγότερων εξαρτημάτων και εξοπλισμού 2) Σημαντικά μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης
Μειονεκτήματα:	1) Απαιτείται η ύπαρξη αντιστροφέων τόσο για το σύστημα του φωτοβολταϊκού όσο και για τη μπαταρία 2) Σε περίπτωση αποσύνδεσης από το κυρίως δίκτυο δεν είναι δυνατή η φόρτιση της μπαταρίας	1) Απαιτείται η αντικατάσταση του υφιστάμενου αντιστροφέα του φωτοβολταϊκού συστήματος με ένα υβριδικό μετατροπέα 2) Η επέκταση του συστήματος αποθήκευσης μπαταριών είναι πολύ δαπανηρή

2.2. Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας που στηρίζονται στη χρήση μπαταριών

Στην ενότητα αυτή επιχειρείται μια συνοπτική παρουσίαση των μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας που στηρίζονται στη χρήση μπαταριών και που θα εξεταστούν στα πλαίσια του ερευνητικού έργου StoRES.

Διεσπαρμένες μονάδες αποθήκευσης. Αυτού του τύπου οι μονάδες αποθήκευσης εγκαθίστανται σε επίπεδο κατοικιών. Στα πλαίσια του StoRES, τέτοιου είδους μονάδες θα εγκατασταθούν σε πιλοτικές εγκαταστάσεις κατοικιών σε όλες τις χώρες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Στόχος του ερευνητικού έργου είναι να εξετάσει και να αξιολογήσει το βέλτιστο τρόπο με τον οποίο μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα συγκεκριμένα μέσα αποθήκευσης, ώστε να επιτευχθεί ο μέγιστος δυνατός βαθμός ίδιο-κατανάλωσης καθώς και το μέγιστο δυνατό επίπεδο διείσδυσης φωτοβολταϊκών στο δίκτυο. Λειτουργίες όπως η παροχή εφεδρείας σε περιπτώσεις αποσύνδεσης από το κυρίως δίκτυο δεν θα εξεταστούν στα πλαίσια του προγράμματος. Ως εκ τούτου, στις πιλοτικές εγκαταστάσεις κατοικιών, στις οποίες θα υπάρχουν διεσπαρμένα μέσα αποθήκευσης, θα εξεταστούν τόσο η AC-Coupled όσο η DC-Coupled συνδεσμολογίες που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Το μέγεθος των μονάδων αποθήκευσης που θα εγκατασταθούν στις πιλοτικές εγκαταστάσεις κάθε χώρας καθώς και η ονομαστική ισχύς των αντίστοιχων αντιστροφέων θα προσδιοριστεί σε κάθε εγκατάσταση αφενός με βάση την ισχύ του διαθέσιμου φωτοβολταϊκού συστήματος και αφετέρου με βάση τυπικές καμπύλες παραγωγής και κατανάλωσης που αντιστοιχούν στα χαρακτηριστικά των επιλεγμένων κατοικιών.

Κεντρικές μονάδες αποθήκευσης. Οι παραπάνω λύσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε επίπεδο κατοικιών. Στα πλαίσια του StoRES, ωστόσο, θα εξεταστεί και η δυνατότητα χρήσης κεντρικών μονάδων αποθήκευσης ενέργειας, ώστε να διερευνηθούν οι δυνατότητες και τα πλεονεκτήματα που αυτές προσφέρουν. Για το σκοπό αυτό, θα αναπτυχθεί μια πιλοτική εγκατάσταση στην Κύπρο. Το κεντρικό σύστημα αποθήκευσης θα εγκατασταθεί σε ένα προεπιλεγμένο υποσταθμό διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και θα συνδεθεί με ένα ζυγό που τροφοδοτεί πιλοτικές εγκαταστάσεις οικιακών καταναλωτών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα εξεταστεί μόνο η AC-Coupled συνδεσμολογία, καθώς δε θα υπάρχει άμεση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά.

Υπηρεσίες που μπορούν να προσφερθούν από τα εξεταζόμενα συστήματα αποθήκευσης. Η χρήση συστημάτων αποθήκευσης μπορεί να προσφέρει μια σειρά από υπηρεσίες. Η πιο σημαντική ίσως από αυτές είναι η εξισορρόπηση της στοχαστικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των μονάδων ΑΠΕ. Επιπλέον, τα συστήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την προσφορά επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο μεταφοράς, στο δίκτυο διανομής, καθώς για την προσφορά υπηρεσιών στους ίδιο-παραγωγούς του δικτύου. Συγκεκριμένα, το ερευνητικό έργο StoRES θα δώσει έμφαση και θα αξιολογήσει τις επικουρικές υπηρεσίες του Πίνακα 2. Στόχος είναι η ανάπτυξη κατάλληλων σχημάτων και αλγορίθμων ελέγχου που θα βελτιστοποιήσουν τη διαχείριση ενέργειας και

θα εξασφαλίσουν το μέγιστο δυνατό βαθμό ίδιο-κατανάλωσης και τη μέγιστη διείσδυση μονάδων ΑΠΕ στα υπάρχοντα δίκτυα.

Πίνακας 2. Προτεινόμενες υπηρεσίες που μπορούν να προσφερθούν από τις μονάδες αποθήκευσης ενέργειας.

Υπηρεσίες προσφερόμενες στους ίδιο-παραγωγούς του δικτύου	Υπηρεσίες προς το διαχειριστή του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας
1) Αύξηση του βαθμού ίδιο-κατανάλωσης	1) Έλεγχος άεργης ισχύος
2) Εξάλειψη αιχμών φορτίου (Peak shaving)	2) Διαχείριση συμφόρησης δικτύου
3) Διαχείριση χρονοχρεώσεων	3) Στήριξη τάσης
4) Στήριξη τάσης	4) Στήριξη συχνότητας
5) Στήριξη συχνότητας	5) Βέλτιστη διαστασιολόγηση συστήματος αποθήκευσης

Τεχνολογίες μπαταριών. Η τεχνολογία μπαταριών που θα χρησιμοποιηθεί τόσο για τις διεσπαρμένες όσο και για τις κεντρικές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας είναι αυτή των μπαταριών ιόντων λιθίου. Η υψηλή πυκνότητα ενέργειας και ισχύος που προσφέρουν οι συγκεκριμένες μπαταρίες σε συνδυασμό με τη μεγάλη ανθεκτικότητα, τις μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης και τον υψηλό βαθμό απόδοσης που εμφανίζουν [5] – [8], τις καθιστούν ιδιαίτερα ελκυστικές για τις εφαρμογές που θα διερευνηθούν στα πλαίσια του ερευνητικού έργου StoRES. Στα μειονεκτήματα αυτών των μπαταριών συγκαταλέγονται το υψηλό κόστος αγοράς, η χρήση επικίνδυνων υλικών για την κατασκευή τους, καθώς και κίνδυνοι που προκαλούνται από την έκθεση τους στον ήλιο, σε υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος και ισχυρά ρεύματα. Ωστόσο, έχει αποδειχθεί [6] ότι η χρήση συστημάτων διαχείρισης της λειτουργίας της μπαταρίας (battery management systems) εξασφαλίζει τις κατάλληλες συνθήκες λειτουργίας [9], μειώνοντας στο ελάχιστο τους κινδύνους που προ-αναφέρθηκαν. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των μπαταριών ιόντων λιθίου μπορούν να ανακυκλωθούν, μειώνοντας στο ελάχιστο τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από την κατασκευή τους [10]. Το σχετικό κόστος ωστόσο προς το παρόν παραμένει ιδιαίτερα υψηλό.

3. Επιλογή πιλοτικών εγκαταστάσεων

Προκειμένου να διασφαλιστεί η απαιτούμενη διαφάνεια, η επιλογή των πιλοτικών εγκαταστάσεων πραγματοποιήθηκε σε όλες τις χώρες του προγράμματος με βάση την ακόλουθη διαδικασία: Αρχικά, οι ενδιαφερόμενοι ίδιο-παραγωγοί κατέθεσαν αίτηση ενδιαφέροντος, ώστε να συμμετάσχουν στο ερευνητικό έργο. Στη συνέχεια, η λίστα των τελικών συμμετεχόντων καταρτίστηκε σε στενή συνεργασία με τις τοπικές αρχές, ώστε να διασφαλιστεί ότι όλες οι πιλοτικές εγκαταστάσεις θα πληρούν κάποιες σαφώς προδιαγεγραμμένες προδιαγραφές καθώς και να εξασφαλιστεί ότι οι επιλεγμένες πιλοτικές εγκαταστάσεις θα εμφανίζουν κοινά χαρακτηριστικά, ώστε να καταστεί εφικτή η σύγκριση των σχετικών αποτελεσμάτων. Η επιλογή των πιλοτικών εγκαταστάσεων σε κάθε χώρα πραγματοποιήθηκε αφενός με βάση την κείμενη νομοθεσία και αφετέρου λαμβάνοντας υπόψη όλους τους σχετικούς τεχνικούς περιορισμούς, όπως για παράδειγμα τη μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ του φωτοβολταϊκού συστήματος. Σε όλες τις χώρες, η επιλογή των πιλοτικών εγκαταστάσεων περιορίστηκε αποκλειστικά σε υφιστάμενες κατοικίες οι οποίες διαθέτουν φωτοβολταϊκά συστήματα. Συνοπτικές πληροφορίες για τις επιλεγμένες πιλοτικές εγκαταστάσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Οι μεγάλες αποκλίσεις στην ονομαστική ισχύ του φωτοβολταϊκού συστήματος οφείλονται στους σχετικούς περιορισμούς που τίθενται από τις εκάστοτε εθνικές νομοθεσίες. Η χρήση συστημάτων με διαφορετικές ισχύεις αποτελεί ευκαιρία για συστηματική μελέτη της επίδρασης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε ένα μεγάλο εύρος διακριτών λειτουργικών συνθηκών.

Πίνακας 3. Συνοπτική επισκόπηση των πιλοτικών εγκαταστάσεων.

Χώρα	Αριθμός πιλοτικών εγκαταστάσεων	Τύπος πιλοτικής εγκατάστασης	Ισχύς φωτοβολταϊκού συστήματος
Κύπρος	5	Κατοικίες	3 – 5 kWp
Ελλάδα	5	Κατοικίες και κτίρια γραφείων	5 – 20 kWp
Ιταλία	11	Κατοικίες	3 – 12.5 kWp
Πορτογαλία	5	Κατοικίες	1 – 1.5 kWp
Ισπανία	5	Κατοικίες	3 – 10 kWp

4. Σύστημα απόκτησης δεδομένων

Στις πιλοτικές εγκαταστάσεις θα εξεταστούν διαφορετικά συστήματα διαχείρισης ενέργειας προκειμένου να μελετηθεί αφενός ο αντίκτυπός τους στην αύξηση της ίδιο-κατανάλωσης και αφετέρου η συμβολή τους στην περαιτέρω διείσδυση των φωτοβολταϊκών συστημάτων στο δίκτυο. Επιπρόσθετα, θα αξιολογηθούν οι υπηρεσίες που προσφέρονται από τα μέσα αποθήκευσης ενέργειας και συνοψίζονται στον Πίνακα 2. Για την αξιολόγηση αυτών των παραμέτρων απαιτείται η συστηματική συλλογή και παρακολούθηση δεδομένων από τις πιλοτικές εγκαταστάσεις.

Για το σκοπό αυτό θα οριστούν και θα παρακολουθούνται καθ' όλη τη διάρκεια του ερευνητικού έργου συγκεκριμένα μεγέθη των πιλοτικών εγκαταστάσεων (τάση, συχνότητα, ρεύμα, βαθμός εκφόρτισης μπαταριών, κοκ). Όλα τα μεγέθη θα καταγράφονται σε όλες τις πιλοτικές εγκαταστάσεις με βάση ένα κοινό σύστημα καταγραφής και με σαφώς προδιαγεγραμμένους ρυθμούς δειγματοληψίας. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, θα εγκατασταθεί σε κάθε πιλοτική εγκατάσταση ένα σύστημα παρακολούθησης. Συγκεκριμένα, θα εγκατασταθούν τουλάχιστον δύο έξυπνοι μετρητές (smart meters) οι οποίοι θα καταγράφουν την ενέργεια που εισέρχεται και εξέρχεται από και προς το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, αντίστοιχα, καθώς και στοιχεία που αφορούν την παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος και την κατανάλωση της κατοικίας. Επιπλέον, θα παρακολουθείται συνεχώς η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας του συστήματος μέσω της διεπαφής χρήστη που διαθέτει ο μετατροπέας της μπαταρίας. Πληροφορίες σχετικές με την κατάσταση του δικτύου και το βαθμό απόδοσης του συστήματος θα αποκτώνται είτε με χρήση του υφιστάμενου καταγραφικού εξοπλισμού είτε μέσω της εγκατάστασης πρόσθετων έξυπνων μετρητών. Μετρήσεις από όλες τις πιλοτικές εγκαταστάσεις θα λαμβάνονται ανά 30 λεπτά και θα συγκεντρώνονται τοπικά, σε εθνικό επίπεδο, για περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία.

Κατά την συλλογή και επεξεργασία των μετρήσεων καθώς και κατά τη δημοσιοποίηση των σχετικών αποτελεσμάτων θα πρέπει να διασφαλιστεί η προστασία των προσωπικών δεδομένων των ενοίκων των πιλοτικών εγκαταστάσεων. Για το σκοπό αυτό, η αποστολή των μετρήσεων στα εθνικά κέντρα δεδομένων θα πραγματοποιηθεί μέσω ασφαλών διαύλων επικοινωνίας (secure communication links) ενώ παράλληλα θα εφαρμοστούν και αυστηρά πρωτόκολλα ασφαλείας.

5. Συμπεράσματα και αναμενόμενα αποτελέσματα

Τα συστήματα και οι τεχνικές που προτείνονται στα πλαίσια του ερευνητικού έργου StoRES θα εφαρμοστούν σε επιλεγμένες πιλοτικές εγκαταστάσεις σε πέντε διαφορετικές χώρες της Μεσογείου. Στόχος είναι να διερευνηθεί συστηματικά η λειτουργικότητα και η αποδοτικότητα των μέσων αποθήκευσης ενέργειας και κυρίως οι δυνατότητες που αυτά προσφέρουν για την αύξηση της ίδιο-κατανάλωσης, την παροχή επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο και την αύξηση της διείσδυσης των μονάδων ΔΠ στα υπάρχοντα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπρόσθετα, στα πλαίσια του προγράμματος, θα εξεταστούν ζητήματα που σχετίζονται με την ευστάθεια του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και οφείλονται στη μεγάλη διείσδυση μονάδων αποθήκευσης.

Η ανάπτυξη των πιλοτικών εγκαταστάσεων σε όλες τις χώρες αναμένεται να έχει ολοκληρωθεί μέχρι το τέλος του 2017. Σε όλες τις πιλοτικές εγκαταστάσεις εκτός από μονάδες αποθήκευσης μπαταριών θα εγκατασταθούν και έξυπνοι μετρητές οι οποίοι θα καταγράφουν κάθε 30 λεπτά την παραγωγή, την κατανάλωση, την ισχύ που εισέρχεται και εξέρχεται από και προς το δίκτυο, αντίστοιχα.

Χρησιμοποιώντας αυτές τις μετρήσεις, η ερευνητική ομάδα του προγράμματος θα αξιολογήσει την απόδοση και την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων τεχνικών διαχείρισης ενέργειας, καθώς και των επικουρικών υπηρεσιών (π.χ. υποστήριξη τάσης ή/και συχνότητας) που μπορούν να προσφέρουν τα μέσα αποθήκευσης στο κυρίως δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα σχετικά αποτελέσματα θα κοινοποιηθούν σε όλους τους ενδιαφερόμενους φορείς (διαχειριστές δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, ρυθμιστικές αρχές, κοκ) που συμμετέχουν στο ερευνητικό πρόγραμμα. Η ερευνητική ομάδα του StoRES, θεωρεί πως κάτι τέτοιο θα βοηθήσει σημαντικά στην ανάπτυξη και υιοθέτηση νέων πολιτικών που ως στόχο θα έχουν την περαιτέρω διείσδυση μονάδων ΑΠΕ στα υπάρχοντα δίκτυα και επιπλέον θα προετοιμάσει το δρόμο για τη δημιουργία ενεργειακών συστημάτων με υψηλά ποσοστά διείσδυση ΑΠΕ, η ασφαλής λειτουργία και αξιοπιστία των οποίων θα διασφαλίζεται μέσω της ύπαρξης εκτεταμένων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το ερευνητικό έργο StoRES συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό ταμείο περιφερειακής ανάπτυξης μέσω του προγράμματος Interreg MED.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] EC, “Towards an Integrated Roadmap: Research Innovation Challenges and Needs of the EU Energy System,” December 2014.

[2] EC, “CleanEnergy fol All Europeans-unlocking Europe’s growth potential,” November 2016.

[3] F. Steinke et al, “Grid vs storage in a 100% renewable Europe”, Renwable Energy vol. 50, pp. 826-832, 2013.

[4] A. Jager-Waldau, “PV status Report”, EUR 28159 EN, 2016.

[5] IPHE, “Battery energy storage technologies for power system,” 2012.

[6] IEC, “Electrical energy storage,” 2011.

[7] M. Sylvester, “Fronius PV storage solution training,” 2015.

[8] S. Madden, “Fast response energy storage devices,” 2009.

[9] M. Akdere, et. al, “Hardware and software framework for an open battery management system in safety-critical applications”, IECON 2016.

[10] A. Boyden, et. al, “The environmental impacts of recycling portable lithium-ion batteries,” Procedia CIRP, vol. 48, pp. 188-193, 2016.

Βιομάζα - Βιοκαύσιμα

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΞΥΛΩΔΟΥΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΑΠΟ ΔΕΚΑΕΤΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΦΥΤΕΙΑ ΤΟΥ ΔΑΣΟΠΟΝΙΚΟΥ ΕΙΔΟΥΣ *FRAXINUS ANGUSTIFOLIA* VAHL. ΓΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΧΡΗΣΗ

Κώστας Α. Σπανός*, Διονύσης Γαϊτάνης, Νίκος Νάνος

Ινστιτούτο Δασικών Ερευνών, ΕΛ.Γ.Ο.-ΔΗΜΗΤΡΑ
e-mail: kspanos@fri.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το ιθαγενές δασοπονικό είδος *Fraxinus angustifolia* Vahl. (στενόφυλλος φράξος) ανήκει στα ταχυαυξή ευγενή πλατύφυλλα. Με δεδομένη την υψηλή του πρεμνοβλαστική ικανότητα, το σχετικά βαρύ ξύλο (700-750 kg/m^3) αλλά και την ταχυαύξειά του, το είδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε φυτείες παραγωγής βιομάζας για παραγωγή ενέργειας. Στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού προγράμματος FRAXIGEN (EVK2-CT-2001-00180), οχτώ φυσικοί πληθυσμοί του είδους αναγνωρίσθηκαν σε όλη την ηπειρωτική Ελλάδα και επιλέχθηκαν για έρευνα. Το Μάρτιο του 2006 έγινε εγκατάσταση πειραματικής φυτείας των προελεύσεων (13-20 φυτά ανά προέλευση), με διετή φυτάρια και φυτευτικό συνδεσμο 3 x 3 m (111 φυτά/στρέμμα), στην περιοχή Μεσιά (Ν. Κιλκίς) στα αναχώματα του ποταμού Αξιού. Το Δεκέμβριο του 2016 καταγράφηκαν οι βιομετρικές παράμετροι (ύψος, στηθιαία διάμετρος ή DBH, διάμετρος βάσης κορμού ή DB) καθώς και η παραγωγή χλωρής και ξηρής ξυλώδους βιομάζας με βάση το μέσο δέντρο της κάθε προέλευσης. Στην καταγραφή, κάθε προέλευση αντιπροσωπεύονταν από 13-20 δέντρα, ανάλογα με την διαθεσιμότητα των φυτών της κάθε προέλευσης. Έγινε υλοτόμηση του μέσου δέντρου κάθε προέλευσης και στη συνέχεια μετρήθηκαν το χλωρό και ξηρό βάρος καθώς και η περιεχόμενη υγρασία του ξύλου. Διακρίθηκαν τέσσερες κατηγορίες προϊόντων ξυλώδους βιομάζας με βάση τη διάμετρο/πάχος των κορμών/κλάδων, ως εξής: κατηγορία (I) >12 cm (κυρίως κορμόξυλο), κατηγορία (II) 8-12 cm (χοντρά κλαδιά), κατηγορία (III) 4-8 cm (μετρίου πάχους κλαδιά), και κατηγορία (IV) 0-4cm (λεπτά κλαδιά). Σε σχέση με τη στηθιαία διάμετρο, η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε σημαντικές διαφορές ($p<0,05$) μεταξύ των προελεύσεων, με την προέλευση 14FAN να δίνει την μεγαλύτερη διάμετρο (15,9 cm) ενώ η 09FAN τη μικρότερη (12,6 cm). Σε σχέση με τη διάμετρο βάσης, βρέθηκαν επίσης σημαντικές διαφορές ($p<0,05$) μεταξύ των προελεύσεων με την προέλευση 14FAN να δίνει την μεγαλύτερη διάμετρο (20,6 cm) ενώ η 09FAN τη μικρότερη (16,5 cm). Όσον αφορά το συνολικό ύψος, τα αποτελέσματα δεν έδειξαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των προελεύσεων. Η περιεχόμενη υγρασία μετρήθηκε και κυμαινόταν από 30,8-33,7% (επί του χλωρού βάρους), ανάλογα με την προέλευση και την κατηγορία βιομάζας. Σε σχέση με τη συνολική χλωρή βιομάζα, αυτή κυμαινόταν από 82-157 kg/δέντρο ενώ η ξηρή βιομάζα από 54-107 kg/δέντρο (5.994-11.877 kg/στρέμμα), ανάλογα με την προέλευση. Με μια μέση θερμική τιμή τα 19 MJ/kg ξύλου, η συνολική θερμική ενέργεια της παραχθείσας βιομάζας στο στρέμμα κυμαίνεται από 114.000 MJ (ή 31.692 kWh) για την προέλευση 08FAN και έως 224.960 MJ (ή 62.500 kWh) για την προέλευση 14FAN. Σε σχέση με τις κατηγορίες βιομάζας, σημαντικό εύρημα είναι ότι η κατηγορία των λεπτών κλαδιών έδωσε αρκετά υψηλές τιμές ξηρής βιομάζας που κυμάνθηκαν από 34,20% έως 39,92% του συνολικού ξηρού βάρους του μέσου δέντρου. Η συσχέτιση της στηθιαίας διαμέτρου με το συνολικό ξηρό βάρος (Σ.Ξ.Β.) δεν βρέθηκε σημαντική ($p = 0,079$, $r^2 = 0,427$). Αντίθετα, η συσχέτιση της διαμέτρου βάσης με το Σ.Ξ.Β. βρέθηκε σημαντική ($p = 0,020$, $r^2 = 0,624$). Με βάση αυτό το μοντέλο μπορεί να γίνεται εκτίμηση του Σ.Ξ.Β. μιας ιστάμενης ενεργειακής φυτείας από τη διάμετρο βάσης. Η έρευνα συνεχίζεται, ενώ ταυτόχρονα η φυτεία λειτουργεί σαν πιλοτική φυτεία επίδειξης παραγωγής ξυλώδους βιομάζας (η πρώτη στη χώρα) του υπό μελέτη είδους.

Λέξεις Κλειδιά: δασοπονική φυτεία, στενόφυλλος φράξος, βιομετρικές παράμετροι, ξυλώδης βιομάζα, ενεργειακή χρήση.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή ξυλώδους βιομάζας για ενεργειακή χρήση από φυτείες ταχυαυξών δασικών δέντρων, γνωστή και ως δασοπονία μικρού περίτροπου χρόνου (Μ.Π.Χ), έχει μελετηθεί από τις αρχές της δεκαετία του '60 μετά την παγκόσμια πετρελαϊκή κρίση [1, 2, 3]. Κατά την τελευταία εικοσαετία, ωστόσο, πρατηρείται ένα αυξημένο ενδιαφέρον για έρευνα σε αυτό τον τομέα λόγω της ανάγκης αλλαγής του ενεργειακού μοντέλου της Ευρώπης με στόχο την παραγωγή του 20% της συνολκής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας μέχρι το 2020.

Οι δασικές φυτείες παραγωγής βιομάζας εγκαθίστανται συνήθως σε γεωργικά εδάφη, σε εκτάσεις σε αγρανάπαυση, σε εγκαταλειμμένες εκτάσεις αλλά και στις παρυφές δασών- λιβαδιών και σε παραποτάμιες εκτάσεις. Στις φυτείες αυτές χρησιμοποιείται, συνήθως, πολύ πυκνός φυτευτικός σύνδεσμος (5.000 έως 40.000 φυτά/εκτάριο) που όμως σε εξαιρετικές περιπτώσεις, μπορεί να μειωθεί ακόμη και στα 1.100 δεντρύλια/εκτάριο ανάλογα με τον περίτροπο χρόνο και τα αναμενόμενα τελικά προϊόντα. Επιπλέον, ο περίτροπος χρόνος της φυτείας είναι εξαιρετικά μικρός (σε σύγκριση με τον περίτροπο χρόνο άλλων δασικών εκμεταλεύσεων) και μπορεί να συμπιεστεί μέχρι και τα 3-5 χρόνια. Μετά την πρώτη περίοδο συγκομιδής και σε συνάρτηση με την πρεμνοβλαστική ικανότητα του είδους, η φυτεία υπόκειται σε ένα δεύτερο κύκλο εκμετάλλευσης (ή και περισσότερους κύκλους) χωρίς την ανάγκη νέας φύτευσης.

Η παραγωγή βιομάζας έχει αναφερθεί ότι ποικίλλει μεταξύ ειδών, ποικιλιών και κλώνων με μεγάλο εύρος παραγωγής (ξηρό βάρος) που μπορεί να κυμαίνεται από 8 έως 35 tns/ha/έτος [1, 3], , ανάλογα με τον αριθμό των δέντρων/ha [4, 5], τις τοπικές συνθήκες και τις καλλιεργητικές φροντίδες [6, 7, 8]. Η παραγωγή βιομάζας από φυτείες ταχυαυξών δασικών δέντρων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, σπουδαιότεροι των οποίων είναι [1, 2, 4]: 1) δασοπονικό είδος, 2) προέλευση, ποικιλία ή κλώνος, 3) φυτευτικός σύνδεσμος, 4) πειραματικός σχεδιασμός (αμιγείς ή μικτές φυτείες), 5) φυτευτικό υλικό (δενδρύλλια ή μοσχεύματα, διαστάσεις μοσχευμάτων), 6) καλλιεργητικές φροντίδες (φρεζάρισμα, λίπανση, άρδευση, φυτοπροστασία, αραίωση), και 7) εδαφικές και κλιματικές συνθήκες.

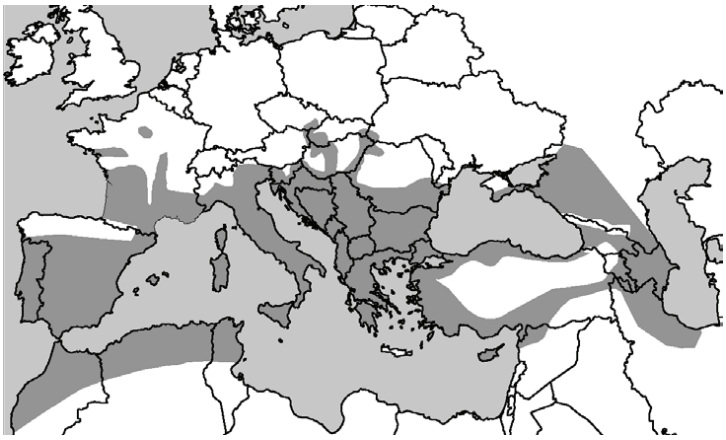
Μια από τις πιο σημαντικές αποφάσεις κατά την εγκατάσταση μιας φυτείας Μ.Π.Χ. είναι η επιλογή του δασοπονικού είδους. Τα είδη που έχουν χρησιμοποιηθεί περισσότερο για αυτό το σκοπό είναι η λεύκη (*Populus* spp,) [1, 3, 9]), η ιτιά (*Salix* spp.) [5, 10], και ο ευκάλυπτος *(Eucalyptus* spp.) [6,11], λόγω της ταχυαύξειας και ιδιαίτερα στα πρώτα χρόνια της φυτείας. Μολονότι είναι δύσκολο να εξαχθούν γενικευμένα συμπεράσματα για το πιο είδος είναι το πιο ενδεδειγμένο για την εγκατάσταση φυτείας - αφού η πραγματική παραγωγή βιομάζας εξαρτάται από τις σταθμολογικές συνθήκες του εδάφους- τα πιο πρόσφατα δεδομένα αποδεικνύουν ότι σε καλά εδάφη τα είδη του γένους *Populus* και *Salix* είναι τα πιο ενδεδειγμένα. Ωστόσο, οι δοκιμές με νέα ταχυαυξή είδη είναι αναγκαία όχι μόνο για τον προσδιορισμό του είδους με τη μεγαλύτερη παραγωγική ικανότητα για κάθε περιοχή αλλά και λόγω της ολοένα και μεγαλύτερης ανάγκης αποφυγής των μειονεκτημάτων των μεγάλων σε έκταση μονοκαλλιεργιών. Σε πολλές περιπτώσεις τα αποτελέσμτα δείχνουν ότι η εγκατάσταση φυτείας με περισσότερα από ένα είδη σε μίξη μπορεί να επιφέρει όχι μόνο μεγαλύτερη παραγωγή αλλά και άλλα πλεονεκτήμτα όπως για παράδειγμα μεγαλύτερη ανθεκτικότητα σε ασθένειες και ακραία καιρικά φαινόμενα [12]. Έτσι, πέρα από τα προαναφερθέντα είδη λεύκης, ιτιάς και ευκαλύπτου η έρευνα έχει στραφεί -με διαφορετικούς βαθμούς επιτυχίας- και σε άλλα είδη όπως η *Paulownia* spp. [8, 13], η φτελιά (*Ulmus* spp.) [14] ψευδακακία (*Robinia pseudoacacia*) [15], η ακακία (*Acacia* spp.*)* [16] *και ο φράξος* (*Fraxinus* spp.) [17].

Παράλληλα με τη σωστή επιλογή του είδους προς φύτευση, πρέπει να αποφασιστεί η προέλευση του γενετικού υλικού που θα χρησιμοποιηθεί για την εγκατάσταση μιας φυτείας Μ.Π.Χ. Ωστόσο, μια τέτοια απόφαση είναι δύσκολη με δεδομένη τη μεγάλη γενετική ποικιλομορφία μεταξύ των πληθυσμών των δασικών ειδών και την διαφοροποίηση τους σε σχέση με το περιβάλλον προέλευσης [18]. Έτσι, η γενετική σύσταση των πληθυσμών των περισσότερων δασικών ειδών, που ποικίλει μεταξύ των προελεύσεων, μπορεί να αποτελέσει βασικό παράγοντα που καθορίζει την παραγωγική ικανότητα μιας φυτείας.

Το ιθαγενές δασοπονικό είδος *Fraxinus angustifolia* Vahl. (στενόφυλλος φράξος) ανήκει στα ταχυαυξή ευγενή πλατύφυλλα και η φυσική του εξάπωση περιλαμβάνει σχεδόν όλη την παραμεσογειακή ζώνη βλάστησης και εκτείνεται μέχρι την Κασπία Θάλασσα [19] (Εικ. 1). Ανήκει στην οικογένεια Oleaceae και είναι ένα από τα τρία αυτοφυή είδη φράξου στην Ευρώπη (*Fraxinus excelsior, F. angustifolia, F. ornus*) [20, 21]. Είναι διπλοειδές είδος (2*n*=46) και παρουσιάζει μεγάλη γενετική ποικιλότητα μέσα στους πληθυσμούς καθώς και μεταξύ των πληθυσμών (σε μικρότερο βαθμό) [19, 22]. Το ξύλο του είναι σχετικά βαρύ (700-750 kg/m^3), έχει υψηλή θερμιδική απόδοση και διάρκεια στην καύση

(καυσόξυλο). Το ξύλο του είναι πολύτιμο με τιμές μεγαλύτερες των 800 €/m^3 (πριστή ξυλεία). Το είδος είναι άριστο για την παραγωγή ξυλώδους βιομάζας καθώς και χλωρής βιομάζας (για ζωοτροφή). Έχει υψηλή πρεμνοβλαστική και κορμοβλαστική ικανότητα. Είναι ιδανικό για την αποκατάσταση και βελτίωση των παραποτάμιων οικοσυστημάτων και άλλων υγροτόπων καθώς και εποχιακά πλημμυρισμένων εδαφών [19, 20]. Το είδος έχει συμπεριληφθεί στη λίστα των δασοπονικών ειδών για αναδασώσεις γεωργικών γαιών (και εν δυνάμει μπορεί να επιδοτείται). Το είδος αυτό γενικά δεν έχει χρησιμοποιηθεί προηγουμένως σε φυτείες Μ.Π.Χ. στην Ελλάδα ενώ στην Τουρκία έχει χρησιμοποιηθεί σε πειράματα προελεύσεων και παραγωγής βιομάζας [23]. Στην Ευρώπη το συγγενικό του είδος *Fraxinus excelsior* έχει χρησιμοποιηθεί και χρησιμοποιείται ευρέως [19, 24].

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός πρώτου πειράματος εγκατάστασης βιο-ενεργειακής φυτείας με άτομα του είδους *Fraxinus angustifolia* στην Ελλάδα και εξετάζεται η πιθανότητα χρησιμοποίησης του σε μεγάλη κλίμακα για παραγωγή ξυλώδους βιομάζας. Η φυτεία που εγκαταστάθηκε στην περιοχή του Αξιού ποταμού (Ν. Κιλκίς) το 2006, έδωσε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα κατά την υλοτόμησή της τον Ιανουάριο του 2016 (10 ετής περίτροπος) ενώ στο μέλλον μπορεί να αποδειχτεί χρήσιμη για τον υπολογισμό της παραγωγικότητας της στον δεύτερο κύκλο παραγωγής.



Εικόνα 1: Γεωγραφική εξάπλωση του είδους Fraxinus angustifolia στην Ευρώπη (Fraxigen, 2005).

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στο πλαίσιο του Ευρωπαϊκού προγράμματος FRAXIGEN (EVK2-CT-2001-00180), οχτώ φυσικοί πληθυσμοί αναγνωρίσθηκαν σε όλη την ηπειρωτική Ελλάδα και επιλέχθηκαν για έρευνα (Πιν. 1). Οι πληθυσμοί επιλέχτηκαν με βάση την κυριαρχία του είδους μέσα στις συστάδες ενώ η επιλογή των ατόμων για την συλλογή των σπόρων έγινε με τυχαίο τρόπο διατηρώντας πάντα μία ελάχιστη απόσταση 50 μέτρων μεταξύ των επιλεγμένων ατόμων. Το φυτευτικό υλικό (σπόροι) συλλέχτηκε από 20-25 άτομα ανά προέλευση τον Ιούνιο του 2003 από άτομα με μέσα φαινοτυπικά χαρακτηριστικά. Οι σπόροι μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο όπου και προετοιμάστηκαν για σπορά.

Πίνακας 1: Γεωγραφικά χαρακτηριστικά των φυσικών πληθυσμών του F. angustifolia που επιλέχθηκαν για τη μελέτη.

Κωδικός πληθυσμού	Πληθυσμός (Περιοχή)	Γεωγραφικό Πλάτος (°)	Γεωγραφικό Μήκος (°)	Υψόμετρο (m)
08FAN	Μελία	40.58.300	26.07.400	155-170
09FAN	Κομοτηνή	40.59.506	25.23.300	10-15
11FAN	Δοϊράνη	41.14.701	22.46.357	50
12FAN	Ιερισσός	40.27.550	23.49.000	10-20
13FAN	Ομόλιο	39.53.575	22.37.186	16-20
14FAN	Εύβοια	38.49.144	23.25.25	120
15FAN	Λούρος	39.09.190	20.45.778	50
16FAN	Καλάβρυτα	37.56.291	22.04.093	870

2.1. Εγκατάσταση της φυτείας

Το Μάρτιο του 2006 έγινε εγκατάσταση πειραματικής φυτείας στην περιοχή Μεσιά του Νομού Κιλκίς μεταξύ των αναχωμάτων του ποταμού Αξιού (Γ.Π. 40° 53' 16", Γ.Μ. 22° 36' 41", υψόμετρο 19m) χρησιμοποιώντας 13-20 φυτά ανά προέλευση. Σε κάποιες από τις προελεύσεις, λόγω χρήσης σε άλλα πειράματα, δεν στάθηκε δυνατή η παραγωγή 20 φυτών με αποτέλεσμα να αντιπροσωπεύονται με μικρότερο αριθμό φυτών. Ο πειραματικός σχεδιασμός που χρησιμοποιήθηκε περιελάμβανε τρεις επαναλήψεις (blocks) με τυχαιοποίηση των προελεύσεων μέσα σε κάθε επανάληψη. Σαν ζώνη (δύο γραμμές) χρησιμοποιήθηκε η προέλευση 15FAN. Στην φυτεία χρησιμοποιήθηκαν διετή φυτάρια και φυτευτικός σύνδεσμος 3 x 3m (1.111 φυτά στο εκτάριο).

Κατά την δεκαετή περίοδο αύξησης πραγματοποιήθηκαν εργασίες συντήρησης της επιφάνειας όπως η καταπολέμηση της ανεπιθύμητης βλάστησης (τα 3 πρώτα χρόνια της φυτείας) με χρησιμοποίηση μηχανικών μέσων. Η φυτεία αρδεύτηκε τα 3 πρώτα έτη κατά τη θερινή περίοδο (3-4 ποτίσματα/έτος). Λόγω της καταλληλότητας του εδάφους (αμμοπηλώδες με επαρκή υγρασία κατά την θερινή περίοδο) δεν κρίθηκε απαραίτητη η περαιτέρω άρδευση της φυτείας.



Εικόνα 2: Πειραματική επιφάνεια παραγωγής ξυλώδους βιομάζας του Fraxinus angustifolia στην περιοχή Μεσιά του Ν. Κιλκίς (αναχώματα Αξιού ποταμού). Επάνω αριστερά η φυτεία σε ηλικία 5 ετών και δεξιά σε ηλικία 10 ετών. Κάτω υλοτομικές εργασίες και καταγραφή των μέσων δέντρων της φυτείας.

2.2. Βιομετρικές μετρήσεις

Το 2016 (Φεβρουάριος), μετά την παρέλευση 10 ετών από την εγκατάσταση, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στα άτομα της φυτείας προκειμένου να καθοριστεί η αύξηση και η παραγωγικότητά τους. Πιο συγκεκριμένα, μετρήθηκε η στηθιαία διάμετρος (DBH), η διάμετρος στη βάση του κορμού (DB) (5cm πάνω από το έδαφος – για αποφυγή τυχόν σφαλμάτων του κορμού π.χ. εξογκώματα) και το συνολικό ύψος όλων των ατόμων της φυτείας. Με βάση τα βιομετρικά χαρακτηριστικά καθορίστηκε το μέγεθος του μέσου ατόμου, για κάθε μία από τις οκτώ προελεύσεις, δηλαδή, το άτομο της προέλευσης με την μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης.

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του μέσου δέντρου, επιλέγοντας, μεταξύ των ατόμων της κάθε προέλευσης, ένα άτομο με τα μέσα βιομετρικά χαρακτηριστικά, για περαιτέρω υπολογισμό της συνολικής υπέργειας βιομάζας. Έτσι επιλέχτηκαν 8 άτομα για υλοτομία και προσδιορισμό της συνολικής τους βιομάζας σε τέσσερις κατηγορίες (Πιν. 2): (I) κύρια κορμόξυλο, (II) χοντρά κλαδιά, (III) μετρίου πάχους κλαδιά, και (IV) λεπτά κλαδιά. Η βιομάζα για κάθε κατηγορία ξεχωριστά ζυγίστηκε αμέσως μετά την υλοτομία και στη συνέχεια μεταφέρθηκε στο εργαστήριο και ξηράνθηκε σε φούρνο στους 70º-75º C για διάστημα 48 ωρών (μέχρι την απόκτηση σταθερού βάρους). Μετά την ξήρανση έγιναν οι μετρήσεις του ξηρού βάρους και υπολογίστηκε η υγρασία της βιομάζας κατά την υλοτόμησή της.

Πίνακας 2: Κατηγορίες ξυλώδους βιομάζας.

Κατηγορία βιομάζας	Περιγραφή	Διάμετρος
I	Κύριο κορμόξυλο (Πιθανότητα παραγωγής καυσόξυλου)	>12 cm
II	Χοντρά κλαδιά (Πιθανότητα παραγωγής καυσόξυλου)	8-12 cm
III	Κλαδιά μέτριου πάχους	4-8 cm
IV	Λεπτά κλαδιά	0-4 cm

2.3. Στατιστική επεξεργασία

Στην καταγραφή, κάθε προέλευση αντιπροσωπεύονταν συνολικά από 13-20 δέντρα, ανάλογα με την διαθεσιμότητα των φυτών της κάθε προέλευσης. Η σύγκριση των μέσων όρων των βιομετρικών παραμέτρων (στηθιαία διάμετρος, διάμετρος στη βάση και συνολικό ύψος) έγινε με το κριτήριο του Scheffe's (άνισα δεδομένα) με p≤0,05.

Η μέση παραγωγή ξηρής βιομάζας εκτιμήθηκε με την μέθοδο του μέσου δέντρου. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο τα άτομα της φυτείας που έχουν μέσες τιμές στα ογκομετρικά χαρακτηριστικά υλοτομούνται και γίνεται η εκτίμηση χλωρής και ξηρής βιομάζας. Η εκτίμηση της παραγωγής στο εκτάριο γίνεται με απλή αναγωγή. Επιπλέον, το δείγμα των οκτώ μέσων δέντρων χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των παραμέτρων της σχέσης μεταξύ συνολικής κατά άτομο ξηρής βιομάζας και βιομετρικών χαρακτηριστικών (DBH, DB) μέσω του γενικού γραμμικού μοντέλου παλινδρόμησης.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

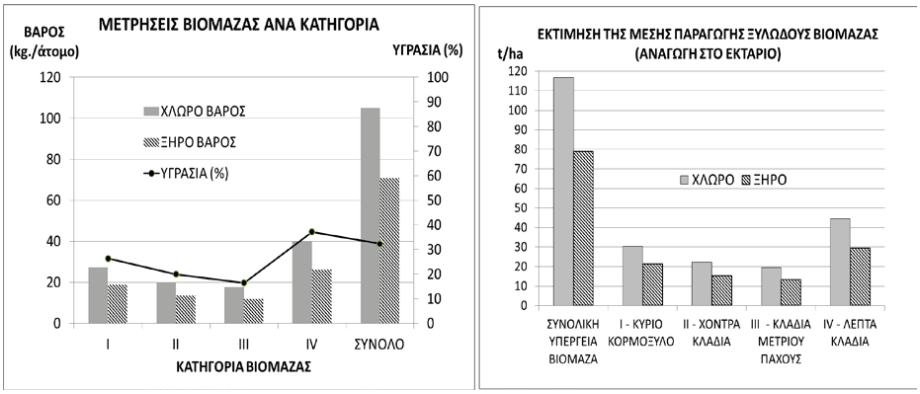
Σε γενικές γραμμές η αύξηση των δέντρων της πειραματικής φυτείας ήταν ικανοποιητική και με ποσοστό επιβίωσης να φτάνει το 100%. Μετά την πάροδο δεκαετούς περιόδου αύξησης, η μέση στηθιαία διάμετρος της φυτείας υπολογίστηκε στα 14,0cm, η μέση διάμετρος βάσης στα 18,1cm ενώ το μέσο ύψος των ατόμων ήταν 9,2m (Πιν. 3). Σε σχέση με τη στηθιαία διάμετρο, η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε σημαντικές διαφορές ($p<0.05$) μεταξύ των προελεύσεων, με την προέλευση 14FAN να δίνει την μεγαλύτερη διάμετρο (15,9cm) ενώ η 09FAN και η16 FAN τις μικρότερες (12,6cm και οι δύο). Σημαντικές διαφορές ($p<0,05$) μεταξύ των προελεύσεων βρέθηκαν και για την διάμετρο βάσης με την προέλευση 14FAN να δίνει την μεγαλύτερη τιμή (20,6cm) και την 09FAN τη μικρότερη (16,5cm). Ωστόσο, παρά τις διαφορές, στο στάδιο αυτό της καταγραφής, όλες σχεδόν οι προελεύσεις εμφάνισαν σημαντική κατά διάμετρο αύξηση. Όσον αφορά το συνολικό ύψος, τα αποτελέσματα δεν έδειξαν σημαντικές διαφορές ($p>0,05$) μεταξύ των προελεύσεων, πιθανά λόγω της πυκνής φύτευσης και του ισχυρού ανταγωνισμού.

Πίνακας 3. Μέσα βιομετρικά στοιχεία των προελεύσεων μετά την παρέλευση του 10/ετούς περίτοπου χρόνου

Κωδικός πληθυσμού	Αριθμός δέντρων	Στηθιαία διάμετρος (cm) (μ.ο.± τ.σ.)	Διάμετρος βάσης (cm) (μ.ο.± τ.σ.)	Ύψος (m) (μ.ο.± τ.σ.)
08FAN	13	13,6±0,65 [ab]	17,3±0,88 [ab]	8,3±0,35 [a]
09FAN	13	12,6±0,76 [a]	16,5±0,81 [a]	9,8±0,89 [a]
11FAN	20	13,5±0,74 [ab]	17,6±0,85 [ab]	8,5±0,24 [a]
12FAN	20	14,5±0,65 [ab]	17,7±0,64 [ab]	8,9±0,25 [a]
13FAN	19	14,2±0,42 [ab]	18,7±0,43 [ab]	9,3±0,28 [a]
14FAN	15	15,9±0,37 [b]	20,6±0,50 [b]	9,6±0,36 [a]
15FAN	20	14,4±0,39 [ab]	18,7±0,46 [ab]	9,7±0,25 [a]
16FAN	14	12,6±0,55 [a]	17,1±0,79 [ab]	9,3±0,34 [a]
Σύνολο/μ.ο.	134	14,00±0,22	18,1±,0,25	9,2±0,13

[*] Οι μέσοι όροι που φέρουν το ίδιο γράμμα/εκθέτη δεν διαφέρουν στατιστικά ($p>0.05$) μεταξύ τους (Scheffe's test).

Η συνολική ξηρή βιομάζα του μέσου δέντρου της φυτείας υπολογίστηκε στα 71 kg/άτομο (105kg χλωρό βάρος με 32 % μέση υγρασία). Η κατηγορία IV (Λεπτά κλαδιά) είχε το μεγαλύτερο ξηρό βάρος (26kg κατά μέσο όρο) αλλά και την μεγαλύτερη σχετική υγρασία (37,2 %) ενώ το ξηρό βάρος των υπόλοιπων κατηγοριών μεγέθους βρέθηκε μικρότερο από 20kg ανά άτομο (Εικ. 3).



Εικόνα 3: Μέσες τιμές βιομάζας και σχετικής υγρασίας των υλοτομηθέντων ατόμων (αριστερά) και εκτίμηση της παραγωγής στο εκτάριο (δεξιά).

Η συνολική παραγωγή ξηρής υπέργειας βιομάζας υπολογίστηκε στους 78,8 tns/ha στο τέλος του 10ετούς περίτροπου χρόνου. Ωστόσο, η μέση παραγωγή ποικίλει μεταξύ προελεύσεων με την πιο παραγωγική να φτάνει τους 118,4 tns/ha (14FAN - Εύβοια) και την λιγότερο παραγωγική τους 60 tns/ha (08 FAN - Μελία). Από ενεργειακής άποψης, με μια μέση θερμική τιμή τα 19 MJ/kg ξύλου, η συνολική θερμική ενέργεια της παραχθείσας βιομάζας στο στρέμμα κυμαίνεται από 114.000 MJ (ή 31.692 kWh) για την προέλευση 08FAN και έως 224.960 MJ (ή 62.500 kWh) για την προέλευση 14FAN.

Επιπρόσθετα, η συσχέτιση της στηθιαίας διαμέτρου με το Σ.Ξ.Β. δεν βρέθηκε στατιστικά σημαντική ($p = 0,079$) με $r^2 = 0,427$ και γραμμικό μοντέλο Σ.Ξ.Β. = -61,669 + 9,547 DBH. Αντίθετα, η συσχέτιση της διαμέτρου βάσης (DB) με το συνολικό ξηρό βάρος βρέθηκε σημαντική ($p = 0,020$) με $r^2 = 0,624$ και γραμμικό μοντέλο (Σ.Ξ.Β.) = -109,104 + 9,983 DB (εξαρτώμενη μεταβλητή: Σ.Ξ.Β.).

Σε άλλες πειραματικές φυτείες λεύκης με δεκαετή περίτροπο χρόνο βρέθηκαν παραγωγές που ποικίλουν μεταξύ των 117 tns/ha και 146 tns/ha [25] που όμως συμπεριλαμβάνουν και την βιομάζα του ριζικού συστήματος (ποσοστό περίπου 20% – 30% του συνολικού). Η παραγωγή ξηρής βιομάζας από φυτείες ταχυαξών ειδών είναι γνωστό ότι εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις [26, 27]. Για παράδειγμα στην κεντρική Ευρώπη αναφέρεται υπέργεια παραγωγή 8-12 tns ανά έτος και εκτάριο [28] ή 20 tns ανά έτος και εκτάριο για φυτείες λεύκης στην Ιταλία [29]. Η παραγωγή της παρούσας φυτείας με φράξο, εάν συγκριθεί με τις φυτείες λεύκης υπολείπεται σαφώς σε παραγωγή. Ωστόσο, προκειμένου να εξαχθούν τελικά συμπεράσματα για την οικονομικότητα μιας τέτοιας φυτείας πρέπει να συνυπολογιστούν και άλλοι παράγοντες, όπως για παράδειγμα η αναγκαίες εισροές για την συντήρηση της φυτείας. Στην περίπτωση του φράξου οι εισροές είναι πολύ μικρές (σε σχέση με τις φυτείες λεύκης, για παράδειγμα) λόγω των μικρότερων απαιτήσεων του είδους σε νερό και καλλιεργητικές φροντίδες και κατά συνέπεια μικρότερη ανάγκη άρδευσης (με την προϋπόθεση ότι φυτεύεται σε κατάλληλα περιβάλλοντα) και λιγότερα άλλα έξοδα καλλιέργειας και συντήρησης.

Επιπλέον, ο δεκαετής περίτροπος χρόνος που επιλέχτηκε για την παρούσα φυτεία δίνει την δυνατότητα στον καλλιεργητή να παράγει ένα μεγαλύτερο εύρος τελικών προϊόντων. Πράγματι, η παραγωγή προϊόντων καυσοξύλευσης (κατηγορία I, κυρίως κορμόξυλο) έφτασε τα 27 κιλά χλωρού βάρους/άτομο (μέσος όρος όλων των προελεύσεων) ενώ η καλύτερη προέλευση παρήγαγε 58,5 κιλά χλωρού βάρους/άτομο. Όπως φαίνεται στην Εικ. 3, ένα μεγάλο μέρος της παραγωγής που ανήκει στην κατηγορία I (30,3 τόνοι/εκτάριο) και II (22,4 τόνοι/εκτάριο), έχει ικανοποιητική διάσταση και μπορεί να διατεθεί στην αγορά καυσοξύλων (με πιθανώς μεγαλύτερη πρόσοδο για τον επενδυτή) και να κάνει την επένδυσή του λιγότερο ευάλωτη στις διακυμάνσεις των τιμών βιομάζας που προσφέρονται στην αγορά (π.χ. για παραγωγή πέλλετ).

Επιπλεόν, η πιθανή μελλοντική χρήση του είδους σε μεγάλη κλίμακα για την παραγωγή ξυλώδους βιομάζας πρέπει να λάβει υπόψη της και το γεγονός ότι η χρήση του φράξου σε Φ.Μ.Π. θα μπορούσε να συμβάλλει και στην αύξηση της βιοποικιλότητας στο αγροδασικό τοπίο [30]. Τα οφέλη από την πιθανή χρήση λοιπόν του υπό μελέτη είδους δεν πρέπει να κριθούν μόνον από την πραγματικά μέτρια παραγωγική ικανότητα του είδους σε αυτή τη φυτεία, αλλά και από το γεγονός ότι η χρήση του είδους σε μεγάλη κλιμακα μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της βιοποικιλότητας και ταυτόχρονα να ενισχύσει μια ή περισσότερες από τις οικολογικές υπηρεσίες των αγροδασικών οικοσυστημάτων, όπως για παράδειγμα τον κύκλο θρεπτικών συστατικών [28], την μείωση ορισμένων ρυπογόνων ουσιών στο έδαφος [31] ή την αυξημένη αντίσταση του οικοσυτήματος στη διασπορά παθογόνων οργανισμών [12] που μπορεί δυνητικά να αποτελέσουν κίνδυνο για την γεωργική παραγωγή. Επιπλέον, μπορούν να αυξήσουν και την βιοποικιλότητα και να προσθέσουν καταφύγια για πολλά ενδημικά είδη χλωρίδας, μυκοχλωρίδας και πανίδας σε πεδινά και παραποτάμια οικοσυστήματα.

Η πολιτική υποστήριξη (μέσω κινήτρων ή επιδοτήσεων) είναι επίσης ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, ακόμη και αν υπάρχει μεγάλο οικονομικό όφελος των δασοπονικών φυτειών μικρού και μέσου περίτροπου χρόνου [27]. Η πολιτική υποστήριξη όμως, θα πρέπει να βασίζεται σε ένα εθνικό/περιφερειακό ορθολογικό σύστημα επιδοτήσεων (με βάση την απόδοση προϊόντος και όχι τη χωρική επιφάνεια όπως γινόταν και γίνεται μέχρι σήμερα), και δεν πρέπει ο παραγωγός/επενδυτής να βασίζεται και μόνο σε αυτή. Οικονομικοί περιορισμοί που σχετίζονται με την αλλαγή χρήσης γης θα πρέπει να απομακρυνθούν, μελέτες βιωσιμότητας πρέπει να ενισχυθούν και τεχνικές συμβουλές πρέπει να είναι διαθέσιμες στους αγρότες και επιχειρηματίες επενδυτές [27].

Αυτή είναι η πρώτη δοκιμή του φράξου σε Φ.Μ.Π. και πρέπει να συνεχιστεί σε μια πιο ευρεία κλίμακα. Στο μέλλον, το ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΔΑΣΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ, θα πρέπει να σχεδιάσει την εφαρμογή ενός προγράμματος γενετικής βελτίωσης του είδους με επιλογή των καλύτερων φαινοτυπικά ατόμων από τις προελεύσεις που έδωσαν την μεγαλύτερη παραγωγή ξυλώδους βιομάζας στην παρούσα έρευνα.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η πρώτη πειραματική φυτεία δεκαετούς περίτροπου χρόνου με *Fraxinus angustifolia* Vahl. στην Ελλάδα έδωσε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα σε ότι αφορά την παραγωγή βιομάζας. Το συνολικό ξηρό βάρος του μέσου δέντρου της φυτείας βρέθηκε να διαφέρει μεταξύ των προελεύσεων που δοκιμάσθηκαν με εύρος από 54 έως 107kg περίπου. Με την αναγωγή στο στρέμμα βλέπουμε το Σ.Ξ.Β. να κυμαίνεται από 5.991kg (ή 6 tns/στρέμμα περίπου, προέλευση 08FAN /Μελία) έως 11.836kg (ή 11,8tns/στρέμμα περίπου, προέλευση 14FAN /Εύβοια). Με μια μέση θερμική τιμή τα 19 MJ/kg ξύλου η συνολική θερμική ενέργεια της παραχθείσας βιομάζας στο στρέμμα κυμαίνεται από 113.835 MJ (ή 31.646 kWh) για την προέλευση 08FAN έως 224.819 MJ (ή 62.500 kWh) για την προέλευση 14FAN.

Ο δεκαετής περίτροπος χρόνος που επιλέχτηκε για την παρούσα έρευνα δίνει τη δυνατότητα στον καλλιεργητή να παράγει, πέραν της βιομάζας (π.χ. τσιπς ξύλου), ένα μεγαλύτερο εύρος τελικών προϊόντων (π.χ. προϊόντα πέλλετ, καυσόξυλα) και να κάνει την επένδυση λιγότερο ευάλωτη στις διακυμάνσεις τιμών βιομάζας. Επιπλέον η πιθανή μελλοντική χρήση του είδους σε μεγάλη κλίμακα για την παραγωγή ξυλώδους βιομάζας πρέπει να λάβει υπόψη της το γεγονός ότι η χρήση του φράξου σε Φ.Μ.Π. θα μπορούσε να συμβάλλει και στην αύξηση της βιοποικιλότητας στο αγροδασικό τοπίο.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε σημαντικές διαφορές μεταξύ των προελεύσεων της φυτείας για τη στηθιαία διάμετρο και την διάμετρο βάσης. Ωστόσο, παρά τις διαφορές, όλες σχεδόν οι προελεύσεις εμφάνισαν σημαντική κατά διάμετρο αύξηση στο τέλος του πρώτου περίτροπου χρόνου. Όσον αφορά το συνολικό ύψος, τα αποτελέσματα δεν έδειξαν σημαντικές διαφορές μεταξύ των προελεύσεων. Η συσχέτιση της στηθιαίας διαμέτρου με το συνολικό ξηρό βάρος δεν βρέθηκε σημαντική ($p = 0,079$) με $r^2 = 0,427$. Αντίθετα, η συσχέτιση της διαμέτρου βάσης με το συνολικό ξηρό βάρος βρέθηκε σημαντική ($p = 0,020$) με $r^2 = 0,624$ και γραμμικό μοντέλο (Σ.Ξ.Β.) = -109,104 + 9,983 DB. Με βάση αυτό το μοντέλο μπορεί να γίνεται εκτίμηση του Σ.Ξ.Β. μιας ιστάμενης ενεργειακής φυτείας με απλή μέτρηση της διαμέτρου βάσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Liesebach, M., G. Von Wuehlisch, and H.-J. Muhs, 1999, "Aspen for short-rotation coppice plantations on agricultural sites in Germany: Effects of spacing and rotation time on growth and biomass production of aspen progenies". Forest Ecology and Management, 121(1): pp. 25-39.

[2] Mitchell, C., E. Stevens, and M. Watters, 1999, "Short-rotation forestry–operations, productivity and costs based on experience gained in the UK". Forest Ecology and Management, 121(1): pp. 123-136.

[3] Canellas, I., et al., 2012, "The effect of density on short rotation *Populus* sp. plantations in the Mediterranean area". Biomass and bioenergy, 46: pp. 645-652.

[4] Spanos K., Tsialtas, I., Mylonas, D., 2002, "*Biomass production from a short rotation experimental planting of ten poplar clones in N. Greece".* IUFRO Meeting on 'Management of Fast Growing Plantations', September 11-13, 2002, Izmit - Turkey, Proc. pp. 43-51.

[5] Toillon, J., et al., 2013, "Variability and plasticity of productivity, water-use efficiency, and nitrogen exportation rate in *Salix* short rotation coppice". Biomass and bioenergy, 56: pp. 392-404.

[6] Gabrielle, B., et al., 2013, "Life cycle assessment of eucalyptus short rotation coppices for bioenergy production in southern France". Gcb Bioenergy, 5(1): pp. 30-42.

[7] Junior, H.d.J.E., et al., 2017, "*Eucalyptus* short-rotation coppice for solid fuel production". Industrial Crops and Products, 108: pp. 636-640.

[8] Mezzalira, G. and M. 2002, "Brocchi, La coltivazione del genero Paulownia nel mondo". L'Informatore Agrario, 1: pp. 66-73.

[9] Sixto, H., et al., 2011, "Genetic variation and genotype-environment interactions in short rotation *Populus* plantations in southern Europe". New Forests, 42(2): pp. 163-177.

[10] Caputo, J., et al., 2014, "Incorporating uncertainty into a life cycle assessment (LCA) model of short-rotation willow biomass (Salix spp.) crops". BioEnergy Research, 7(1): pp. 48-59.

[11] Morales, M., et al., 2015, "Cradle-to-gate life cycle assessment of *Eucalyptus globulus* short rotation plantations in Chile". Journal of Cleaner Production, 99: pp. 239-249.

[12] DeBell, D.S. and C.A. Harrington, 1993, "Deploying genotypes in short-rotation plantations: mixtures and pure cultures of clones and species". The Forestry Chronicle, 69(6): pp. 705-713.

[13] Zuazo, V.H.D., et al., 2013, "Biomass yield potential of paulownia trees in a semi-arid Mediterranean environment (S Spain)". International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), 3(4): pp. 789-793.

[14] Perez, I., et al., 2014, "Siberian elm responses to different culture conditions under short rotation forestry in Mediterranean areas". Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 38(5):pp. 652-662.

[15] Carl, C., et al., 2017, "Allometric Models to Predict Aboveground Woody Biomass of Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.) in Short Rotation Coppice in Previous Mining and Agricultural Areas in Germany". Forests, 8(9): pp. 328.

[16] Goel, V. and H. Behl, 2004, "Productivity assessment of three leguminous species under high-density plantations on degraded soil sites". Biomass and bioenergy, 27(5): pp. 403-409.

[17] Khamzina, A., et al., 2006, “Assessing the potential of trees for afforestation of degraded landscapes in the Aral Sea Basin of Uzbekistan”. Agroforestry Systems, 66(2): pp. 129-141.

[18] White, T.L., W.T. Adams, and D.B. Neale, 2007, Forest genetics. CABI.

[19] FRAXIGEN 2005, “Ash species in Europe: biological characteristics and practical guidelines for sustainable use”. Oxford Forestry Institute, University of Oxford, UK, pp.128.

[20] Σπανός, Κ.Α., Γαϊτάνης, Δ., 2014, “Έρευνα προελεύσεων του ιθαγενούς είδους *Fraxinus angustifolia* Vahl. - Βιομετρικά αποτελέσματα”. 15ο Επιστημονικό Συνέδριο Γενετικής Βελτίωσης Φυτών (Ε.Ε.Ε.Γ.Β.Φ.), Λάρισα 15-17 Οκτωβρίου, 2014, σελ. 215-221.

[21] Verdu, M., Spanos, K.A., Canova, I., Slobodnik, B., Paule, L., 2007, “Similar Gender Dimorphism in the Costs of Reproduction across the Geographic Range of Fraxinus ornus”. Annals of Botany 99: pp.183-191.

[22] Papi, R.M., Spanos, K.A., and D.A. Kyriakidis, 2012, “Genetic variation *Fraxinus* angustifolia natural populations in Greece based on nuclear ad chloroplast microsatellite markers”. European Journal of Forest Research 131:pp.1151-1161.

[23] Cicek, E., and M. Yilmaz, 2002, “The importance of *Fraxinus angustifolia* subsp. *oxycarpa* as a fast growing species for Turkey”. In M. Ercan, A. Diner, AS Birler, C. Goulding and T. Zoralioglou (ed.) Management of Fast Growing Plantations. IUFRO Meeting/Div. 4.04.06, 11-13 September 2002, Izmit, Turkey, pp. 192-200.

[24] Cundall, E.P., Cahalan, C.M., and T. Connolly, 2003, “Early results of ash (*Fraxinus excelsior*) provenance trials at sites in England and Wales”. Forestry 76 (4):…

[25] Fang, S., Xue, J., & Tang, L. 2007, “Biomass production and carbon sequestration potential in poplar plantations with different management patterns”. Journal of environmental management, 85(3), pp.672-679.

[26] Σπανός Κ.Α, 2002, **“***Παραγωγή βιομάζας από πειραματική φυτεία κλώνων λεύκης μικρού περίτροπου χρόνου”.* Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνολογίας (Ι.Η.Τ.), 7ο Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Πάτρα 6-8 Νοεμβρίου 2002, Πρακτ. σελ. 187-196.

[27] ΣΠΑΝΟΣ, Κ.Α. , 2006, “Εντατική δασοπονία μικρού περίτροπου χρόνου - παραγωγή δασικής βιομάζας από φυτείες ταχυαυξών δασοπονικών ειδών, δυνατότητες ενεργειακής και χημικής αξιοποίησης”. 8ο Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Μάρτιος 29-31, Θεσσαλονίκη, 2006, σελ. 461-468.

[28] Makeschin, F. 1999, “Short rotation forestry in Central and Northern Europe—introduction and conclusions”. Forest Ecology and Management, 121(1/2), pp.1-7.

[29] Mareschi, L., Paris, P., Sabbati, M., Nardin, F., Giovanardi, R., Manazzone, S., & Scarascia Monguzza, G., 2005, “Le nuove varietà di pioppo da biomasse garantiscono produttività interessanti”. Informatore agrario.(18): pp.49-53.

[30] Altieri, M. A.,1999, “The ecological role of biodiversity in agroecosystems”. Agriculture, ecosystems & environment, 74(1), pp.19-31.

[31] Dickinson, N. M., & Pulford, I. D., 2005, “Cadmium phytoextraction using short-rotation coppice Salix: the evidence trail”. Environment International, 31(4), pp.609-613.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ 2ΗΣ ΓΕΝΙΑΣ ΑΠΟ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΕΣ ΡΕΤΣΙΝΟΛΑΔΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑ

Ελένη Ηρακλέους[1,2]*, Άγγελος Α. Λάππας[2]

[1]* Σχολή Επιστημών Τεχνολογίας, Διεθνές Πανεπιστήμιο Ελλάδος,
[2] Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων, ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ
e-mail: e.heracleous@ihu.edu.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η επιτακτική ανάγκη για την αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου και την μετάβαση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθιστούν απαραίτητη την εισαγωγή των βιοκαυσίμων στο ενεργειακό ισοζύγιο. Η συνεισφορά των βιοκαυσίμων στην αειφορία και τη μείωση των εκπομπών CO_2 αποτελεί ισχυρή συνάρτηση της βιομάζας που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη, η οποία δεν πρέπει να ανταγωνίζεται την τροφική αλυσίδα και να καλλιεργείται σε φτωχά εδάφη, χωρίς υψηλές απαιτήσεις σε νερό και λίπασμα.

Στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου διμερούς συνεργασίας Ελλάδας-Ισραήλ Jonah-Fuel (2013-2015), προσδιορίστηκαν ποικιλίες ρετσινολαδιάς κατάλληλες προς καλλιέργεια στην Κεντρική Μακεδονία, με υψηλές αποδόσεις σε έλαιο, ενώ ταυτόχρονα μελετήθηκε πειραματικά η κατεργασία του ρετσινόλαδου (castor oil) σε συμβατικές διεργασίες διυλιστηρίου για την μετατροπή της εναλλακτικής αυτής ανανεώσιμης τροφοδοσίας σε βιοκαύσιμα υψηλής ποιότητας.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής πράσινου ντήζελ από ρετσινολαδιά με τη μέθοδο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη όλα τα στάδια στον κύκλο ζωής του βιοκαυσίμου, και συγκεκριμένα την καλλιέργεια ποικιλίας ρετσινολαδιάς υψηλής απόδοσης στην Κεντρική Μακεδονία, την έκθλιψη των καρπών για την παραγωγή του ρετσινόλαδου, την μεταφορά του στο διυλιστήριο, και τελικά την επεξεργασία του μαζί με συμβατικές τροφοδοσίες διυλιστηρίου σε μονάδα υδρογονοκατεργασίας προς παραγωγή ντήζελ. Επιπλέον, συμπεριλήφθηκε στην μελέτη και η αξιοποίηση του στερεού υπολείμματος που παράγεται κατά το στάδιο της έκθλιψης, το οποίο μετατρέπεται σε βιοέλαιο μέσω της διεργασίας της ταχείας πυρόλυσης βιομάζας και χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμότητας σε βιομηχανικούς καυστήρες.

Το περιβαλλοντικό προφίλ του πράσινου ντήζελ από ρετσινολαδιά συγκρίθηκε με το αντίστοιχο του ορυκτού ντήζελ και βιοκαυσίμων 1ης γενιάς (βιοντήζελ από μετεστεροποίηση και υδρογονοκατεργασία κραμβελαίου και ηλιελαίου). Η σύγκριση αυτή ανέδειξε ξεκάθαρα την υπεροχή του, καθώς επέδειξε την χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας, τόσο ορυκτής όσο και ανανεώσιμης, σε σχέση με τα υπόλοιπα ορυκτά και βιολογικά καύσιμα. Επιπλέον, ο κύκλος ζωής του πράσινου ντήζελ είχε τις χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, επιβεβαιώνοντας την αειφορία και την πολλά υποσχόμενη συμπεριφορά του ντήζελ από ρετσινολαδιά.

Λέξεις Κλειδιά: *βιοκαύσιμα, Ανάλυση Κύκλου Ζωής, ρετσινολαδιά, ντήζελ, διυλιστήριο*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου αποτελεί την μεγαλύτερη πρόκληση που καλείται να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα τον 21^{ο} αιώνα. Είναι ευρέως πλέον αποδεκτό ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη οφείλεται στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) οι οποίες εκλύονται κατά τη χρήση ορυκτών πηγών ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού, θερμότητας και καυσίμων μεταφοράς. Η βιομάζα, ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην άμβλυνση του φαινομένου της υπερθέρμανσης καθώς έχει κλειστό κύκλο άνθρακα, δηλ. η εκπεμπόμενη ποσότητα CO_2 είναι η ίδια που απορροφάται κατά την ανάπτυξη της βιομάζας. Επιπλέον, ένα μεγάλο πλεονέκτημα της βιομάζας είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για παραγωγή ηλεκτρισμού και θέρμανσης, όσο και για παραγωγή υγρών καυσίμων, κάτι που δεν ισχύει για τις υπόλοιπες ΑΠΕ.

Τα βιοκαύσιμα 1^{ης} γενιάς, βιοαιθανόλη και βιοντήζελ, παράγονται κυρίως από βρώσιμες τροφοδοσίες, λειτουργώντας ανταγωνιστικά ως προς τη χρήση των καλλιεργειών αυτών για παραγωγή τροφίμων. Παράλληλα, λαμβάνοντας υπόψη όλο τον κύκλο ζωής των βιοκαυσίμων αυτών, τα περιβαλλοντικά οφέλη που παρουσιάζουν έναντι των ορυκτών καυσίμων είναι περιορισμένα εξαιτίας της εντατικής καλλιέργειας (υψηλές απαιτήσεις για λίπασμα και νερό), τις χαμηλές αποδόσεις ανά εκτάριο καλλιεργήσιμης γης κλπ. Καθίσταται λοιπόν φανερό ότι είναι απαραίτητη η εξέταση και η αποτίμηση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των βιοκαυσίμων σε όλα τα στάδια ζωής τους, κάτι που θα συμβάλει στη διατήρηση του ανανεώσιμου χαρακτήρα τους και στην αποτροπή δημιουργίας σοβαρών περιβαλλοντικών και κλιματικών προβλημάτων με μη αναστρέψιμες οικονομικές και κοινωνικές συνέπειες.

Η πολιτική που ακολουθείται από την ΕΕ τα τελευταία χρόνια έχει στρέψει το ενδιαφέρον στα βιοκαύσιμα 2^{ης} γενιάς τα οποία παράγονται από υπολειμματικές μορφές λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας και μη-βρώσιμες τροφοδοσίες που μπορούν να καλλιεργηθούν σε εκτάσεις σε αγραναύπαση χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις σε λίπασμα και νερό. Η ρετσινολαδιά αποτελεί υποσχόμενη καλλιέργεια για την παραγωγή βιοκαυσίμων 2^{ης} γενιάς στη χώρα μας, καθώς είναι ένα φυτό πλούσιο σε έλαιο (ρετσινόλαδο, γνωστό και ως καστορέλαιο – castor oil), με υψηλές αποδόσεις, χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις ως προς την καλλιέργειά του και αυτοφυές στην Ελλάδα. Παγκοσμίως, καλλιεργείται σήμερα σε βιομηχανική κλίμακα, με την ετήσια παραγωγή σπόρων να εκτιμάται στο ένα εκατομμύριο τόνους το χρόνο και κύριο στόχο την παραγωγή ρετσινόλαδου, το οποίο χρησιμοποιείται στη χημική βιομηχανία για την παραγωγή σαπουνιού, πλαστικών, υγρών για φρένα και άλλων προϊόντων. Στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου διμερούς συνεργασίας Ελλάδας-Ισραήλ Jonah-Fuel (2013-2015), προσδιορίστηκαν ποικιλίες ρετσινολαδιάς κατάλληλες προς καλλιέργεια στην Κεντρική Μακεδονία, με υψηλές αποδόσεις σε έλαιο. Επιπλέον, μελετήθηκε πειραματικά η κατεργασία του ρετσινόλαδου (castor oil) σε συμβατικές διεργασίες διυλιστηρίου για την μετατροπή της εναλλακτικής αυτής ανανεώσιμης τροφοδοσίας σε βιοκαύσιμα υψηλής ποιότητας και η εκμετάλλευση των υπολειμμάτων των καρπών της ρετσινολαδιάς (castor bean) προς παραγωγή χρήσιμων ενεργειακών προϊόντων.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής πράσινου ντήζελ από ρετσινολαδιά με τη μέθοδο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Analysis). Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη όλα τα στάδια στον κύκλο ζωής του βιοκαυσίμου, και συγκεκριμένα την καλλιέργεια ποικιλίας ρετσινολαδιάς υψηλής απόδοσης στην Κεντρική Μακεδονία, την έκθλιψη των καρπών για την παραγωγή του ρετσινόλαδου, την μεταφορά του στο διυλιστήριο, και τελικά την συν-επεξεργασία του με συμβατικές τροφοδοσίες διυλιστηρίου σε μονάδα υδρογονοκατεργασίας προς παραγωγή ντήζελ κίνησης. Επιπλέον, συμπεριλήφθηκε στην μελέτη και η αξιοποίηση του στερεού υπολείμματος που παράγεται κατά το στάδιο της έκθλιψης, το οποίο μετατρέπεται σε βιοέλαιο μέσω της διεργασίας της ταχείας πυρόλυσης βιομάζας και χρησιμοποιείται για την παραγωγή θερμότητας σε βιομηχανικούς καυστήρες. Τα δεδομένα για τα κυριότερα στάδια του κύκλου ζωής λήφθηκαν από πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του έργου Jonah-Fuel, ενώ δεδομένα για βοηθητικές παροχές (π.χ. παραγωγή ηλεκτρισμού, φυσικού αερίου κλπ) λήφθηκαν από αξιόπιστες βάσεις δεδομένων. Το περιβαλλοντικό προφίλ του πράσινου ντήζελ από ρετσινολαδιά συγκρίθηκε με το αντίστοιχο του ορυκτού ντήζελ και βιοκαυσίμων 1^{ης} γενιάς (βιοντήζελ από μετεστεροποίηση και υδρογονοκατεργασία κραμβελαίου και ηλιελαίου) με στόχο την ανάδειξη των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων της καλλιέργειας και χρήσης του ρετσινόλαδου για την παραγωγή προηγμένων βιοκαυσίμων υψηλής ποιότητας. Τα περιβαλλοντικά προφίλ του ορυκτού ντήζελ και των βιοκαυσίμων 1^{ης} γενιάς λήφθηκαν από την βιβλιογραφία.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η εργασία στοχεύει στην αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του ντήζελ κίνησης από ρετσινολαδιά, σε σύγκριση με το ορυκτό καύσιμο ντήζελ που παράγεται από αργό πετρέλαιο. Η γεωγραφική περιοχή ενδιαφέροντος για την παρούσα μελέτη είναι η Ευρώπη, με χρονικό ορίζοντα τα επόμενα 5-10 χρόνια. Έτσι, δεδομένα, παραδοχές και εκτιμήσεις λαμβάνονται υπόψη για την Ευρωπαϊκή Ένωση των 27 (ΕΕ-27), όπου αυτό είναι δυνατόν.

Ως λειτουργική μονάδα του συστήματος ορίζεται το ενεργειακό περιεχόμενο του καυσίμου και συγκεκριμένα η παραγωγή 1 MJ πράσινου ντήζελ από ρετσινολαδιά στο διυλιστήριο.

Τα δεδομένα απογραφικής ανάλυσης που συλλέχθηκαν περιλαμβάνουν την κατανάλωση ενέργειας (ορυκτής και ανανεώσιμης) και τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (CO_2, CH_4 και N_2O) για κάθε στάδιο του κύκλου ζωής που εξετάστηκε. Άλλες αέριες εκπομπές, όπως NOx, SOx, αιωρούμενα σωματίδια κλπ, δεν συμπεριλήφθηκαν εξαιτίας της έλλειψης των δεδομένων αυτών για κάποια από τα στάδια ζωής. Πρέπει να σημειωθεί ότι η απογραφική ανάλυση της παρούσας εργασίας δεν περιλαμβάνει περιβαλλοντικές εκροές που προκύπτουν από την παραγωγή του απαραίτητου εξοπλισμού και υποδομών για τις διεργασίες που εξετάζονται.

Η αξιολόγηση των σεναρίων που εξετάστηκαν βασίστηκε στην ταξινόμηση των εισροών/εκροών σε κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων και ανάλυση των αποτελεσμάτων. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που εξετάστηκαν ήταν οι εξής:

Κατανάλωση ορυκτής ενέργειας: Αφορά τη χρήση ορυκτών πηγών ενέργειας και η μονάδα αναφοράς είναι MJ_{eq}.

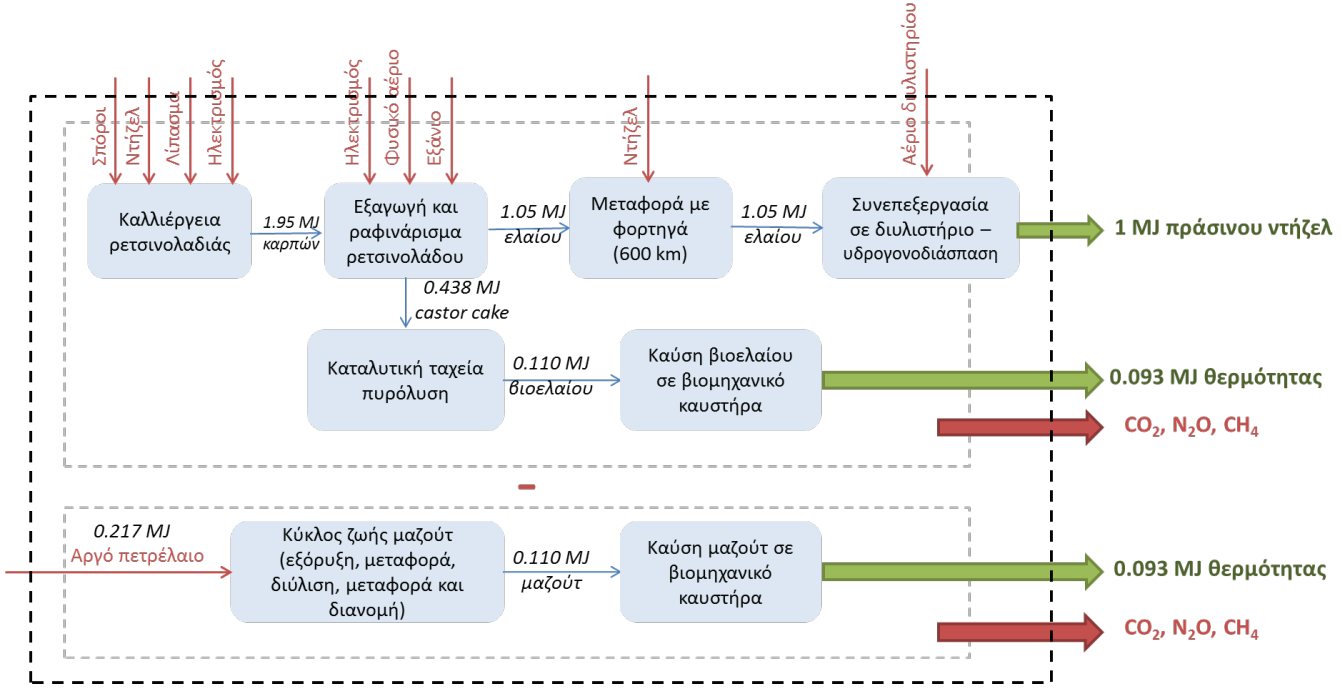
Συνολική κατανάλωση ενέργειας: Η κατηγορία αυτή αφορά την χρήση όλων των ενεργειακών πηγών, ανανεώσιμων ή μη. Στην περίπτωση βιομάζας, η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει και το ενεργειακό περιεχόμενο της βιομάζας. Η μονάδα αναφοράς είναι MJ_{eq}.

Φαινόμενο θερμοκηπίου: Αφορά την επιβάρυνση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου το οποίο αποτιμάται με το δυναμικό υπερθέρμανσης. Η μονάδα αναφοράς είναι το CO_2-eq. Τα δυναμικά υπερθέρμανσης που χρησιμοποιήθηκαν για το CH_4 και το N_2O είναι 25 και 298 αντίστοιχα.

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του πράσινου ντήζελ από ρετσινολαδιά. Τα όρια και τα στάδια του κύκλου ζωής (κύρια και βοηθητικά) που συμπεριλήφθηκαν στην μελέτη παρουσιάζονται αναλυτικά στην εικόνα 1. Συγκεκριμένα, συμπεριλήφθηκε η καλλιέργεια και συγκομιδή της ρετσινολαδιάς στην περιοχή της Κεντρικής Μακεδονίας (Σέρρες ή Θεσσαλονίκη) στη Βόρεια Ελλάδα, η μεταφορά των καρπών σε ελαιοτριβείο και η έκθλιψή τους για την παραγωγή του ρετσινόλαδου, η μεταφορά του ρετσινόλαδου σε διυλιστήριο και τέλος η συνεπεξεργασία του με αεριέλαιο κενού (Vacuum Gas Oil – VGO) σε συμβατική μονάδα υδρογονοδιάσπασης προς παραγωγή ντήζελ. Επιπλέον, η ανάλυση περιέχει και την επεξεργασία των υπολειμμάτων των καρπών μετά την εξαγωγή του ελαίου (press cake) μέσω της διεργασίας της ταχείας πυρόλυσης προς παραγωγή βιοκαυσίμου θέρμανσης. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της υποκατάστασης (displacement method) και θεωρήθηκε ότι το καύσιμο αυτό αντικαθιστά μαζούτ σε βιομηχανικούς καυστήρες για παραγωγή θερμότητας. Τέλος, έχουν ληφθεί υπόψη και οι κύκλοι ζωής όλων των εισροών/βοηθητικών διεργασιών σε κάθε ένα από τα παραπάνω στάδια, όπως η παραγωγή των σπόρων και των λιπασμάτων, η χρήση ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου, η χρήση καυσίμου ντήζελ για την λειτουργία των γεωργικών μηχανημάτων και τις μεταφορές με φορτηγά κλπ.

Τα δεδομένα για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κυρίων σταδίων του κύκλου ζωής του πράσινου ντήζελ προέρχονται από πειραματικές μετρήσεις που έγιναν στο πλαίσιο του έργου Jonah-Fuel. Για τις βοηθητικές παροχές/εισροές, δεδομένα λήφθηκαν από αξιόπιστες βάσεις δεδομένων όπως αναφέρεται αναλυτικά στο στάδιο της απογραφικής ανάλυσης που ακολουθεί.

Το περιβαλλοντικό προφίλ του πράσινου ντήζελ από ρετσινολαδιά συγκρίθηκε με το αντίστοιχο του ορυκτού ντήζελ και βιοκαυσίμων 1^{ης} γενιάς (βιοντήζελ από μετεστεροποίηση και υδρογονοκατεργασία κραμβελαίου και ηλιελαίου). Δεδομένα για τα σενάρια αναφοράς λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία [1].



Εικόνα 1: Όρια συστήματος και στάδια ζωής στον κύκλο ζωής του πράσινου ντήζελ παραγόμενου από ρετσινολαδιά

Πίνακας 1: Αποτελέσματα απογραφικής ανάλυσης ανά στάδιο κύκλου ζωής

		Καλλιέργεια ρετσινο-λαδιάς	Εξαγωγή και ραφινάρισμα καστορελαίου	Μεταφορά καστορελαίου στο διυλιστήριο	Υδρογονοδιάσπαση καστορ-ελαίου	Ταχεία πυρόλυση υπολειμ-μάτων	Καύση βιοελαίου σε βιομηχανικό καυστήρα	Όφελος από αντικατάσταση θερμότητας που παράγεται από μαζούτ σε βιομηχανικό καυστήρα	Σύνολο
Κατανάλωση ενέργειας (MJ/MJ καυσίμου)	**Συνολικά**	0.1322	0.5092	0.0804	0.1000	0.3284	0.0165	-0.2170	0.9497
	Ορυκτή	0.1322	0.0472	0.0804	0.0500	0.0000	0.0000	-0.2170	0.0928
	Ανανεώσιμη	0.0000	0.4620	0.0000	0.0500	0.3284	0.0165	0.0000	0.8569
Συνολική ενεργειακή απόδοση		88.3%	66.3%	92.6%	90.9%	75.3%	98.4%	82.2%	51.3%
Εκπομπές (g/GJ καυσίμου)	**CO_2**	9,066.297	2,893.873	5,792.059	8,600.000	0.000	0.000	-7,965.969	18,386.26
	CH_4	52.771	5.265	1.287	0.000	0.000	0.000	-2.113	57.210
	N_2O	47.097	0.062	0.202	0.000	0.000	0.000	-4.344	43.018
Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (CO_2,CH_4,N_2O) (g/MJ καυσίμου)		24.421	3.044	5.885	8.600	0.000	0.000	-9.313	32.636

3. ΑΠΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Τα όρια και τα στάδια του κύκλου ζωής (κύρια και βοηθητικά) που συμπεριλήφθηκαν στην μελέτη παρουσιάζονται αναλυτικά στην εικόνα 1. Τα αποτελέσματα της απογραφικής ανάλυσης, όσον αφορά τις απαιτήσεις σε ενέργεια (ορυκτή και ανανεώσιμη), τη συνολική ενεργειακή απόδοση και τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου ανά MJ παραγόμενου πράσινου ντήζελ σε κάθε στάδιο του εξεταζόμενου κύκλου ζωής, αποτυπώνονται στον Πίνακα 1. Στις επόμενες παραγράφους, αναλύεται λεπτομερώς το κάθε στάδιο και εξηγείται ο τρόπος υπολογισμός και οι πηγές της απογραφικής ανάλυσης.

3.1. Καλλιέργεια ρετσινολαδιάς

Οι άμεσες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με το στάδιο της καλλιέργειας οφείλονται κυρίως στη χρήση λιπασμάτων και ορυκτών καυσίμων για τις αγροτικές εργασίες, ενώ αυτές επιβαρύνονται και από τις έμμεσες επιπτώσεις των κύκλων ζωής των εισροών αυτών. Όπως προαναφέρθηκε, θεωρήθηκε ότι η ρετσινολαδιά καλλιεργείται σε εκτάσεις της Κεντρικής Μακεδονίας. Δεδομένα που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια του έργου Jonah-Fuel έδειξαν ότι επιτυγχάνεται μέση απόδοσης της τάξης των 2000 kg/εκτάριο, με την θερμογόνο δύναμη των καρπών της ρετσινολαδιάς (castor beans) να είναι ίση με ~31 MJ/kg. Για την καλλιέργεια, απαιτούνται 4.5 kg σπόρων και 40 kg αζωτούχων λιπασμάτων ανά εκτάριο καλλιεργήσιμης γης. Δεδομένα για την κατανάλωση ενέργειας και εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά την παραγωγή των σπόρων και των λιπασμάτων λήφθηκαν από τους Kaltschmitt and Reinhardt [2]. Οι εκπομπές N_2O, οι οποίες διακρίνονται σε άμεσες (εκλύονται απευθείας από το χωράφι) και έμμεσες (προκύπτουν έμμεσα από εκπομπές NO_x και NH_3) και έχουν σημαντική συνεισφορά στις συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, υπολογίστηκαν σύμφωνα με τις οδηγίες της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC) με βάση την ποσότητα των αζωτούχων λιπασμάτων που χρησιμοποιούνται [3].

Κατά το στάδιο της καλλιέργειας, καταναλώνεται επίσης ντήζελ για τη λειτουργία των αγροτικών μηχανημάτων και ηλεκτρισμός για την ξήρανση των καρπών που συλλέγονται. Λόγω έλλειψης των δεδομένων αυτών για την καλλιέργεια της ρετσινολαδιάς, χρησιμοποιήθηκαν μέσες ευρωπαϊκές τιμές για την καλλιέργεια ελαιοκράμβης [1]. Δεδομένα για τις εκπομπές των αγροτικών μηχανημάτων λήφθηκαν από μια AKZ του NREL για το βιοντήζελ [4]. Δεδομένα για την μέση παραγωγή ηλεκτρισμού στην EE-27 και την παραγωγή ορυκτού ντήζελ λήφθηκαν από την βάση δεδομένων ELCD II [5] και την AKZ των JRC-EUCAR-CONCAWE [1] αντίστοιχα.

3.2. Εξαγωγή και ραφινάρισμα καστορελαίου

Μετά τη συγκομιδή τους, οι καρποί μεταφέρονται σε παρακείμενο ελαιοτριβείο για την εξαγωγή του ελαίου. Εξαιτίας της μικρής απόστασης, έγινε η παραδοχή ότι η ενέργεια και εκπομπές για την μεταφορά είναι αμελητέες. Σύμφωνα με δεδομένα του έργου, η απόδοση σε έλαιο είναι 45%κ.β. Το υπόλειμμα μετατρέπεται σε βιοέλαιο μέσω ταχείας πυρόλυσης βιομάζας, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 3.5. Οι εισροές που σχετίζονται με το στάδιο αυτό αποτελούνται από ατμό που χρησιμοποιείται για την θλίψη του καρπού (590 MJ ατμού/τόνο καρπών ρετσινολαδιάς) και εξάνιο που χρησιμοποιείται για την εκχύλιση (1 kg εξανίου/τόνο καρπών ρετσινολαδιάς) [3]. Ο ατμός παράγεται από καύση φυσικού αερίου σε βιομηχανικούς καυστήρες με απόδοση 90% [6], ενώ λήφθηκε υπόψη και ο κύκλος ζωής του εξανίου που παράγεται από αργό πετρέλαιο [1]. Ακόμα καταναλώνεται ηλεκτρισμός (34 kWh/τόνο καρπών ρετσινολαδιάς), ο οποίος λαμβάνεται από το συμβατικό δίκτυο. Δεδομένα για την μέση παραγωγή ηλεκτρισμού στην EE-27 [5] και την εξαγωγή και μεταφορά του φυσικού αερίου στην EE-27 [7] λήφθηκαν από την βάση δεδομένων ELCD II.

Μετά την εξαγωγή του ελαίου, ακολουθεί ραφινάρισμα το οποίο ουσιαστικά απομακρύνει διάφορα ανεπιθύμητα συστατικά που μειώνουν την οξειδωτική σταθερότητα του ελαίου, εξουδετερώνει τα ελεύθερα λιπαρά οξέα και αποχρωματίζει το έλαιο. Κατά τη διάρκεια του εξευγενισμού, υπάρχουν απώλειες σε έλαιο της τάξης του 4%κ.β. Οι ενεργειακές απαιτήσεις του σταδίου αυτού αποτελούνται από ατμό που χρησιμοποιείται για την αποκομμίωση του ελαίου και ηλεκτρισμός από το συμβατικό δίκτυο. Καθώς δεν βρέθηκαν τιμές για τον εξευγενισμό του καστορελαίου, χρησιμοποιήθηκαν αντίστοιχες τιμές για ελαιοκράμβη [8].

3.3. Μεταφορά καστορελαίου στο διυλιστήριο

Μετά την εξαγωγή και κατεργασία του, το έλαιο μεταφέρεται σε συμβατικό διυλιστήριο για την συν-επεξεργασία του με ορυκτά κλάσματα πετρελαίου προς το τελικό καύσιμο. Σύμφωνα με το σενάριο που εξετάστηκε στο πρόγραμμα Jonah-fuel, η επεξεργασία γίνεται στο διυλιστήριο της Μότορ Όιλ στους Αγίους Θεοδώρους στην Κόρινθο. Η απόσταση μεταφοράς από την Κ. Μακεδονία στο διυλιστήριο είναι περίπου 600 km. Η μεταφορά πραγματοποιείται με πετρελαιοφόρα φορτηγά δυναμικότητας 23 τόνων και κατανάλωση 0.97 $MJ_{ντήζελ}$/t.km [6]. Η κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές για το στάδιο αυτό περιλαμβάνουν και το ταξίδι επιστροφής στην Κ. Μακεδονία.

3.4. Συν-επεξεργασία του καστορελαίου στην μονάδα υδρογονοκατεργασίας συμβατικού διυλιστηρίου για παραγωγή πράσινου ντήζελ

Πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος Jonah-fuel έδειξαν ότι η εισαγωγή του καστορελαίου σε συγκεντρώσεις 5 και 10%κ.β. στην κλασσική τροφοδοσία της μονάδας υδρογονοκατεργασίας παρουσία εμπορικών καταλυτών υδρογονοδιάσπασης και κλασικές συνθήκες λειτουργίες (οι οποίες ορίστηκαν σε συνεργασία με την Μότορ Όιλ) όχι μόνο δεν επηρεάζει τη λειτουργία της μονάδας, αλλά δρα θετικά αυξάνοντας την μετατροπή και την εκλεκτικότητα σε ντήζελ. Το διυλιστήριο της Μότορ Όιλ στην Κόρινθο αποτελεί το μεγαλύτερο διυλιστήριο στην Ελλάδα, με δυναμικότητα της τάξης του 1 εκατομμυρίου κυβικών μέτρων την ώρα. Δεδομένου ότι η παραγωγή καστορελαίου είναι πολύ μικρότερη, το ποσοστό που ρεαλιστικά μπορεί να εισαχθεί σε συμβατική μονάδα υδρογονοδιάσπασης δεν μπορεί να ξεπεράσει το 2-3%κ.β. Όπως έδειξαν οι πειραματικές μετρήσεις, το ποσοστό αυτό δεν αναμένεται να επηρεάσει την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου του διυλιστηρίου. Έτσι, έγινε η παραδοχή ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής πράσινου ντήζελ σε συμβατικό διυλιστήριο είναι οι ίδιες με αυτές της παραγωγής ορυκτού ντήζελ και ίσες με κατανάλωση 0.1 MJ ορυκτής ενέργειας και έκλυση 8.6 g CO_2-eq ανά MJ παραγόμενου ντήζελ [1].

3.5. Ταχεία πυρόλυση υπολειμμάτων ρετσινολαδιάς για παραγωγή βιοελαίου

Τα υπολείμματα των καρπών της ρετσινολαδιάς, μετά την εξαγωγή του λαδιού, μπορούν να αξιοποιηθούν για την περαιτέρω παραγωγή βιοκαυσίμων. Συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι η ταχεία καταλυτική πυρόλυση των υπολειμμάτων αυτών παρουσία ZSM-5 αποτελεί την πιο υποσχόμενη διεργασία για την αξιοποίησή τους. Η ταχεία πυρόλυση είναι μια θερμοχημική διεργασία κατεργασίας της βιομάζας κατά την οποία η τροφοδοσία θερμαίνεται με ταχείς ρυθμούς σε υψηλές θερμοκρασίες απουσία αέρα. Το κύριο προϊόν, το βιοέλαιο, λαμβάνεται σε υψηλές αποδόσεις, μαζί με αέρια και στερεά παραπροϊόντα. Πειράματα που έγιναν στην πιλοτική μονάδα πυρόλυσης ρευστοστερεάς κλίνης του ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ έδειξαν ότι η πυρόλυση των υπολειμμάτων ρετσινολαδιάς οδηγεί στην παραγωγή 34.7%κ.β. οργανικών προϊόντων (βιοελαίου), 14.4 %κ.β. νερού, 32.2 %κ.β. εξανθρακώματος και 18.7%κ.β. αερίων (επί ξηρού). Τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ενέργειας και παραγωγής αερίων θερμοκηπίου στο στάδιο της ταχείας πυρόλυσης υπολειμμάτων. Η διεργασία είναι ενεργειακή αυτάρκης, καθώς τα παραπροϊόντα της αντίδρασης (αέρια και στερεά) χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων της μονάδας. Κατ' επέκταση, δεν απαιτείται εξωτερική παροχή ορυκτής ενέργειας, ενώ οι εκπομπές CO_2 που εκλύονται προέρχονται από ανανεώσιμη βιομάζα και άρα δεν προσμετρούνται στο ισοζύγιο αερίων θερμοκηπίου. Το μόνο «χρήσιμο» προϊόν της διεργασίες θεωρείται ότι είναι το βιοέλαιο και έτσι όλες οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διεργασίας αποδόθηκαν σε αυτό το προϊόν.

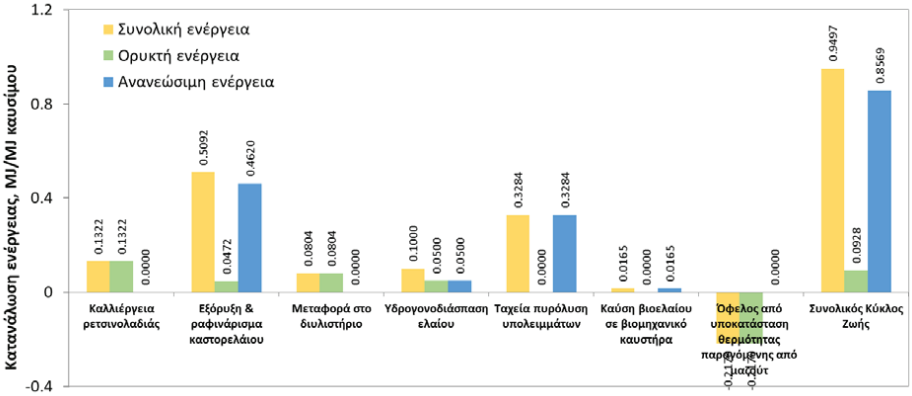
Για τις ανάγκες της μελέτης, υποτέθηκε ότι η μονάδα ταχείας πυρόλυσης βρίσκεται πολύ κοντά στο ελαιοτριβείο και έτσι το στάδιο της μεταφοράς των υπολειμμάτων στην μονάδα μπορεί να παραλειφθεί. Το παραγόμενο βιοέλαιο χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε βιομηχανικούς καυστήρες για την παραγωγή θερμότητας, υποκαθιστώντας ορυκτό μαζούτ. Με βάση την μέθοδο της υποκατάστασης, αφαιρέθηκαν από τον κύκλο ζωής του πράσινου ντήζελ από ρετσινολαδιά ισοδύναμη ποσότητα ορυκτής ενέργειας και εκπομπών αερίων θερμοκηπίου για την παραγωγή ίσης ποσότητας θερμότητας από καύση μαζούτ. Η κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου για την παραγωγή του μαζούτ (συμπεριλαμβανομένων της εξόρυξης και μεταφοράς του αργού πετρελαίου, τη διύλιση προς μαζούτ και τη μεταφορά & διανομή του στους τελικούς χρήστες) λήφθηκαν από τη βιβλιογραφία [9]. Οι εκπομπές από την καύση μαζούτ σε βιομηχανικούς καυστήρες που χρησιμοποιήθηκαν ήταν από την Corinair.

4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ & ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

4.1. Κατανάλωση ολικής, ορυκτής και ανανεώσιμης ενέργειας

Η εικόνα 2 παρουσιάζει την κατανάλωση ολικής, ορυκτής και ανανεώσιμης ενέργειας σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής του πράσινου ντήζελ που παράγεται από ρετσινολαδιά μέσω υδρογονοδιάσπασης του καστορελαίου με συμβατικά κλάσματα πετρελαίου σε διυλιστήριο. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι τιμές που δίνονται στην εικόνα 2 αφορούν την επιπλέον ενέργεια που χρειάζεται να καταναλωθεί για την παραγωγή 1 MJ του υπό μελέτη βιοκαυσίμου. Τα νούμερα αυτά δεν περιλαμβάνουν δηλαδή το ενεργειακό περιεχόμενο του καυσίμου αυτού κάθε αυτού (δηλ. κατανάλωση ενέργειας ίση με 1 MJ/MJ υποδηλώνει ότι καταναλώνεται ίση ποσότητα ενέργειας με την χημική ενέργεια που περιέχεται στο καύσιμο για την παραγωγή του).

Τα δεδομένα της εικόνας 2 φανερώνουν ότι η παραγωγή του πράσινου ντήζελ από ρετσινολαδιά έχει ως αποτέλεσμα πολύ χαμηλή κατανάλωση ορυκτής ενέργειας και ως εκ τούτου πολύ θετική επίδραση στην εξοικονόμηση ορυκτών πόρων. Ο κύκλος ζωής του βιοκαυσίμου οδηγεί κυρίως στην κατανάλωση ανανεώσιμης ενέργειας, εξαιτίας της ενέργειας που περιέχεται στην αρχική τροφοδοσία (ρετσινολαδιά). Γενικά, η υψηλή κατανάλωση ανανεώσιμης ενέργειας υποδηλώνει χαμηλή απόδοση στην μετατροπή της βιομάζας σε βιοκαύσιμο. Στην περίπτωση του πράσινου ντήζελ της παρούσας μελέτης, η συνολική κατανάλωση ανανεώσιμης ενέργειας είναι χαμηλότερη της μονάδας, κάτι που υποδηλώνει ότι η παραγωγή του απαιτεί λιγότερη κατανάλωση ενέργειας από αυτήν που περιέχεται στο τελικό βιοκαύσιμο.



Εικόνα 2: Κατανάλωση ολικής, ορυκτής και ανανεώσιμης ενέργειας στον κύκλο ζωής του πράσινου ντήζελ παραγόμενου από ρετσινολαδιά

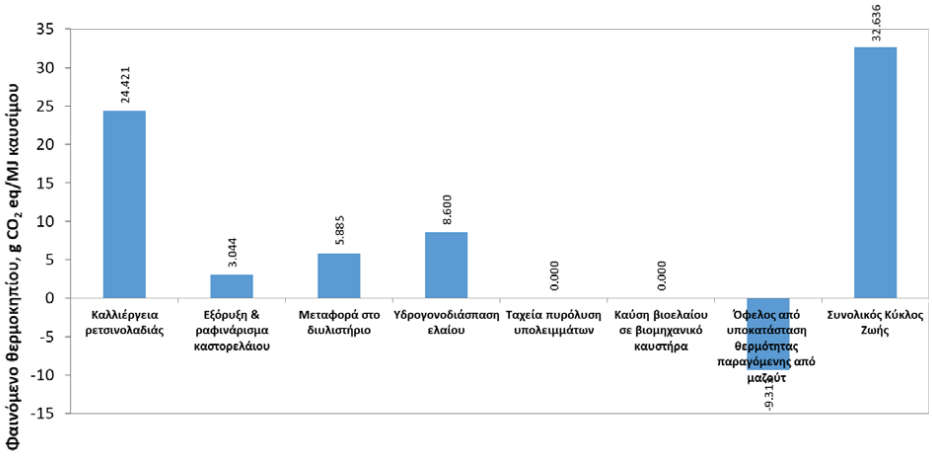
Παρατηρώντας τη συνεισφορά των επιμέρους σταδίων του κύκλου ζωής, φαίνεται ότι το στάδιο της έκθλιψης των καρπών για την εξαγωγή του καστορελαίου και το στάδιο της πυρόλυσης των υπολειμμάτων αποτελούν τα στάδια με την μεγαλύτερη κατανάλωση ανανεώσιμης ενέργειας. Στην περίπτωση της εξαγωγής του ελαίου, η υψηλή τιμή οφείλεται σε απώλειες κατά τη έκθλιψη, εξαγωγή και εξευγενισμό του ελαίου. Κατά την πυρόλυση, η μεγάλη κατανάλωση οφείλεται κυρίως στη χρήση των παραπροϊόντων της διεργασίας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών αυτής. Το ενεργειακό ισοζύγιο θα μπορούσε να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας ορυκτή ενέργεια για την κάλυψη των αναγκών αυτών, κάτι όμως που θα οδηγούσε σε σημαντική επιβάρυνση στην κατανάλωση ορυκτής ενέργειας με αρνητικές συνέπειες για την εξοικονόμηση ορυκτών πόρων.

Όσον αφορά την κατανάλωση ορυκτής ενέργειας, αυτή είναι μεγαλύτερη στο στάδιο της καλλιέργειας της ρετσινολαδιάς εξαιτίας της χρήσης ντήζελ και ηλεκτρισμού για τις αγροτικές εργασίες. Η υποκατάσταση του μαζούτ από βιοέλαιο παραγόμενο από τα υπολείμματα της ρετσινολαδιάς βελτιώνει σημαντικά το ισοζύγιο ορυκτής ενέργειας σε όλο τον κύκλο ζωής τους πράσινου ντήζελ.

4.2. Φαινόμενο του θερμοκηπίου

Η συνεισφορά του πράσινου ντήζελ στο φαινόμενο του θερμοκηπίου εξαιτίας των εκπομπών CO_2, CH_4 και N_2O σε όλο τον κύκλο ζωής του παρουσιάζεται στην εικόνα 3. Πρέπει να αναφερθεί ότι για τους υπολογισμούς αυτούς λήφθηκε υπόψη μόνο το CO_2 που προέρχεται από καύση ορυκτών καυσίμων. Η παραγωγή του πράσινου ντήζελ οδηγεί στην εκπομπή μόλις 33 g ισοδύναμων CO_2 ανά MJ, μια τιμή ιδιαίτερα χαμηλή ειδικά αν λάβουμε υπόψη ότι οι εκπομπές CO_2 κατά την καύση του θα είναι μηδενικές λόγω του ανανεώσιμου χαρακτήρα του. Η ανάλυση της συνεισφοράς των διαφόρων σταδίων του κύκλου ζωής στις εκπομπές αυτές δείχνει ότι το στάδιο της καλλιέργειας της ρετσινολαδιάς συνεισφέρει κατά 75% στη συνολική επίπτωση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Παρατηρώντας προσεκτικά τις τιμές του Πίνακα 1, φαίνεται ότι οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στο στάδιο της καλλιέργειας οφείλονται κατά ~60% στις εκπομπές N_2O από την παραγωγή των αζωτούχων λιπασμάτων και την έκλυσή του από το έδαφος.

Μετά το στάδιο της καλλιέργειας, το στάδιο της διύλισης είναι αυτό που συνεισφέρει περισσότερο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τέλος, όπως και στην περίπτωση της κατανάλωσης ενέργειας, το όφελος από την υποκατάσταση μαζούτ με βιοέλαιο για παραγωγή θερμότητας, βελτιώνει σημαντικά την συνολική επίπτωση του πράσινου ντήζελ στην κατηγορία της υπερθέρμανσης.



Εικόνα 3: Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στον κύκλο ζωής του πράσινου ντήζελ παραγόμενου από ρετσινολαδιά

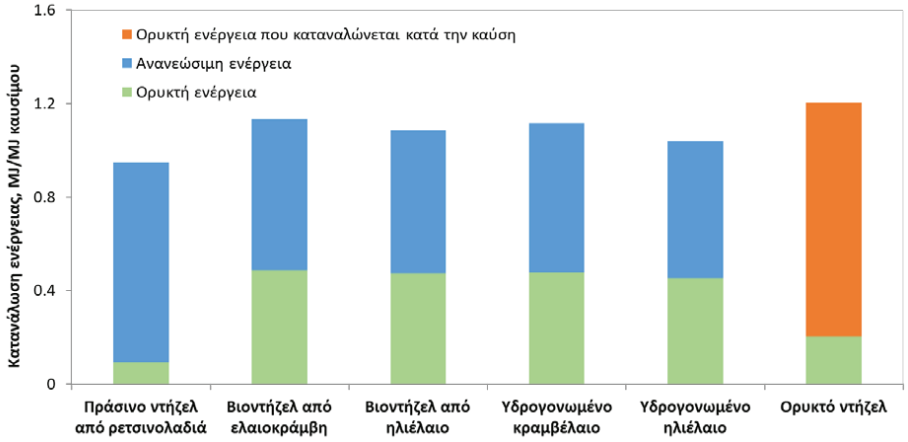
4.3. Σύγκριση πράσινου ντήζελ με ορυκτό ντήζελ και βιοντήζελ 1ης γενιάς

Η επίδραση του πράσινου ντήζελ από καστορέλαιο στην κατανάλωση ορυκτών ενεργειακών πόρων σε σύγκριση με βιοντήζελ 1ης γενιάς που παράγεται από τη μετεστεροποίηση και υδρογόνωση κραμβελαίου και ηλιελαίου, καθώς και ορυκτού ντήζελ από αργό πετρέλαιο, παρουσιάζεται στην εικόνα 4. Αποδεικνύεται ότι το πράσινο ντήζελ από καστορέλαιο που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία παρουσιάζει την χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας συνολικά (τόσο ορυκτής όσο και ανανεώσιμης) σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα καύσιμα.

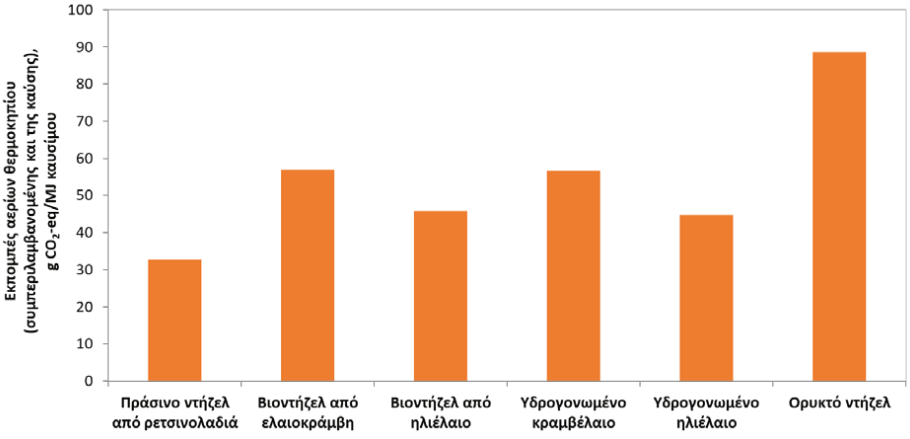
Λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση ενέργειας σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής πλην της καύσης, παρατηρούμε ότι απαιτείται σημαντική μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας για την παραγωγή των βιοκαυσίμων σε σχέση με το ορυκτό ντήζελ. Αυτό οφείλεται κατ' αρχήν στο γεγονός ότι το αργό πετρέλαιο αποτελεί καλύτερη τροφοδοσία για την παραγωγή υδρογονανθράκων (καθώς δεν περιέχει οξυγόνο σε αντίθεση με τη βιομάζα) και κατά δεύτερο στην υψηλά αποδοτική διεργασία διύλισης του πετρελαίου. Επιπλέον, απαιτείται και κατανάλωση μεγάλης ποσότητας ανανεώσιμης ενέργειας για όλα τα βιοκαύσιμα, εξαιτίας της ενέργειας που περιέχεται στην αρχική τροφοδοσία βιομάζας. Βέβαια, αν συμπεριληφθεί και η κατανάλωση ορυκτής ενέργειας κατά το στάδιο της καύσης (η οποία είναι

μηδενική για τα βιοκαύσιμα εξαιτίας του ανανεώσιμου χαρακτήρα τους), το ορυκτό ντήζελ έχει την χειρότερη επίδοση στην κατηγορία κατανάλωσης ορυκτών ενεργειακών πόρων.

Αντίστοιχη σύγκριση γίνεται και για την επίπτωση στο φαινόμενο του θερμοκηπίου στην εικόνα 5. Οι τιμές εκπομπών αερίων θερμοκηπίου που παρουσιάζονται στο διάγραμμα περιλαμβάνουν και τις εκπομπές που εκλύονται κατά το στάδιο της καύσης (οι οποίες είναι μηδενικές στην περίπτωση των βιοκαυσίμων). Όλα τα βιοκαύσιμα παρουσιάζουν μικρότερα ή μεγαλύτερη οφέλη και μειώνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο φαινόμενο της υπερθέρμανσης σε σχέση με το ορυκτό καύσιμο. Η χρήση του πράσινου ντήζελ από καστορέλαιο επιτυγχάνει τις μεγαλύτερες μειώσεις στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου σε σχέση τόσο με το ορυκτό ντήζελ, όσο και με αντίστοιχα βιοκαύσιμα 1ης γενιάς. Η παρατήρηση αυτή είναι σε συμφωνία με την μεγαλύτερη μείωση που παρατηρείται και στην κατανάλωση ενέργειας σε όλο τον κύκλο ζωής του βιοκαυσίμου αυτού, κάτι που καταδεικνύει ότι το καστορέλαιο αποτελεί ελκυστική τροφοδοσία για την παραγωγή αειφόρων και βιώσιμων βιοκαυσίμων με μεγάλα περιβαλλοντικά οφέλη.



Εικόνα 4: Σύγκριση του πράσινου ντήζελ παραγόμενου από ρετσινολαδιά με το ορυκτό ντήζελ και βιοντήζελ 1ης γενιάς ως προς τις επιπτώσεις στην κατανάλωση ενεργειακών πόρων



Εικόνα 5: Σύγκριση του πράσινου ντήζελ παραγόμενου από ρετσινολαδιά με το ορυκτό ντήζελ και βιοντήζελ 1ης γενιάς ως προς τις επιπτώσεις στο φαινόμενο του θερμοκηπίου

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία, εξετάστηκαν με τη μέθοδο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η αειφορία του πράσινου ντήζελ παραγόμενου από ρετσινολαδιά για χρήση ως βιοκαύσιμο. Στόχος της δουλειάς ήταν αφενός η σύγκριση του περιβαλλοντικού προφίλ του υπό μελέτη βιοκαυσίμου με αντίστοιχα ορυκτά καύσιμα και βιοκαύσιμα 1ης γενιάς και αφετέρου η ανάδειξη των σταδίων στον κύκλο ζωής του που επιβαρύνουν περισσότερο το περιβάλλον και χρήζουν περαιτέρω βελτίωσης.

Όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής έδειξε ότι η παραγωγή πράσινου ντήζελ από καστορέλαιο οδηγεί κυρίως στην κατανάλωση ανανεώσιμης ενέργειας, με ιδιαίτερα χαμηλές απαιτήσεις σε ορυκτούς πόρους. Ο συνολικός κύκλος ζωής του βιοκαυσίμου έχει γενικά θετική επίδραση στην εξοικονόμηση των ορυκτών πηγών ενέργειας. Η υψηλότερη κατανάλωση ορυκτής ενέργειας εμφανίζεται στο στάδιο της καλλιέργειας της ρετσινολαδιάς, κάτι που οφείλεται στο ντήζελ και τον ηλεκτρισμό που καταναλώνονται για τις αγροτικές εργασίες. Η υποκατάσταση του μαζούτ σε βιομηχανικούς καυστήρες με βιοέλαιο που παράγεται από την ταχεία πυρόλυση των υπολειμμάτων της ρετσινολαδιάς μετά την εξαγωγή του ελαίου βελτιώνει σημαντικά το ενεργειακό προφίλ του βιοκαυσίμου. Σχετικά με τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου, ο κύκλος ζωής του ντήζελ από καστορέλαιο επιδεικνύει και πάλι πολύ χαμηλή συνεισφορά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η κύρια πηγή αερίων θερμοκηπίου είναι η καλλιέργεια της τροφοδοσίας εξαιτίας των άμεσων εκπομπών N_2O από τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις και των έμμεσων εκπομπών N_2O κατά την παραγωγή των αζωτούχων λιπασμάτων.

Τέλος, η σύγκριση του πράσινου ντήζελ από καστορέλαιο με ορυκτό ντήζελ και βιοντήζελ παραγόμενο μέσω μετεστεροποίησης και υδρογόνωσης κραμβελαίου και ηλιελαίου κατέδειξε ότι η ρετσινολαδιά αποτελεί ελκυστική τροφοδοσία για την παραγωγή αειφόρων και βιώσιμων βιοκαυσίμων με μεγάλα περιβαλλοντικά οφέλη, καθώς το ντήζελ από καστορέλαιο είχε τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας (ορυκτής και ανανεώσιμης) και τις χαμηλότερες εκπομπές αερίων θερμοκηπίου σε όλο τον κύκλο ζωής του σε σχέση με τα συγκρινόμενα καύσιμα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος “CASTOR bean (JONAH seed) cultivation in central Macedonia, Greece and industrial exploitation of its derivatives towards biofuels’ production – JONAH FUEL”, η χρηματοδότηση του οποίου έγινε από την Ευρωπαϊκή Ένωση στα πλαίσια της Δράσης «Διμερής Ε&Τ Συνεργασία Ελλάδας- Ισραήλ 2013-2015».

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] JEC - Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration, 2014, “Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context”, Version 4.a.

[2] Kaltschmitt, M., Reinhardt, G.A., 1997, “Nachwachsende Energietraeger: Grunglagen, Verfahren, oekologiesche bilanzierung“, Vieweg, ISBN 3-528-06778-0.

[3] GM et al., 2002, “GM Well-to-Wheels Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuels/Vehicles Systems. A European study. LBST”.

[4] Sheehan, J., Camobreco, V., Duffield, J., Graboski, M., Shapouri, H., 1998, “Life cycle inventory of biodiesel and petroleum diesel for use in an urban bus”, National Renewable Energy Laboratory (NREL), study prepared for US Department of Energy and US Department of Agriculture.

[5] PE INTERNATIONAL. Electricity Mix; AC; consumption mix, at consumer; 1kV - 60kV. ELCD database 2.0, Data set version 0a1b40db-5645-4db8-a887-eb09300b7b74.

[6] GREET Version 1.5 — Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation, Free software developed by the Centre for Transportation Research, Argonne National Laboratory.

[7] PE INTERNATIONAL. Natural Gas; from onshore and offshore production incl. pipeline and LNG transport; consumption mix, at consumer; desulphurised. ELCD database 2.0, Data set version 3d602e55-aaa2-44e3-adb9-40f49eb1a915

[8] Beer, T., Grant, T., Morgan, G., Lapszewicz, J., Anyon, P., Edwards, J., Nelson, P, Watson, H., Williams, D., “Life-cycle emissions analysis of alternative fuels for heavy vehicles: Comparison of transport fuels”, Final report to the Australian Greenhouse Office, EV45A/2/F3C.

[9] Lewis, C.A., 1997, “Fuel and Energy Production Emission Factors”, MEET Project: Methodologies for Estimating Air Pollutant Emissions from Transport.

ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΗ ΚΑΣΤΟΡΕΛΑΙΟΥ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗΣ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ

Ε.Φ. Ηλιοπούλου*, Μ. Παπαπέτρου, Χ. Μιχαήλωφ, Α.Α. Λάππας

Εργαστήριο Περιβαλλοντικών Καυσίμων & Υδρογονανθράκων, ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ,
6ο χλμ. οδού Χαριλάου-Θέρμης, 57001 Θεσσαλονίκη,
e-mail: eh@cperi.certh.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μεγάλο ενδιαφέρον υπάρχει σήμερα στο πεδίο χρήσης της βιομάζας για την παραγωγή καυσίμων και άλλων χημικών προϊόντων. Στο πλαίσιο αυτό, ανανεώσιμης φύσεως τροφοδοσίες, όπως φυτικά έλαια, λιγνοκυτταρινούχα βιομάζα και άλλα αγροτικά υπολείμματα, μπορούν να αποτελέσουν την πρώτη ύλη για τη σύνθεση βιοντίζελ, βιο-πλαστικών, βιο-λιπαντικών και άλλων προϊόντων, που έχουν επιτυχώς εμπορευματοποιηθεί σε πολλές χώρες και συνάδουν με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και της πράσινης χημείας [1]. Η Ευρωπαϊκή Ένωση υποστηρίζει την καλλιέργεια μη-βρώσιμων τροφοδοσιών, που μπορούν να αναπτυχθούν σε περιθωριακές περιοχές, προς παραγωγή βιο-προϊόντων. Μια τέτοια, σχετικά καλά εδραιωμένη καλλιέργεια μη βρώσιμου, ελαιώδους καρπού είναι αυτή της ρετσινολαδιάς (Ricinus communis), ευρέως διαδεδομένη στην περιοχή της Μεσογείου και της Μέσης Ανατολής. Οι σπόροι ρετσινολαδιάς (castor bean) συνεισφέρουν μόνο κατά 0.15% στην παγκόσμια παραγωγή φυτικού ελαίου, ωστόσο το συγκεκριμένο έλαιο είναι ύψιστης σημασίας για την παγκόσμια χημική βιομηχανία, ως άφθονη πηγή υδρόξυ-λιπαρών οξέων. Τα τελευταία 25 χρόνια η παγκόσμια κατανάλωση του έχει αυξηθεί πάνω από 50% [2]. Μεταξύ των ποικίλων εφαρμογών του καστορελαίου, (castor oil) [2-4], η παρούσα μελέτη εστιάζει στην διερεύνηση πιθανών χρήσεων του προς παραγωγή βιο-καυσίμων μέσω θερμοχημικών διυλιστηριακών διεργασιών. Συγκεκριμένα στόχο της μελέτης αποτελεί η ενσωμάτωση του καστορελαίου σε συμβατικά διυλιστήρια για την μετατροπή αυτής της εναλλακτικής ανανεώσιμης τροφοδοσίας σε βιο-καύσιμα μέσω της διεργασίας Καταλυτικής Πυρόλυσης (Fluid Catalytic Cracking: FCC).

Πραγματοποιήθηκε έτσι σειρά πειραμάτων καταλυτικής πυρόλυσης με στόχο την συν-επεξεργασία καστορελαίου (2 και 5% κ.β.) με συμβατική τροφοδοσία αεριελαίου κενού (VGO), τόσο σε εργαστηριακής κλίμακας όσο και σε πιλοτική μονάδα FCC για την πιο ρεαλιστική εκτίμηση της δυνατότητας συν-τροφοδοσίας καστορελαίου σε υπάρχουσες διυλιστηριακές υποδομές. Κατά την διεξαγωγή των εργαστηριακών πειραμάτων προέκυψε ότι το καστορέλαιο πυρολύεται, ακόμη και απουσία καταλύτη, οδηγώντας στην παραγωγή επτανάλης (που αποτελεί το κύριο οξυγονούχο πρόσθετο της βενζίνης) και ενδεκανοϊκού οξέος (που αποτελεί το κύριο οξυγονούχο πρόσθετο του ντίζελ). Αντίστοιχα κατά την πυρόλυση μιγμάτων 5% ή 2% καστορελαίου με VGO δεν ανιχνεύτηκαν οξυγονούχες ενώσεις στα υγρά προϊόντα της διεργασίας, ενώ στην πιλοτική μονάδα FCC φαίνεται πως το καστορέλαιο μπορεί να εισαχθεί στην διεργασία, τουλάχιστον έως 5% κ.β., χωρίς να δημιουργήσει κάποια λειτουργικά προβλήματα. Αξιοσημείωτο είναι ότι και στις δύο μονάδες η παρουσία καστορελαίου ως συν-τροφοδοσία με συμβατικό VGO οδήγησε σε ελάττωση της βενζίνης και των παραγόμενων LPG (Liquified Petroleum Gas) ολεφινών, καθώς και της απόδοσης σε υδρογόνο, ενώ οδήγησε σε αντίστοιχη αύξηση των αποδόσεων σε LCO (Light Cycle Oil) και κωκ.

Λέξεις Κλειδιά: καστορέλαιο, καταλυτική πυρόλυση, συν-επεξεργασία, βιο-καύσιμα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κύριο στόχο της παρούσας έρευνας αποτελεί η διερεύνηση πιθανών χρήσεων του καστορελαίου (castor oil), προς παραγωγή καυσίμων μέσω θερμοχημικών διυλιστηριακών διεργασιών. Η ενσωμάτωση προϊόντων (castor oil) και υπολειμμάτων ρετσινολαδιάς σε συμβατικά διυλιστήρια στοχεύει στην μετατροπή αυτής της εναλλακτικής ανανεώσιμης τροφοδοσίας σε βιο-καύσιμα.

Συγκεκριμένα, η παρούσα εργασία αφορά στη διερεύνηση χρήσης της συμβατικής διυλιστηριακής διεργασίας Καταλυτικής Πυρόλυσης (Fluid Catalytic Cracking: FCC)- η οποία και στοχεύει στην πυρόλυση βαρύτερων πετρελαϊκών κλασμάτων προς ελαφρύτερα προϊόντα, κυρίως στην περιοχή της βενζίνης- για την αναβάθμιση καστορελαίου προς τελική παραγωγή καυσίμων μεταφοράς. Συγκεκριμένα διερευνάται η συν-επεξεργασία καστορελαίου με συμβατική πετρελαϊκή τροφοδοσία (αεριέλαιο κενού VGO) στη διεργασία FCC, αποσκοπώντας στην μελέτη της επίδρασης της παρουσίας καστορελαίου στις αποδόσεις σε προϊόντα FCC. Η εργασία περιλαμβάνει σειρά πειραμάτων τόσο σε εργαστηριακή όσο και σε πιλοτική κλίμακα, εστιάζοντας στην επίδραση διαφορετικών ποσοστών καστορελαίου που προστίθενται σε VGO, θεωρούμενο ως συμβατική τροφοδοσία FCC (2 και 5% κ.β.). Τα πειράματα FCC πραγματοποιήθηκαν στο ΙΔΕΠ με χρήση συμβατικής τροφοδοσίας αεριελαίου, προμηθευμένης από τη Motor Oil. Αρχικά εκτελέστηκαν πειράματα σε μικρής κλίμακας εργαστηριακή μονάδα καταλυτικής πυρόλυσης, για τον καθορισμό των βέλτιστων συνθηκών πυρόλυσης και του αποδοτικότερου καταλύτη, ανάμεσα σε διάφορα εμπορικά διαθέσιμα καταλυτικά υλικά. Για αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκε η διαθέσιμη στο ΙΔΕΠ Σύντομου Χρόνου Επαφής - Μονάδα Ελέγχου Μικροενεργότητας (Short Contact Time – Microactivity Test Unit: SCT-MAT), ενώ τα πειράματα έλαβαν χώρα σε διαφορετικά επίπεδα μετατροπής μεταβάλλοντας το λόγο καταλύτη/ελαίου (catalyst to oil (C/O) ratio). Πρόσθετα πειράματα πιλοτικής κλίμακας με μίγματα καστορελαίου και VGO έγιναν και στην πιλοτική μονάδα FCC του ΙΔΕΠ, τα οποία και παρέχουν μια πιο ρεαλιστική εκτίμηση της δυνατότητας συν-επεξεργασίας καστορελαίου σε υπάρχουσες διυλιστηριακές εγκαταστάσεις (μονάδες FCC), όπως αποδεικνύεται από την εκτεταμένη χρήση της πιλοτικής αυτής μονάδας για διάφορες μελέτες FCC, σε συνεργασία με πληθώρα πετρελαϊκών εταιριών σε παγκόσμια κλίμακα.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Καταλυτικά υλικά

Για την παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε ένας τυπικός διυλιστηριακός καταλύτης ισορροπίας FCC, του οποίου οι κύριες ιδιότητες μετρήθηκαν στο ΙΔΕΠ και δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Ιδιότητες καταλύτη (τυπικός διυλιστηριακός καταλύτης ισορροπίας Ecat)

Ολική ειδική επιφάνεια, TSA, m^2/g	191.23
Ειδική επιφάνεια ζεολίθου, ZSA, m_2/g	134.71
Ειδική επιφάνεια μήτρας, MSA, m_2/g	56.52
Λόγος ζεολίθου/μήτρας, Z/M	2.38
Μέγεθος μοναδιαίας κυψελίδας, UCS, Å	24.30

2.2. Τροφοδοσίες

2.2.1. Καστορέλαιο

Οι σπόροι ρετσινολαδιάς Castor bean (Ricinus communis) αποτελούν ένα σημαντικότατο ελαιώδη καρπό με μοναδικής ποιότητας έλαιο. Η παρούσα μελέτη περιλαμβάνει 4 διαφορετικά υβρίδια σπόρων ρετσινολαδιάς (castor beans) και 1 ποικιλία (επονομαζόμενη 105N), τα οποία και αναπτύχθηκαν για τη διευκόλυνση της μηχανοποιημένης συγκομιδής και της υψηλής απόδοσης και αποβλέπει στη σύγκριση αυτών των ελαιωδών καρπών σε απόδοση και ποιοτικά χαρακτηριστικά ελαίου. Το περιεχόμενο στους σπόρους έλαιο είναι συνήθως ποσοτικό χαρακτηριστικό που επηρεάζεται από τον γενότυπο, το στάδιο ανάπτυξης και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Τα πέντε διαφορετικά καστορέλαια χαρακτηρίστηκαν (Πίνακας 2) στο ΙΔΕΠ (στοιχειακή ανάλυση, θερμογόνος δύναμη, σύσταση, οξύτητα,

πυκνότητα, υγρασία, περιεχόμενη τέφρα, θερμική σταθερότητα, κτλ). Εις βάθος χαρακτηρισμός των κύριων συστατικών 'major components' αυτών των φυτικών ελαίων έλαβε επίσης χώρα στο ΙΔΕΠ με εφαρμογή της προηγμένης αναλυτικής τεχνικής 2D αέριας χρωματογραφίας (GC×GC).

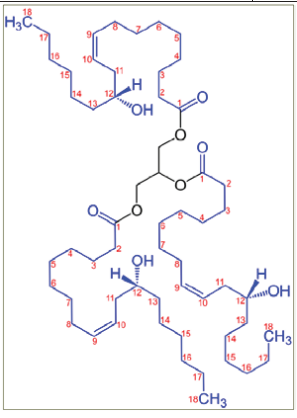
Πίνακας 2: Προέλευση και χαρακτηρισμός διαφορετικών τύπων καστορελαίου

Ελαιώδης τροφοδοσία	Προέλευση	Θερμογόνος δύναμη (MJ/kg)	Πυκνότητα (15°C) (g/ml)	TAN Οξύτητα (mgKOH/g)
Καστορέλαιο 1	105N	36.8366	0.9699	7.9541
Καστορέλαιο 2	Hybrid11	36.9904	0.9656	9.0814
Καστορέλαιο 3	Hybrid12	37.1284	0.9664	18.9626
Καστορέλαιο 4	Hybrid13	36.9766	0.9670	19.6668
Καστορέλαιο 5	Hybrid14	36.7637	0.9690	12.5468

Η επίδραση της συν-επεξεργασίας διαφορετικών ποσοτήτων καστορελαίου 1 μελετήθηκε με εφαρμογή των βέλτιστων συνθηκών πυρόλυσης και του επιλεγμένου εμπορικού καταλύτη, όπως αυτά προέκυψαν από τα πειράματα εργαστηριακής κλίμακας. Ο Πίνακας 3 περιλαμβάνει έναν πιο εκτεταμένο φυσικοχημικό χαρακτηρισμό του επιλεγμένου καστορελαίου 1, ενώ η Εικόνα 1 παρουσιάζει σχηματικά τη δομή του βασικού του τριγλυκεριδίου.

Πίνακας 3: Ιδιότητες επιλεγμένου καστορελαίου 1

Μετρούμενη ιδιότητα	Τιμή
LECO-628	
- C, κ.β.%	71.88
- H, κ.β.%	11.65
- O, κ.β.%	16.47
νερό, κ.β.%	0.6328
SimDis_HI-TEMP	° C
mass%_IBP	322.4
mass%_10	481.6
mass%_30	587.4
mass%_50	621.2
mass%_70	633.4
mass%_90	642.4
mass%_FBP	744.2



Εικόνα 1: Βασικό τριγλυκερίδιο με ρικινολεϊκό (85-95), ολεϊκό (2-6) και λινολεϊκό (1-5) οξύ.

2.2.2. Αεριέλαιο κενού (VGO)

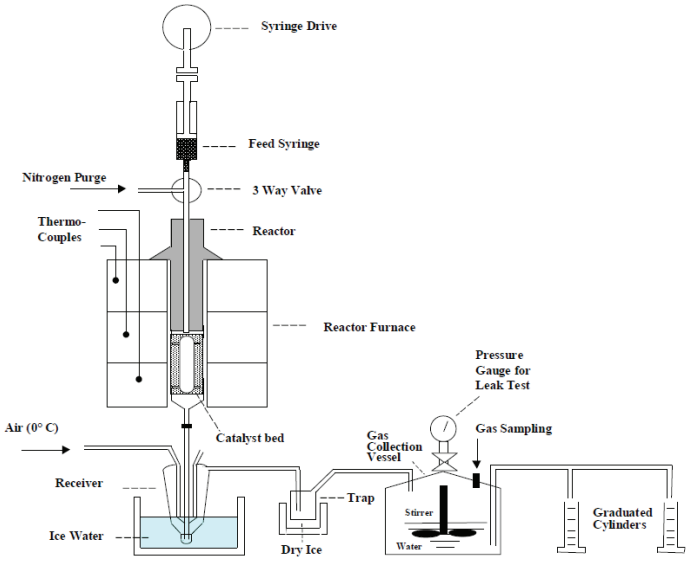
Συμβατική FCC τροφοδοσία αεριελαίου VGO προμηθευμένη από τη Motor Oil χρησιμοποιήθηκε για τα πειράματα συν-επεξεργασίας. Στον πίνακα 4 παρατίθενται οι ιδιότητες αυτής της VGO τροφοδοσίας.

Πίνακας 4: Ιδιότητες VGO (τυπική διυλιστηριακή τροφοδοσία FCC)

Μετρούμενη Ιδιότητα	Τιμή
API	25.55
N_2, mg/kg	416.6
S, ppmwt	769.6
Πυκνότητα_15°C, g/ml	0.9002
Δείκτης διάθλασης, Refractive Index_70°C	1.48119
MCRT, wt%	0.0049
Ιξώδες_50°C, cSt	37.5665
Ιξώδες_98.89°C, cSt	7.9427
SimDis_HI-TEMP	deg C
mass%_IBP	326.8
mass%_10	386.4
mass%_30	421.8
mass%_50	450.2
mass%_70	482.2
mass%_90	526
mass%_FBP	599.4

2.3. Εργαστηριακή μονάδα μικρής κλίμακας

Στην Εικόνα 2 δίνεται σχηματικό διάγραμμα της διαθέσιμης στο ΙΔΕΠ εργαστηριακής κλίμακας μονάδας καταλυτικής πυρόλυσης SCT-MAT [5].



Εικόνα 2: Σχηματικό διάγραμμα εργαστηριακής κλίμακας μονάδας καταλυτικής πυρόλυσης SCT-MAT.

Η μονάδα SCT-MAT είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και εφοδιασμένη με αντιδραστήρα σταθερής κλίνης και εμβολικής ροής. Πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε διαφορετικά επίπεδα μετατροπής μεταβάλλοντας τον λόγο καταλύτη/ελαίου (C/O) και συγκεκριμένα διατηρώντας σταθερή την εισαγόμενη στον αντιδραστήρα τροφοδοσία (καθαρό VGO, καθαρό καστορέλαιο ή μίγματα VGO/καστορελαίου) στα 2g και μεταβάλλοντας τη χρησιμοποιούμενη μάζα καταλύτη. Η θερμοκρασία αντίδρασης ήταν 560°C, ενώ ο χρόνος αντίδρασης (χρόνος έγχυσης τροφοδοσίας) ήταν 12 s. Μετά την έγχυση της τροφοδοσίας ροή N_2 (30 cm^3/min) χρησιμοποιήθηκε για την έκπλυση της καταλυτικής κλίνης και την απομάκρυνση όποιων πιθανά φυσιοροφημένων υδρογονανθράκων. Το ρεύμα εξόδου του αντιδραστήρα οδηγείται σε ψυχόμενο (0°C) γυάλινο υποδοχέα ώστε να επιτευχθεί η συμπύκνωση των υγρών προϊόντων, ενώ η συλλογή των μη συμπυκνώσιμων αερίων γίνεται με τη μέθοδο μετατόπισης νερού. Τόσο τα υγρά όσο και τα αέρια προϊόντα αναλύονται μέσω αέριας χρωματογραφίας (GC). Πραγματοποιήθηκαν τουλάχιστον 5 δοκιμές σε διαφορετικούς λόγους καταλύτη/ελαίου (C/O) για κάθε συνδυασμό τροφοδοσιών. Οι αναλυτικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν για όλα τα πειράματα περιλαμβάνουν:

- SIMDIS για την ανάλυση των υγρών προϊόντων
- Μέτρηση υγρασίας στα υγρά προϊόντα
- PIONA για τη σύσταση της βενζίνης
- GC/MS για την ανάλυση των υγρών
- 2DGC-TOFMS για την ανάλυση των υγρών

Σε εργαστηριακή κλίμακα δοκιμάστηκαν οι ακόλουθες τροφοδοσίες:

- 100% VGO
- 100% καστορέλαιο
- 95% VGO + 5% καστορέλαιο
- 98% VGO + 2% καστορέλαιο

2.4. Εργαστηριακή μονάδα πιλοτικής κλίμακας

Η πιλοτική μονάδα FCC του ΙΔΕΠ (Εικόνα 3) είναι πλήρως αυτοματοποιημένη και περιλαμβάνει έναν αντιδραστήρα (long riser) 9 m, έναν απογυμνωτή, και έναν αναγεννητή ρευστοστερεάς κλίνης και λειτουργεί σε συνθήκες πλήρους ανακυκλοφορίας με συνεχή αναγέννηση του καταλύτη [6]. Στην παρούσα μελέτη δοκιμάστηκαν οι ακόλουθοι συνδυασμοί τροφοδοσιών σε πιλοτική κλίμακα:

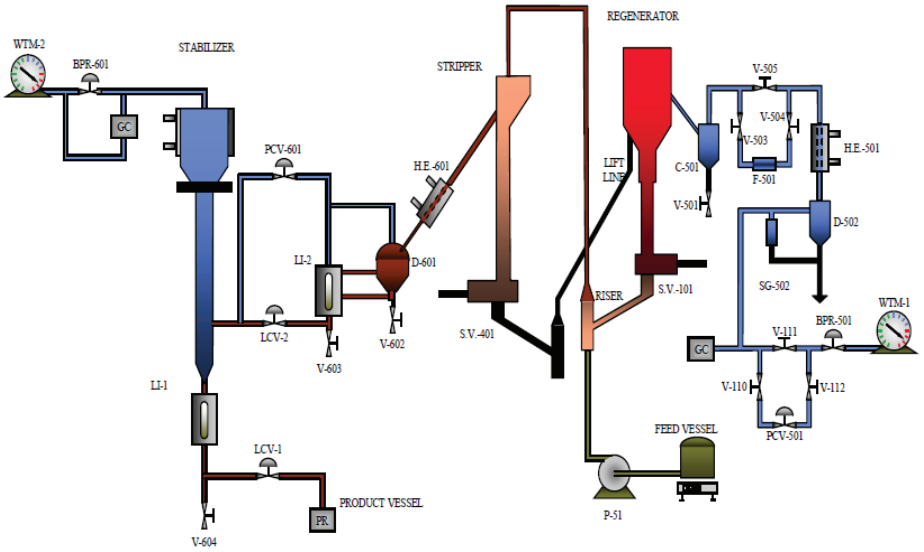
- 100% VGO
- 95% VGO + 5% καστορέλαιο,

με τις ακόλουθες πειραματικές συνθήκες:

- Θερμοκρασία πυρόλυσης: 400-600°C
- Θερμοκρασία Αναγέννησης: 720°C
- Ρυθμός τροφοδοσίας: 1-2 kg/hr
- Λόγος καταλύτη/ελαίου: 5 – 14
- Καταλύτης: 4 kg
- Πίεση: 2.5 bar

Για όλους τους συνδυασμούς τροφοδοσιών πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε διαφορετικά επίπεδα μετατροπών (διαφορετικούς λόγους C/O). Σε κάθε δοκιμή το περιεχόμενο στον καταλύτη κωκ (χρησιμοποιημένος και αναγεννημένος), τα απαέρια και τα αέρια προϊόντα πυρόλυσης και τα συνολικά υγρά προϊόντα μετρούνταν επιτόπου στη μονάδα. Από τα συνολικά υγρά προϊόντα, προσδιορίστηκαν οι αποδόσεις σε βενζίνη, LCO και HCO με χρήση μεθόδου GC προσομοίωσης-απόσταξης (simulation distillation method, SimDis, ASTM D2887). Τα παραγόμενα αέρια πυρόλυσης, τα απαέρια και τα υγρά προιόντα μετρούνταν με ακρίβεια με συνδυαστική χρήση συστήματος αέριων χρωματογράφων, wet test meters, και ζυγών ακριβείας. Η υδρογοναθρακική σύσταση της βενζίνης μετρήθηκε με την ανάλυση PIONA (ASTM D5134) (υδρογονανθρακική ανάλυση μέσω GC για τον καθορισμό της

ποσότητας παραφινών (paraffins, P), ισοπαραφινών (isoparaffins, I), ολεφινών (olefins, O) ναφθένιων (naphthenes, N) και αρωματικών (aromatics, A)), με χρήση αναλυτή GC/DHA.

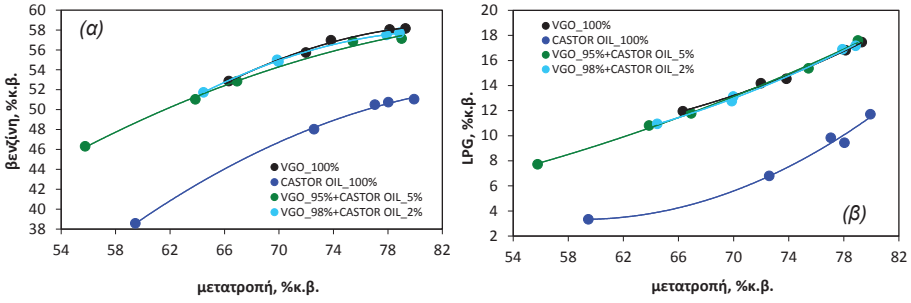


Εικόνα 3: Σχηματικό διάγραμμα πιλοτικής κλίμακας CFB μονάδας FCC στο ΙΔΕΠ.

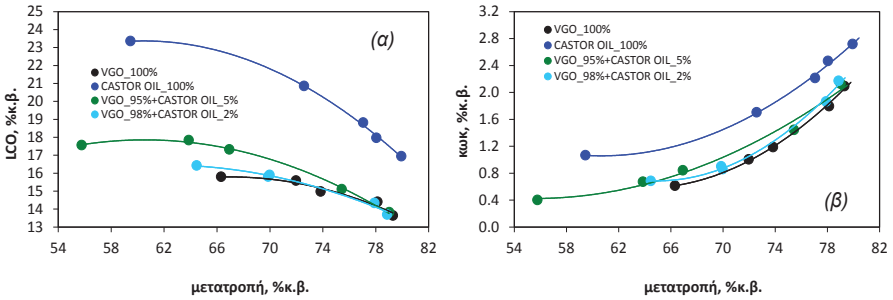
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Πειραματικά αποτελέσματα από την εργαστηριακής κλίμακας μονάδα SCT-MAT

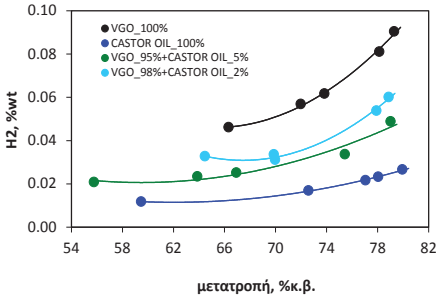
Τα πειραματικά αποτελέσματα από την συν-επεξεργασία διαφορετικών ποσοστών καστορελαίου (2 και 5% κ.β.) με συμβατική τροφοδοσία αεριελαίου VGO στην εργαστηριακή μονάδα SCT-MAT δείχνουν ότι η παρουσία καστορελαίου στην τροφοδοσία FCC μειώνει ελαφρώς τα επίπεδα βενζίνης και LPG ολεφινών (Εικόνα 4), ενώ αυξάνει τις αποδόσεις σε LCO και κωκ (Εικόνα 5). Επηρεάζεται και η απόδοση σε H_2, η οποία και μειώνεται όσο αυξάνεται η συγκέντρωση καστορελαίου στο μίγμα τροφοδοσίας (Εικόνα 6). Αξιοσημείωτο είναι ότι το καστορέλαιο πυρολύεται ακόμη και απουσία καταλύτη παράγοντας κυρίως επτανάλη και ενδεκανοικό οξύ, δυο προϊόντα ιδιαίτερης αξίας καθώς η επτανάλη αποτελεί το βασικό οξυγονούχο συστατικό της βενζίνης, ενώ το ενδεκανοικό οξύ αποτελεί το βασικό οξυγονούχο συστατικό του ντίζελ. Και οι δύο οξυγονούχες ενώσεις διασπώνται παρουσία καταλύτη FCC προς σχηματισμό κυρίως H_2O, CO και CO_2. Δεν ανιχνεύτηκαν οξυγονούχα συστατικά στα υγρά προϊόντα, όταν 5% ή 2% κ.β. καστορέλαιο πυρολύθηκε μαζί με VGO.



Εικόνα 4: Αποδόσεις (% κ.β.) σε (α) βενζίνη και (β) LPG ολεφινών συναρτήσει της μετατροπής



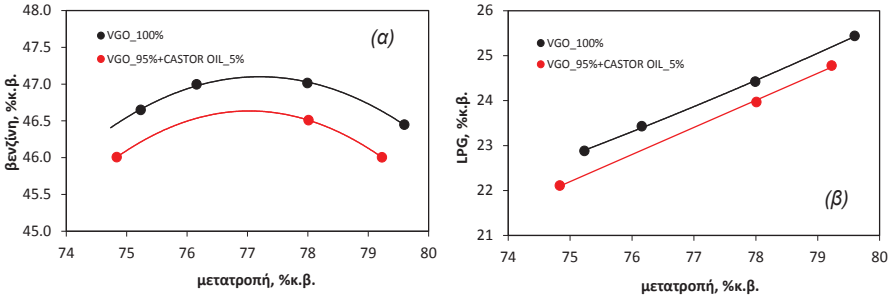
Εικόνα 5: Αποδόσεις (% κ.β.) σε (α) LCO και (β) κωκ συναρτήσει της μετατροπής



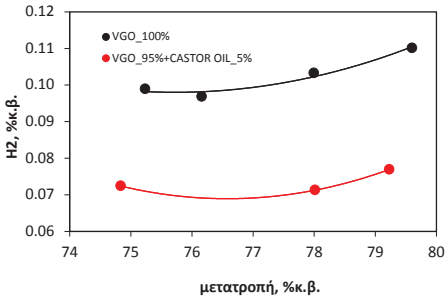
Εικόνα 6: Απόδοση (% κ.β.) σε H_2 συναρτήσει της μετατροπής

3.2. Πειραματικά αποτελέσματα από την πιλοτικής κλίμακας μονάδα FCC

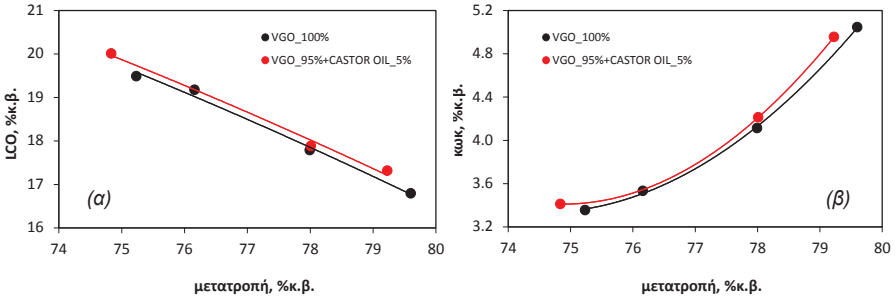
Τα πειραματικά αποτελέσματα από την συν-επεξεργασία 5% κ.β. καστορελαίου με συμβατική τροφοδοσία αεριελαίου VGO στην πιλοτική μονάδα FCC του ΙΔΕΠ δείχνουν ότι μπορεί να πραγματοποιηθεί εισαγωγή καστορελαίου στη μονάδα χωρίς δημιουργία λειτουργικών προβλημάτων τουλάχιστον έως του ποσοστού 5% κ.β. Η παρουσία του ωστόσο στην εισαγόμενη τροφοδοσία μειώνει τις αποδόσεις σε βενζίνη, LPG ολεφίνες (Εικόνα 7) και υδρογόνο (Εικόνα 8), ενώ αυξάνει ελαφρώς (Εικόνα 9) τις αποδόσεις σε LCO και κωκ (σε πλήρη συμφωνία με τα πειράματα εργαστηριακής κλίμακας). Το περιεχόμενο οξυγόνο οδηγείται στα σχηματιζόμενα H_2O, CO και CO_2, ωστόσο είναι πιθανή η παρουσία οξυγονούχων ενώσεων (σε επίπεδα ppm) στα υγρά προϊόντα (κυρίως καρβονυλικές ενώσεις), όπως φαίνεται στον Πίνακα 5 με τα αποτελέσματα της 2DGC-ToFMS ανάλυσης των υγρών προϊόντων.



Εικόνα 7: Αποδόσεις (% κ.β.) σε (α) βενζίνη και (β) LPG ολεφινών συναρτήσει της μετατροπής



Εικόνα 8: Απόδοση (% κ.β.) σε H_2 συναρτήσει της μετατροπής



Εικόνα 9: Αποδόσεις (% κ.β.) σε (α) LCO και (β) κωκ συναρτήσει της μετατροπής

Πίνακας 5: 2DGC-ToFMS ανάλυση των υγρών προϊόντων

Ομάδα Ενώσεων	*Περιεκτικότητα* (%)*
κ-παραφίνες	1.02
ι-παραφίνες	10.79
κ-ολεφίνες	2.79
ι-ολεφίνες	9.12
κορεσμένα ναφθένια	13.37
ακόρεστα ναφθένια	13.33
αρωματικές ενώσεις	41.75
οξυγονούχες ενώσεις	**0.36**
αζωτούχες	0.35
άγνωστες	7.05

**Ημιποσοτική ανάλυση. Οι τιμές αντιστοιχούν στην % συμμετοχή της κάθε ομάδας στο συνολικό εμβαδό των κορυφών του δείγματος.*

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μελέτη αυτή παρουσιάζει τα πειραματικά αποτελέσματα συν-επεξεργασίας καστορελαίου με συμβατική διυλιστηριακή τροφοδοσία αεριελαίου VGO στην διεργασία καταλυτικής πυρόλυσης, τόσο σε εργαστηριακή όσο και σε πιλοτική κλίμακα και εστιάζει στην επίδραση διαφορετικών ποσοστών καστορελαίου που προστίθενται στην τροφοδοσία (έως και 5%κ.β.) στις αποδόσεις των προϊόντων

FCC. Αρχικά πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε εργαστηριακής κλίμακας μονάδα καταλυτικής πυρόλυσης, ώστε να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες πυρόλυσης, καθώς και ο πιο αποδοτικός καταλύτης ανάμεσα σε διάφορα εμπορικά διαθέσιμα καταλυτικά υλικά. Έτσι χρησιμοποιήθηκε η διαθέσιμη στο ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ μονάδα SCT-MAT. Πρόσθετες πιλοτικής κλίμακας δοκιμές πυρόλυσης μιγμάτων καστορελαίου και VGO διεξήχθησαν στην πιλοτική μονάδα FCC του ΙΔΕΠ, η οποία και μπορεί να παράσχει μια πιο ρεαλιστική εκτίμηση της δυνατότητας συν-επεξεργασίας καστορελαίου σε ήδη υπάρχουσες διυλιστηριακές εγκαταστάσεις (μονάδες FCC).

Από τα αποτελέσματα στην εργαστηριακής κλίμακας μονάδα φαίνεται πως το καστορέλαιο μπορεί να πυρολυθεί ακόμη και απουσία καταλύτη προς παραγωγή επτανάλης (κύριο οξυγονούχο συστατικό στη βενζίνη) και ενδεκανοικού οξέως ((κύριο οξυγονούχο συστατικό στο ντίζελ). Ωστόσο, παρουσία συμβατικού καταλύτη FCC οι οξυγονούχες αυτές ενώσεις διασπώνται προς σχηματισμό κυρίως H_2O, CO και CO_2. Έτσι κατά τη διάρκεια των πειραμάτων καταλυτικής πυρόλυσης μιγμάτων 5 ή 2% καστορελαίου με VGO σε εργαστηριακή κλίμακα δεν ανιχνεύτηκαν οξυγονούχα στα υγρά προϊόντα.

Αντίστοιχα από τα αποτελέσματα στην πιλοτική μονάδα FCC φαίνεται πως το καστορέλαιο μπορεί να εισαχθεί στη διεργασία FCC τουλάχιστον έως το ποσοστό 5% κ.β. χωρίς τη δημιουργία λειτουργικών προβλημάτων. Και σε αυτήν την περίπτωση το περιεχόμενο οξυγόνο μετατρέπεται κυρίως σε H_2O, CO και CO_2, ωστόσο η ημι-ποσοτικής φύσεως αναλυτική μέθοδος 2DGC-ToFMS δείχνει την πιθανή παρουσία κάποιων οξυγονούχων ενώσεων (0.36%) στα υγρά προϊόντα. Έτσι ανιχνεύτηκαν περίπου 50 οξυγονούχες ενώσεις, κυρίως καρβονυλικές, που αναμένεται να αντιστοιχούν σε πολύ χαμηλές κ.β. συγκεντρώσεις.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα και από τις δύο μονάδες φαίνεται ότι η συν-επεξεργασία καστορελαίου με VGO οδηγεί σε μείωση των αποδόσεων σε βενζίνη, LPG ολεφίνες και υδρογόνο, ενώ αυξάνει τις αποδόσεις σε LCO και κωκ τόσο σε εργαστηριακή όσο και σε πιλοτική κλίμακα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα έχει συγχρηματοδοτηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας ΓΓΕΤ-ΕΥΔΕ-ΕΤΑΚ και του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) 2007-2013 / ΕΠΑΝ ΙΙ / Διακρατική συνεργασία Ελλάδας Ισραήλ 2013-2015 (κωδικός έργου GSRT ISR_3176).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Panchal, T.M., Patel, A., Chauhan, D.D., Thomas, M., Patel, J.V., 2017, “A methodological review on bio-lubricants from vegetable oil based resources”, Renewable and Sustainable Energy Reviews 70, pp. 65–70 ; Saboya, R.M.A., Cecilia, J.A., García-Sancho, C., Salesa, A.V., Tavares de Luna, F.M., Rodríguez-Castellón, E., Universidade, C.L.C., 2017 “Assessment of commercial resins in the biolubricants production from free fatty acids of castor oil”, Catalysis Today 279 pp. 274–285

[2] Patel, V.R., Dumancas, G.D., Kasi Viswanath, L.C., Randall Maples, Subong, B.J.J., 2016 “Castor Oil: Properties, Uses, and Optimization of Processing Parameters in Commercial Production”, Lipid Insights 9, pp.1-12

[3] Merkouropoulos, G., Kapazoglou, A., Drosou, V., Jacobs, E., Krolzig, A., Papadopoulos, C., Hilioti, Z., 2016 “Dwarf hybrids of the bioenergy crop Ricinus communis suitable for mechanized harvesting reveal differences in morpho-physiological characteristics and seed metabolic profiles”, Euphytica, 210 (2) pp. 207-219.

[4] Kapazoglou, A., Drosou, V., Nitsos, C.K., Bossis, I., Tsaftaris, A., Triantafyllidis, K.S., Hilioti, Z., 2013 “Biofuels Get in the Fast Lane: Developments in Plant Feedstock Production and Processing”, Adv Crop Sci Tech, 1:4, pp.1-16.;

[5] Komvokis, V.G., Karakouliaa, S., Iliopoulou, E.F., Papapetrou, M.C., Vasalos, I.A , Lappas, A.A., Triantafyllidis, K.S., 2012, “Upgrading of Fischer-Tropsch synthesis bio-waxes via catalytic cracking: Effect of acidity, porosity and metal modification of zeolitic and mesoporous aluminosilicate catalysts”, Catalysis Today *196*, pp. 42–55.

[6] Lappas, A.A., Iatridis, D.K., Papapetrou, M.C., Kopalidou, E.P., Vasalos, I.A., 2015, “Feedstock and catalyst effects in fluid catalytic cracking - Comparative yields in bench scale and pilot plant reactors”, Chemical Engineering Journal, 278, pp.140-149

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΛΥΚΕΡΟΛΗΣ, ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Γ.Ι. Σιακαβέλας[1,2], Κ. Παπαγερίδης[1], Σ. Σταύρου[1], Π.Ι. Σιακαβέλας[3], Ν.Δ. Χαρισίου[1], Μ.Α. Γούλα[1,2]*

[1]Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος και Μηχανικών Αντιρρύπανσης, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Μακεδονίας, Κοίλα, Κοζάνη, 50100, Ελλάδα
email: mgoula@teiwm.gr
[2]Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
[3]Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, 45110, Ιωάννινα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

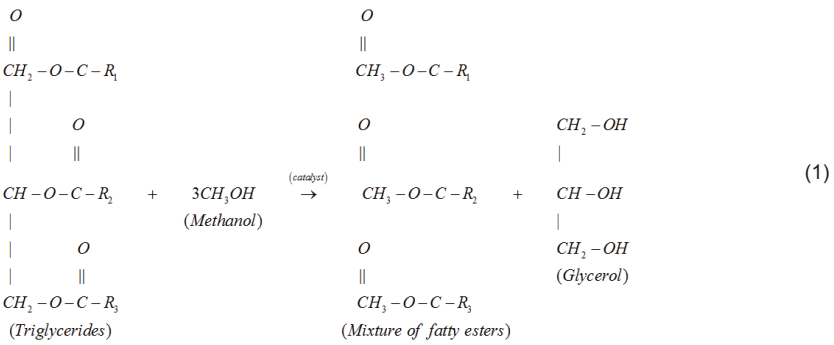
Η διαρκώς αυξανόμενη παραγωγή του βιοντίζελ κατά την διάρκεια των τελευταίων χρόνων έφερε στο προσκήνιο την ανάγκη της ενεργειακής αξιοποίησης της γλυκερόλης η οποία αποτελεί το κύριο παραπροϊόν της αντίδρασης της μετεστεροποίησης. Σαν αποτέλεσμα, η εύρεση νέων εναλλακτικών εφικτών χρήσεων για τη γλυκερόλη θεωρείται επιτακτική, καθώς τέτοιου είδους τεχνολογίες δεν θα δώσουν μόνο λύση σε περιβαλλοντικά προβλήματα, που σχετίζονται με την διάθεση της αλλά θα αυξήσουν σημαντικά και την παγκόσμια ζήτησή της. Η γλυκερόλη εκτός από τις πολύ ιδιαίτερες και σημαντικές φυσικές και χημικές ιδιότητες μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας, μέσω καταλυτικών διεργασιών παράγεται υδρογόνου και αερίου σύνθεσης. Το παραγόμενο υδρογόνο μπορεί να διοχετευτεί σε κελιά καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρική ενέργειας και το αέριο σύνθεσης να χρησιμοποιηθεί σε διεργασίες Fischer-Tropsch.

Λέξεις Κλειδιά: Παραγωγή υδρογόνου, Γλυκερόλη, Βιοντίζελ, Ατμο-αναμόρφωση

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενέργεια που παράγεται από τα ορυκτά καύσιμα υπήρξε η κινητήρια δύναμη που ώθησε την κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη του πλανήτη. Ωστόσο, τις τελευταίες δεκαετίες, ο περιορισμένος χαρακτήρας αυτών των πόρων, ζητήματα της προσβασιμότητας και της οικονομικής προσιτότητας, η εμφάνιση της Κίνας και της Ινδίας ως σημαντικών ενεργειακών καταναλωτών, καθώς επίσης και οι πιθανές επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος του πλανήτη, έχουν δώσει νέα ώθηση στην αναζήτηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Μεταξύ των διαφορετικών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι και η βιομάζα που ως πιθανός φορέας παροχής ενέργειας συγκεντρώνει ενδιαφέρον, κυρίως στον τομέα των βιοκαυσίμων. Ως αποτέλεσμα, η παγκόσμια παραγωγή βιοκαυσίμων έχει αυξηθεί ραγδαία την τελευταία δεκαετία, αλλά η επέκταση της βιομηχανίας έχει προκαλέσει σημαντικά ζητήματα. Ειδικότερα, η βιωσιμότητα πολλών βιοκαυσίμων πρώτης γενιάς (που παράγονται κυρίως από καλλιέργειες τροφίμων, όπως δημητριακά, ζαχαροκάλαμο και φυτικά έλαια), ολοένα και περισσότερο τίθενται υπό αμφισβήτηση λόγω ανησυχιών από την αντικατάσταση των καλλιεργειών τροφίμων, καθώς και από επιπτώσεις στο περιβάλλον και τη κλιματική αλλαγή [1].

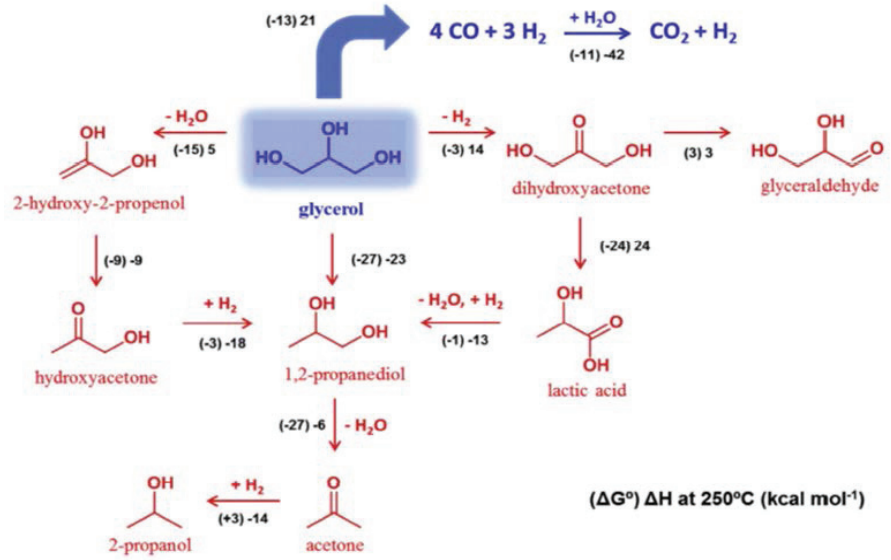
Στην Εικ. 1 παρουσιάζεται η διεργασία παραγωγής του βιοντίζελ [2]. Το βιοντίζελ είναι μη τοξικό, βιοδιασπώμενο και έχει ελάχιστες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ή αιωρούμενων σωματιδίων, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας σε συμβατικούς κινητήρες πετρελαίου. Σήμερα, παράγεται μέσω της αντίδρασης μετεστεροποίησης φυτικών ελαίων ή και ζωικού λίπους, κυρίως από μεθανόλη με την παρουσία όξινου ή αλκαλικού καταλύτη. Ένα από τα προβλήματα που παρουσιάζονται για την ανάπτυξη και την περεταίρω εμπορευματοποίηση του βιοντίζελ είναι το κόστος παραγωγή που οφείλεται στην τιμή των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται. Έτσι οι βιομηχανίες που εντάσσονται στη συγκεκριμένη διεργασία θα πρέπει να βρουν τρόπους για την μείωση της τιμής της πρώτης ύλης (π.χ., χρησιμοποιώντας μαγειρικά έλαια) ή και με την χρήση των υφιστάμενων παραγόμενων αποβλήτων [3,4].



(1)

Εικόνα 1. Διεργασία μετεστεροποίσης.

Το κύριο παραπροϊόν της βιομηχανίας βιοντίζελ είναι η γλυκερόλη καθώς για κάθε 100 g ελαίου κατά το στάδιο της μετεστεροποίησης παράγονται 10 g γλυκερόλης [5]. Η παραγόμενη γλυκερόλη είναι ακατέργαστη, δηλαδή περιέχει ποσότητες λιπών, ελεύθερων λιπαρών οξέων, μεθανόλης, εστέρων και αλάτων που δεν αντέδρασαν κατά την διάρκεια της αντίδρασης. Έτσι δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας στην φαρμακευτική βιομηχανία αλλά και σε βιομηχανίες καλλυντικών. Μια από τις λύσεις που προτείνεται για την χρησιμοποίηση της ακατέργαστης γλυκερόλης είναι η μετατροπή της για την παραγωγή διαφόρων χημικών ουσιών ή την παραγωγή του αερίου σύνθεσης (H_2/CO). Όμως, η αναμόρφωση της γλυκερόλης με ατμό οδηγεί σε πολύπλοκες αντιδράσεις με ενδιάμεσα προϊόντα που επηρεάζουν αρνητικά την απόδοση της διεργασίας ως προς το υδρογόνο. Επιπλέον, η σημαντικότερη δυσκολία που παρουσιάζει η διεργασία είναι ο σχηματισμός άνθρακα (κωκ) που οδηγεί στην απενεργοποίηση του καταλύτη. Ο σχηματισμός του υδρογόνου αλλά και οι πολύπλοκές αντιδράσεις με την παραγωγή των ενδιάμεσων προϊόντων παρουσιάζονται στην Εικ.2.



Εικόνα 2. Διεργασία ατμό – αναμόρφωσης της γλυκερόλης [4].

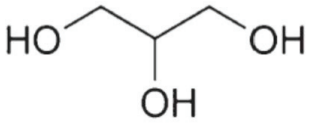
Για την συγκεκριμένη διεργασία έχουν χρησιμοποιηθεί και αναπτυχθεί καταλύτες νικελίου, παλλαδίου, λευκοχρύσου, ρουθηνίου, ροδίου και ιριδίου. Στις μελέτες που έχουν λάβει χώρα οι καταλύτες νικελίου εμφανίζουν καλή δραστικότητα και σαν φορέας χρησιμοποιείται η αλουμίνα λόγο της μηχανικής και χημικής αντοχής που έχει κατά την διάρκεια την διεργασίας της ατμό - αναμόρφωσης. Όμως, παρατηρείται μικρή σταθερότητα ως προς την διάρκεια της αντίδρασης και η χρήση προωθητών στην επιφάνεια της αλουμίνας ευνοεί την απορρόφηση του νερού και την κινητικότητα των δεσμών O-H στην επιφάνεια της με κύριο στόχο την ελαχιστοποίηση του σχηματισμού του κωκ [5,6].

2. ΓΛΥΚΕΡΟΛΗ

2.1. Ιδιότητες και εφαρμογές

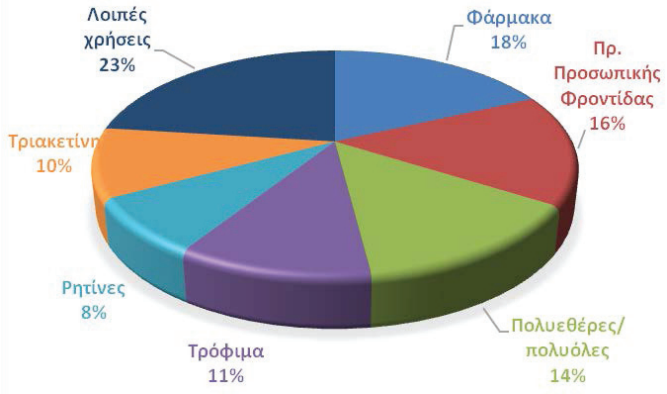
Η γλυκερίνη ανακαλύφθηκε από το Σουηδό χημικό Carl Wihelm Scheele το 1779 κατά την διάρκεια της επεξεργασίας φυτικών ελαίων με αλκαλικά υλικά. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία η επίσημη ονομασία είναι γλυκερόλη. Στις μέρες μας η γλυκερόλη στην βιομηχανία παρασκευάζεται κάνοντας χρήση λιπών, ελαίων ως ακατέργαστο υποπροϊόν σε τέσσερεις διαφορετικές διαδικασίες: (i) Στη σαπωνοποίηση, (ii) Στην παραγωγή λιπαρών οξέων, όπου με υδρόλυση παράγονται τα λιπαρά οξέα και η γλυκερόλη, (iii) Στη μετεστεροποίηση, όπου με μεθανόλη παράγονται το βιοντίζελ και η γλυκερόλη και (iv) στη μικροβιακή ζύμωση.

Η γλυκερόλη είναι μια αλκοόλη με τρείς υδροξυλομάδες και σε κανονικές συνθήκες είναι ένα άχρωμο, άοσμο υγρό με γλυκιά γεύση και παράγεται από φυσικές και πετροχημικές πρώτες ύλες. Η ακατέργαστη γλυκερόλη είναι σε ποσοστό 70 – 80 % καθαρή, έπειτα αφού συλλεχτεί καθαρίζεται σε ποσοστό μέχρι και 99 % και χρησιμοποιείται στον τομέα της φαρμακοβιομηχανίας, των τροφίμων και των καλλυντικών. Έχει την ιδιότητα να παρέχει εστέρες, τα λεγόμενα γλυκερίδια, εκ των οποίων τα σημαντικότερα είναι τα λιπίδια που σχηματίζονται με τα λιπαρά οξέα. Το ενεργειακό περιεχόμενο της γλυκερόλης και η ενεργειακή της πυκνότητα είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη των συμβατικών καυσίμων. 1 kg γλυκερόλη περιέχει μόλις 19 MJ χημικής ενέργειας, συγκριτικά με τη βενζίνη που περιέχει 44.4 MJ. Επιπρόσθετα, η γλυκερόλη είναι ένα πολύ ιξώδες υγρό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, με κινηματικό ιξώδες της τάξης των 450 centistokes. Τα παραπάνω καθιστούν την καύση της πολύ δυσκολότερη σε σχέση με την καύση των συμβατικών καυσίμων. Σε κανονική θερμοκρασία, έχει σημείο τήξης 18 ^{o}C και σημείο ζέσεως τους 290 ^{o}C, όπου και παρατηρείται ταυτόχρονη αποσύνθεση.



Εικόνα 3. Δομή της γλυκερόλης.

Είναι μια τρισθενής αλκοόλη η οποία υπό την επίδραση ήπιων οξειδωτικών μετατρέπεται σε γλυκερόζη ενώ υπό την επίδραση ισχυρών οξειδωτικών μετατρέπεται σε γλυκερινικό οξύ. Η γλυκερόλη χρησιμοποιείται για την παραγωγή νιτρογλυκερίνης η οποία είναι απαραίτητο συστατικό των προωθητικών μέσων, της πυρίτιδας και εκρηκτικών υλικών. Η περαιτέρω χημική τροποποίηση της σχετίζεται με την εκλεκτική εστεροποίηση με λιπαρά οξέα για την παραγωγή εστέρων γλυκερόλης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως γαλακτωματοποιητές ή μη ιοντικά επιφανειοδραστικά – απορρυπαντικά. Ακόμα, η γλυκερόλη είναι ένα δραστικό μόριο το οποίο συμμετέχει σε πολλές αντιδράσεις, είτε καταλυτικές, είτε ενζυμικές και θερμοχημικές και λαμβάνουν χώρα κάτω από συνθήκες που διαφοροποιούνται όσον αφορά την πίεση και την θερμοκρασία [7]. Στην Εικ. 4 παρουσιάζονται οι βασικότερες εφαρμογές της γλυκερόλης.



Εικόνα 4. Εφαρμογές της γλυκερόλης.

2.2. Η γλυκερόλη ως παραπροϊόν της διεργασίας του βιοντίζελ

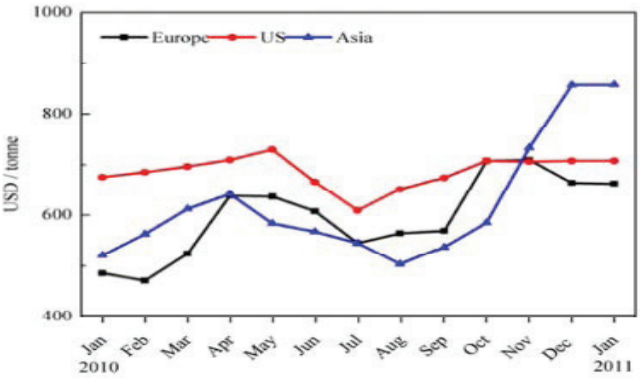
Η γλυκερόλη είναι το κύριο παραπροϊόν της διεργασίας της μετεστεροποίησης, δηλαδή της παραγωγής του βιοντίζελ. Τα παραγόμενα τριγλυκερίδια μετατρέπονται σε λιπαρά οξέα ή σε εστέρες λιπαρών οξέων μέσω υδρόλυσης ή αλκοολύλυσης. Δηλαδή, αντί για νερό χρησιμοποιούνται και αλκοόλες, οπότε προκύπτουν εστέρες λιπαρών οξέων, η απλούστερη αλκοόλη που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είναι η μεθανόλη. Ο διαχωρισμός της γλυκερόλης από το μείγμα λαμβάνει χώρα με την βαρύτητα, καθώς έχει υψηλότερο ιξώδες και είναι αδιάλυτη στους εστέρες που αποτελούν τον κύριο όγκο του υπόλοιπου μείγματος, ενώ το βιοντίζελ παραμένει στην επιφάνεια. Ο διαχωρισμός των φάσεων ξεκινά στα πρώτα 10 λεπτά και μπορεί να ολοκληρωθεί μετά από 2 ώρες. Ο πλήρης διαχωρισμός των φάσεων μπορεί να γίνει μετά από 18 ώρες. Τέλος γίνεται προσθήκη νερού σε ποσότητα 5 % του όγκου του ελαίου και αναδεύεται για 5 λεπτά. Έπειτα αφήνεται να διαχωριστεί ξανά. Όταν τελειώσει ο διαχωρισμός, η γλυκερόλη στραγγίζεται και απομένει το στρώμα του εστέρα το οποίο με τη σειρά του καθαρίζεται από το περίσσευμα της μεθανόλης και τις ακαθαρσίες που περιέχει και αποτελεί το τελικό προϊόν του βιοντίζελ.

Όμως, η γλυκερόλη που διαχωρίζεται έχει καθαρότητα 50 % και περιέχει σάπωνες, μεθανόλη, αλκοόλες, άλατα, βαρέα μέταλλα, νερό και μεγάλες ποσότητες καταλύτη. Σε αυτή τη μορφή πρακτικά δεν έχει καμία αξία και πρέπει να επεξεργαστεί, καθώς η μεθανόλη που περιέχεται την καθιστά επικίνδυνο μείγμα. Τα άλατα δημιουργούν μεγάλες ποσότητες στάχτης, ενώ το νερό μειώνει τη θερμαντική της αξία. Για τον καθαρισμό της, αρχικά, οι σάπωνες αντιδρούν με οξέα για να διασπαστούν σε ελεύθερα λιπαρά οξέα και σε άλατα. Τα μεν λιπαρά οξέα είναι αδιάλυτα στη γλυκερίνη

και επιπλέουν, οπότε απομακρύνονται από την επιφάνεια, ενώ η μεγαλύτερη ποσότητα των αλάτων παραμένει στο μίγμα. Στη συνέχεια, το μίγμα εξουδετερώνεται με προσθήκη καυστικού νατρίου (NaOH). Ακολούθως, η περίσσεια της μεθανόλης απομακρύνεται με εξάτμιση ή με έκπλυση όπου η γλυκερόλη αποκτά 80 – 85 % καθαρότητα. Περαιτέρω επεξεργασία, δίνει γλυκερόλη καθαρότητας 99.5 – 99.7 %, δηλαδή σχεδόν καθαρή γλυκερόλη.

2.3. Η αγορά την γλυκερόλης

Η αγορά της γλυκερόλης κρίνεται ως ασταθής και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το κόστος του πετρελαίου, της παραγωγής του βιοντίζελ και από την παγκόσμια προσφορά και ζήτηση [9,11]. Στην Εικ. 5 παρουσιάζονται οι μεταβολές στις τιμές τις γλυκερόλης μεταξύ του 2010 – 2011.



Εικόνα 5. Τιμή της γλυκερόλης μεταξύ του 2010 και 2011 [11].

Λαμβάνοντας υπόψη την αγορά της Ασίας, η τιμή αυξήθηκε από 520 STA 640 US$ ανά τόνο κατά το πρώτο τρίμηνο του έτους, και στη συνέχεια έφτασε στα 503 US$ ανά τόνο τον Αύγουστο. Στις αρχές του 2011, η τιμή της γλυκερόλης έχει φτάσει στα 858 US$ ανά τόνο, σχεδόν διπλάσια σε σύγκριση με την τιμή της στα μέσα του 2010 και το 2012 η τιμή έφτασε περίπου στα 838 – 948 US$ ανά τόνο [11]. Η τωρινή μικρή αγορά της γλυκερόλης δυσκολεύεται να προβλέψει την τιμή που θα έχει στο μέλλον λόγο της έλλειψης των αξιόπιστων οικονομικών αναλύσεων των εφαρμογών της.

2.4. Αξιοποίηση της γλυκερόλης

Το 2006 συνολικά στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε) παρήχθησαν 680 εκατ. Kg ακατέργαστης γλυκερόλης και 50 εκατ. Kg παρήχθησαν στις ΗΠΑ. Η παράγωγη μιας τέτοιας μεγάλης παραγωγής ακατέργαστης γλυκερόλης συνοδεύεται με περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις. Στατιστικά, μέχρι το 2011, 254 μονάδες βιοντήζελ λειτουργούσαν στην Ευρώπη, με ετήσια παραγωγική δυναμικότητα 22.12 Kt βιοντήζελ και συν-παραγωγή 2.2 Kt ακατέργαστης γλυκερίνης [12]. Στην Ε.Ε τα κράτη έχουν θεσπίσει στόχους για το 2020 και πέρα, όσον αφορά, το μερίδιο ενέργειας που θα καλύπτεται από τις ΑΠΕ είναι υποχρεωτικό το ελάχιστο ποσοστό 10 % που θα πρέπει να επιτευχθεί από όλα τα κράτη. Φαίνεται ότι η ενεργειακή αξιοποίηση του παραπροϊόντος της γλυκερόλης δημιουργεί νέες ευκαιρίες στις βιομηχανίες βιοντίζελ στην Ε.Ε ώστε να αυξηθεί η απόδοση των βιοκαυσίμων και συγκεκριμένα, των παραπροϊόντων τους. Έχει ήδη αναφερθεί η χημική και βιοχημική μετατροπή της γλυκερόλης σε άλλα χρήσιμα προϊόντα, όπως, υδρογόνο, 1,3-προπανοδιόλη, 1,2-προπανοδιόλη, διυδροξυακετόνη, πολυγλυκερόλες και πολυεστέρες [13]. Η προπυλενογλυκόλη είναι ένα πολύτιμο προϊόν που έχει παραχθεί από γλυκερόλη μέσω θερμοχημικής μετατροπής. Ο Perosa και οι συνεργάτες του έχουν αναφέρει ότι παρουσία καταλυτών νικελίου, η γλυκερόλη μπορεί να μετατραπεί εκλεκτικά σε προπυλενογλυκόλη, έπειτα από θέρμανση σε θερμοκρασία μεταξύ 150 ^{o}C και 210 ^{o}C επί 20 ώρες κάτω από 10 atm υδρογόνου [14]. Υδατικά διαλύματα γλυκερόλης έχουν επίσης μετατραπεί σε διυδροξυακετόνη μέσω χημικής οξείδωσης παρουσία καταλυτών λευκόχρυσου εμποτισμένα με βισμούθιο. Η εκλεκτικότητα τους κυμαινόταν από 50 % έως 80 %, με μετατροπές μέχρι και 100 %.

Όμως εκτός από την παραγωγή διαφόρων οργανικών ενώσεων, η γλυκερόλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την παραγωγή υδρογόνου, το οποίο θα εισάγετε σε κελιά καυσίμου μεγάλης κλίμακας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή του υδρογόνου ή καλύτερα η παραγωγή του αερίου σύνθεσης (υδρογόνου / μονοξειδίου του άνθρακα) είναι μια πολλά υποσχόμενη διεργασία για την ενεργειακή αξιοποίηση της γλυκερόλης. Το υδρογόνο έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιείται ευρέως σε συστήματα ισχύος όπως οι κυψέλες καυσίμου. Επειδή τα ορυκτά καύσιμα παραμένουν η κύρια πηγή υδρογόνου όπως το μεθάνιο και η νάφθα, η γλυκερόλη μέσω την μετατροπής της σε υδρογόνο μπορεί να θεωρηθεί ως ανανεώσιμη και εναλλακτική λύση για την παραγωγή ενέργειας. Ακόμα, η διαδικασία στην οποία το υδρογόνο μπορεί να παράγεται από απόβλητα και υπολείμματα (π.χ., της γλυκερόλης) θεωρείται μια οικονομικά βιώσιμη προσέγγιση για τη λειτουργία ενός βιο-δυιλιστηρίου [15]. Στην περίπτωση του αερίου σύνθεσης είναι ένα βασικό αέριο που χρησιμοποιείται στην πετροχημική βιομηχανία και χρησιμοποιείται για την παρασκευή διαφόρων χημικών ουσιών. Για παράδειγμα η σύνθεση της αμμωνίας και των υδρογονανθράκων γίνεται μέσω της διεργασίας Fischer-Tropsch [11]. Από το 2009 έχει ξεκινήσει ήδη η σύνθεση της μεθανόλης από καθαρισμένη ακατέργαστη γλυκερόλη μέσω του αερίου σύνθεσης. Επιπρόσθετα, μέσω της μετατροπής της γλυκερόλης σε υδρογόνο ή αέριο σύνθεσης η κατάλυση αντιπροσωπεύει μια κρίσιμη προσέγγιση στην πράσινη χημεία για την αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου της γλυκερόλης.

2.5. Καταλυτικές διεργασίες αξιοποίησης της γλυκερόλης

Η αντίδραση όσον αφορά την χημεία της αλλά και η μελέτη της θερμοδυναμικής είναι τα κύρια βήματα που οδηγούν τις ερευνητικές ομάδες και τους μηχανικούς στον δρόμο της ανάπτυξης νέων καινοτόμων καταλυτικών συστημάτων προς την βελτίωση των χημικών διεργασιών. Η αντίδραση της αναμόρφωση της γλυκερόλης με ατμό είναι η πιο κοινή μέθοδος μετατροπή της γλυκερόλης σε αέριο σύνθεσης. Υπάρχουν και άλλες όμως διεργασίες όπως η πυρόλυση (pyrolysis), η αναμόρφωση μερικής οξείδωσης (partial oxidation reforming), η αυτόθερμη αναμόρφωση (autothermal reforming), η αναμόρφωση με ατμό ενισχυμένη με ρόφηση CO_2. η αναμόρφωση της γλυκερόλης με χρήση αντιδραστήρα πλάσματος και η αναμόρφωση σε υδατική φάση.

2.6. Αναμόρφωση της γλυκερόλης με ατμό

Η παρούσα διεργασία είναι η πιο κοινή μέθοδος της μετατροπής της γλυκερόλης σε υδρογόνο και σε αέριο σύνθεσης. Αποτελεί συνδυασμό της πυρόλυσης της γλυκερόλης (Εξ. 2) και την αντίδρασης μετατόπισης ύδατος (Εξ. 3).

Εκτός όμως από την μετατροπή της γλυκερόλης μέσω της διάσπασής της, λαμβάνουν χώρα και άλλες παράπλευρες αντιδράσεις όπως η αντίδραση της μεθανοποίησης (methanation), η αντίστροφη αντίδραση μετατόπισης ύδατος, αντιδράσεις σχηματισμού κωκ και διάφορες ακόμα παράπλευρες αντιδράσεις (Εξ. 2-11) [16,17]. Τα τελευταία χρόνια, έχει πραγματοποιηθεί εκτεταμένη έρευνα όσον αφορά την αντίδραση της ατμό – αναμόρφωσης της γλυκερόλης στην ετερογενή κατάλυσης με σκοπό την παραγωγή του αερίου σύνθεσης και του υδρογόνου.

$C_3H_8O_3 + 3H_2O \rightarrow 3CO_2 + 7H_2$	(Ατμο-αναμόρφωση της γλυκερόλης)	(2)
$C_3H_8O_3 \rightarrow 3CO + 4H_2$	(Διάσπαση της γλυκερόλης)	(3)
$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	(Αντίδραση μετατόπισης ύδατος)	(4)
$CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	(Αντίδραση μεθανιοποίησης)	(5)
$2CO \leftrightarrow CO_2 + C$	(Αντίδραση Boudouard)	(6)
$CH_4 + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 4H_2$	(Ατμο-αναμόρφωση του μεθανίου)	(7)
$CH_4 + CO_2 \leftrightarrow 2H_2 + 2CO$	(Ξηρή αναμόρφωση του μεθανίου)	(8)
$CH_4 \leftrightarrow 2H_2 + C$	(Διάσπαση του μεθανίου)	(9)
$C + 2H_2O \leftrightarrow 2H_2 + CO_2$	(Αεριοποίηση του άνθρακα)	(10)

$CO + H_2 \leftrightarrow H_2O + C$ (Σχηματισμός άνθρακα) (11)

$C_3H_8O_3 + 5H_2 \leftrightarrow 3CH_4 + 3H_2O$ (Μεθανιοποίηση γλυκερόλης) (12)

$C_3H_8O_3 \rightarrow H_2 + 3H_2O + 3C$ (Αποσύνθεση γλυκερόλης) (13)

Οι καταλύτες του νικελίου, του λευκοχρύσου, του κοβαλτίου και του ρουθινίου είναι αυτοί που έχουν μελετηθεί περισσότερο. Έχουν μελετηθεί σε μικρότερο βάθος οι καταλύτες του ροδίου, του ιριδίου και του παλλαδίου. Κύριος στόχος είναι η εύρεση και ο σχεδιασμός ενός φθηνού οξειδοαναγωγικού καταλύτη με υψηλή αγωγιμότητα και υψηλή κινητικότητα σε οξυγόνο [18].

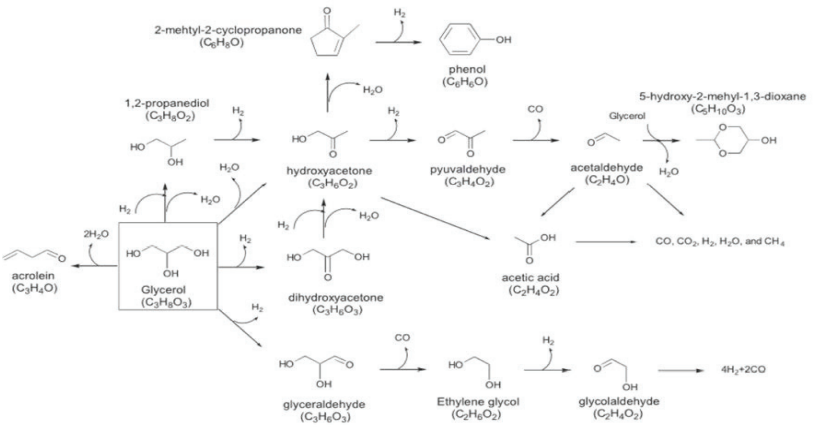
Οι καταλύτες νικελίου τα τελευταία χρόνια έχουν μελετηθεί στην αντίδραση της ατμό – αναμόρφωσης της γλυκερόλης, λόγο του μεγάλου πλεονεκτήματος που παρουσιάζουν. Το κύριο μέταλλο, το νικέλιο της ενεργού φάσης έχει αρκετά χαμηλότερη τιμή σε σχέση με τα ευγενή μέταλλα. Επιπρόσθετα, στο δεύτερο κομμάτι του καταλύτη, στο υπόστρωμα, έχει βρεθεί ότι η χρήση διαφορετικών υποστρωμάτων οδηγεί σε διαφορετικές καταλυτικές αντιδράσεις [19]. Αυτό συμβαίνει, λόγο των διαφορετικών ενδιάμεσων προϊόντων και παράγονται στην επιφάνεια του φορέα του καταλύτη. Ο Papageridis και οι συνεργάτες του έδειξαν ότι ο καταλύτης Ni/Al παρουσίασε βελτιωμένη ικανότητα μετατροπής της γλυκερόλης σε αέρια προϊόντα σε σύγκριση με τους καταλύτες Co/Al και Cu/Al, πιθανώς λόγω της ικανότητας του να προωθεί τη διάσπαση του δεσμού C-C [1]. Η Goula και οι συνεργάτες της παρασκεύασαν καταλύτη Ni/Al με διαφορετικές μεθόδους, και παρατήρησαν ότι ο καταλύτης που είχε παρασκευαστεί με υγρό εμποτισμό παρουσίασε καλύτερα αποτελέσματα ως προς την παραγωγή υδρογόνου σε χαμηλές θερμοκρασίες αντίδρασης (400-600 ^oC). Επίσης παρατηρήθηκε ότι η μέθοδος παρασκευής επηρέασε τις φυσικοχημικές ιδιότητες των καταλυτών καθώς και την αντοχή τους στην εναπόθεση άνθρακα [17]. Ακόμα, ο Charisiou και οι συνεργάτες του έδειξαν ότι τροποποίηση του υποστρώματος του καταλύτη Ni/Al με οξείδιο του λανθανίου (La_2O_3) είχε ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της καταλυτικής δραστικότητας, της παραγωγής υδρογόνου και της σταθερότητςα του καταλύτη μετά από παραμονή 20 ωρών στο αέριο ρεύμα της αντίδρασης [16]. Ο Adhikari και οι συνεργάτες του σύγκριναν καταλύτες νικελίου με διαφορετικά υποστρώματα, όπως MgO, CeO_2 και TiO_2, ως προς την απόδοση της διεργασία της ατμο – αναμόρφωσης στους 600 ^oC και με αναλογία $H_2O/C_3H_8O_3$ ίση με 9/1 [20]. Διαπίστωσαν ότι οι καταλύτες με υπόστρωμα CeO_2 παρουσιάζουν αρκετά υψηλή εκλεκτικότητα ως προς H_2 καθώς επίσης και χαμηλότερη εναπόθεση κωκ σε σχέση με τα υπόλοιπα υποστρώματα (CeO_2 (70%) > MgO (40%) > TiO_2 (15%)). Αυτό οφείλεται στο ότι το οξείδιο του δημητρίου δημιουργεί μια καλύτερη αλληλεπίδραση με την ενεργό φάση του νικελίου, η οποία οδηγεί σε αρκετά υψηλή διασπορά της ενεργού φάσης και κατά συνέπεια σε υψηλή ειδική επιφάνεια. Ο Pant και οι συνεργάτες του παρατήρησαν ότι η παρουσία του οξειδίου του δημητρίου επηρεάζει την αναγωγή των ειδών Ni^{2+}, ενισχύοντας έτσι τη δραστικότητα του καταλύτη [21]. Αρκετές μελέτες πρότειναν ότι η διπλή κατάσταση οξείδωσης (+4/+3) που εμφανίζει το οξείδιο του δημητρίου οδηγεί στην απελευθέρωση οξυγόνου με αποτέλεσμα να αντιδρά με τον άνθρακα που εναποτίθεται, μειώνοντας έτσι το σχηματισμό κωκ [22,23,24]. Επιπλέον, ο καταλύτης Ni/CeO_2 είναι ικανός να ενισχύσει τις αντιδράσεις αναμόρφωσης του μεθανίου και της μετατόπισης ύδατος μέσω της ατμο-αναμόρφωσης της γλυκερόλης και να εμφανίσει υψηλή εκλεκτικότητα H_2 [25,26]. Επίσης, έχει αναφερθεί ότι η απόδοση σε H_2 εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη φύση της ενεργού φάσης καθώς και από την αλληλεπίδρασή της με το οξείδιο του δημητρίου [26,27]. Για τον σχηματισμό του άνθρακα στον Ni/TiO_2 υπεύθυνος είναι ο όξινος χαρακτήρας του TiO_2, με αποτέλεσμα τη χειρότερη απόδοση στην αντίδραση της αναμόρφωσης της γλυκερόλης [18]. Ο Nichele και οι συνεργάτες του παρουσίασαν ότι ο Ni/TiO_2 έχει αρκετά χαμηλή δραστικότητα στη διάσπαση του δεσμού C-C, ακόμη και σε υψηλές θερμοκρασίες, και ότι η συμβολή της αντίδρασης είναι ακόμη μικρότερη [28]. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο ανατάσης, όπου τα ιόντα Ni αφού οξειδωθούν συσσωματώνονται και στη συνέχεια ανάγονται υπό ροή H_2, είναι σταθερός σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και η ασθενής αλληλεπίδραση με το Ni δεν είναι αρκετή ώστε να αποφευχθεί η εκ νέου οξείδωση της ενεργούς φάσης σε συνθήκες αναμόρφωσης με ατμό.

2.7. Μηχανισμός της αντίδρασης

Ελάχιστες είναι οι μελέτες μηχανισμού στην αντίδραση της ατμο – αναμόρφωσης της γλυκερόλης, παρόλο που αρκετές μελέτες είναι διαθέσιμες στην συγκεκριμένη αντίδραση. Ο Valliyappan και οι συνεργάτες του, μελέτησαν την αναμόρφωση της γλυκερόλης με ατμό παρουσία καταλύτη Ni/Al_2O_3, και πρότειναν ότι τα μόρια γλυκερόλης και νερού προσροφούνται σε θέσεις Ni και Al, αντίστοιχα [29]. Η Nichio και οι συνεργάτες της μελέτησαν την ίδια αντίδραση και πρότειναν ένα σχήμα αντιδράσεων,

το οποίο θα περιλαμβάνει δυο παράλληλες οδούς αντίδρασης (pathways) [30]. Η πρώτη οδός περιλαμβάνει την αφυδάτωση της γλυκερόλης και την αφυδρογόνωση της στην εξωτερική της επιφάνεια, ενώ η άλλη ξεκινά μόνο με την αντίδραση της αφυδρογόνωσης. Τα παραγόμενα ενδιάμεσα όπως η υδροξυ – ακετόνη και η ακεταλδεύδη μετατρέπονται διαμέσου μιας σειράς αντιδράσεων αφυδρογόνωσης, υδρολύσεως και μετατόπισης ύδατος. Ακόμα, ο εναποτιθέμενος άνθρακας στην επιφάνεια του καταλύτη εξαρτάται από τη συμπύκνωση ουσιών υψηλού μοριακού βάρους. Σε μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί [31,32], έχει φανεί ότι η γλυκερόλη και ο ατμός αποσυνδέονται με προσρόφηση σε στηριζόμενους καταλύτες νικελίου και η μηχανιστική μελέτη τους συσχετίστηκε με τη κινητική φόρμουλα των Langmuire Hinshelwood. Η δυσκολία που έχει παρατηρηθεί στον μηχανισμό της αντίδρασης είναι ότι τα παραγόμενα ενδιάμεσα της αντίδρασης είναι πάρα πολύ ενεργά και έχουν την δυνατότητα να μετατραπούν άμεσα σε σταθερά προϊόντα όπως το μεθάνιο, το διοξείδιο και το μονοξείδιο του άνθρακα. Ένας τρόπος να γίνει κατανοητός ο μηχανισμός είναι μέσω in - situ μέτρησης των ενδιαμέσων στην καταλυτική επιφάνεια κατά την διάρκεια της αντίδρασης.

Ένα σύστημα χαρακτηρισμού το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αποτελείται από FTIR, Raman, και UV φασματοσκοπία στην επιφάνεια του καταλύτη, αλλά και αέρια χρωματογραφία (GC) και φασματοσκοπία μάζας (MS). Έχει την δυνατότητα να παρέχει σε βάθος κατανόηση για την φύση των επιφανειακών και bulk ιδιοτήτων των καταλυτικών συστημάτων στην αντίδραση της ατμό - αναμόρφωσης της γλυκερόλης. Η παραγωγή υδρογόνου από γλυκερόλη απαιτεί σχάση του δεσμού C-C, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Άλλες διεργασίες, όπως η αφυδάτωση και η αφυδρογόνωση, παράγουν ένα μεγάλο αριθμό προϊόντων. Η κινητική της αντίδρασης ατμό - αναμόρφωσης της γλυκερόλης μελετήθηκε παρουσία καταλυτών λευκοχρύσου και καταλυτών λευκοχρύσου – ρηνίου. Η ενέργεια ενεργοποίησης έχει υπολογιστεί ίση με 60 – 90 kJ/mol για Pt και Pt–Re καταλύτες και η τάξη της αντίδρασης περίπου 0.2 ως προς γλυκερόλη. Σε άλλη μελέτη, η ενέργεια ενεργοποίησης και η τάξη της αντίδρασης υπολογίστηκαν ίση με 103.4 kJ/mol και 0.233, αντίστοιχα για στηριζόμενο καταλύτη Ni/CeO_2 [33]. Στην Εικ. 6 παρουσιάζεται ένας προτεινόμενος μηχανισμός για την αντίδραση της αναμόρφωσης της γλυκερόλης.



Εικόνα 6. Μηχανισμός της αντίδρασης ατμο – αναμόρφωσης της γλυκερόλης [11].

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε βιβλιογραφικά η αντίδραση της ατμο – αναμόρφωσης της γλυκερόλης. Παρουσιάστηκαν μερικά από τα στοιχεία και αποτελέσματα που έχουν βρεθεί από την αξιοποίηση της γλυκερόλης σαν παραπροϊόν της διεργασίας παραγωγής του βιοντίζελ. Σημαντικά προβλήματα ως προς την επεξεργασία της γλυκερόλης είναι ότι κατά την διάρκεια της παραγωγής της είναι ακάθαρτη σε μεγάλο βαθμό και η διαδικασία καθαρισμού της είναι αρκετά δαπανηρή. Όποτε ένα μέρος των μελετών έχει στραφεί στην βελτιστοποίηση της διαδικασίας καθαρισμού της παράλληλα με τη μείωση του κόστους. Αφού καθαριστεί, έχει την δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας και εφόσον παράγεται από το βιοντίζελ, μπορεί και αναφέρεται ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Η παραγωγή ενέργειας λαμβάνει χώρα με την αναμόρφωση της και την παραγωγή

υδρογόνου μέσω καταλυτικών διεργασιών. Στο συγκεκριμένο κομμάτι της αξιοποίησης της γλυκερόλης μεγάλο μέρος των ερευνητικών ομάδων έχει στρέψει το ενδιαφέρον του (α) στη βελτιστοποίηση των καταλυτικών συστημάτων έτσι ώστε να είναι εκλεκτικά ως προς τα επιθυμητά προϊόντα και (β) στη βελτιστοποίηση της αντοχής ως προς την εναπόθεση του άνθρακα που οδηγεί στη απενεργοποίηση των καταλυτών μειώνοντας παράλληλα την εκλεκτικότητα τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Papageridis, K.N., Siakavelas, G., Charisiou, N.D., Avraam, D.G., Tzounis, L., Kousi, K., and Goula M.A., 2016, “Comparative study of Ni, Co, Cu supported on γ-alumina catalysts for hydrogen production via the glycerol steam reforming reaction,” Fuel Process. Technol., 152, pp. 156-175.
2. Chavalparit, O., and Ongwandee, M., 2009, “Optimizing electrocoagulation process for the treatment of biodiesel wastewater using response surface methodology,” J. Environ. Sci., 21(11), pp.1491-1496.
3. Charisiou, N.D., Siakavelas, G., Papageridis, K.N., and Goula, M.A, “Effect of La_2O_3 αddition on Ni/Al_2O_3 catalysts to produce H_2 from glycerol,’’ Industrial Waste & Wastewater Treatment &Valorization, Athens, Greece, 2015.
4. Bobadilla, L.F., Penkova, A., Romero-Sarria, F., Centeno, M.A., and Odriozola, J.A., 2014, “Influence of the acid-base properties over $NiSn/MgO-Al_2O_3$ catalysts in the hydrogen production from glycerol steam reforming,’’ Int. J. Hydrogen Energ., 39, pp. 5704-5712.
5. Charisiou, N.D., Papageridis, K.N., Siakavelas, G., Tzounis, L., Kousi, K., Baker, M.A., Hinder, S.J., Sebastian, V., Polychronopoulou, K., and Goula, M.A., 2017, "Glycerol Steam Reforming for Hydrogen Production over Nickel Supported on Alumina, Zirconia and Silica Catalysts,” Top. Catal., 60(15-16), pp. 1226-1250.
6. Goula, M.A., Charisiou, N.D., Pandis, P.K., and Stathopoulos, V.N., 2016, “A Ni/apatite-type lanthanum silicate supported catalyst in glycerol steam reforming reaction,’’ RSC Advances 6 (82) pp. 78954-78958.
7. Tan, H.W., Abdul Aziz, A.R., and Aroua, M.K., 2013, “Glycerol production and its applications as a raw material: A review,’’ Renew. Sust. Energ. Rev., 27, pp. 118-127.
8. Pagliaro, M., and Rossi,M., 2008, “The Future of Glycerol: New Uses of a Versatile Raw Material,” RSC Green Chemistry Book Series.
9. Quispe, C.A.G., Coronado, C.J.R., and Carvalho, J.A.Jr., 2013, “Glycerol: Production, consumption, prices, characterization and new trends in combustion,’’ Renew. Sust. Energ. Rev., 27, pp. 475-493.
10. McCoy, M., 2005, “An unlikely impact”, Chem. Eng. News., 83, pp. 19-20.
11. Lin, Y-C., 2013, “Catalytic valorization of glycerol to hydrogen and syngas, review”, Int. J. Hydrogen Energ., 38(6), pp. 2678-2700.
12. Czernik, S., French, R., Feik, C., and Chornet, C., Proc. 2000 DOE hydrogen program review, USA, 2000.
13. Almeida, J.R.M., Fávaro, L.C.L., and Quirino, B.F., 2012, “Biodiesel biorefinery: Opportunities and challenges for microbial production of fuels and chemicals from glycerol waste,” Biotechnol. Biofuels, 5, 48.
14. Perosa, A., and Tundo, P., 2005, “Selective Hydrogenolysis of Glycerol with Raney Nickel,” Ind. Eng. Chem. Res., 44(23), pp. 8535-8537.
15. Czernik, S., French, R., Feik, C., and Chornet, E., 2002, “Hydrogen production by catalytic steam reforming of liquid byproducts from biomass thermoconversion processes,” Ind. Eng. Chem. Res., 41(17), pp. 4209-4215.

16. Charisiou, N.D., Siakavelas, G., Papageridis, K.N., Baklavaridis, A., Tzounis, L., Polychronopoulou, K., and Goula, M.A., 2017, “Hydrogen production via the glycerol steam reforming reaction over nickel supported on alumina and lanthana-alumina catalysts,” Int. J. Hydrogen Energ., 42(18), pp. 13039-13060.

17. Goula, M.A., Charisiou, N.D., Papageridis, K.N., and Siakavelas, G., 2016, “Hydrogen via the glycerol steam reforming reaction: Influence of the synthesis method for Ni/Al_2O_3 catalysts,” Chinese J. Catal., 37(11), pp. 1949-1965.

18. Silva, J.M., Soria, M.A., and Madeira, L.M., 2015, “Challenges and strategies for optimization of glycerol steam reforming process,” Renew. Sust. Energ. Rev., 42, pp. 1187-1213.

19. Charisiou, N.D., Papageridis, K.N., Siakavelas, G., Tzounis, L., and Goula M.A., 2016, “Effect of active metal supported on SiO_2 for selective hydrogen production from the glycerol steam reforming reaction,” BioResources., 11(4), pp. 10173-10189.

20. Adhikari, S., Fernando, S.D., To, S.D.F., Bricka, R.M., Steele, P.H., and Haryanto, A., 2008, “Conversion of glycerol to hydrogen via a steam reforming process over nickel catalysts,’’ Energ. Fuel., 22, pp. 1220-1226.

21. Pant, K.K., Jain, R., and Jain, S., 2011, “Renewable hydrogen production by steam reforming of glycerol over Ni/CeO2 catalyst prepared by precipitation deposition method,’’ Korean J. Chem. Eng., 28, pp. 1859-1866.

22. Byrd, A.J., Pant, K.K., and Gupta, R.B., 2008, “Hydrogen production from glycerol by reforming in supercritical water over Ru/Al_2O_3 catalyst,’’ Fuel, 87(13-14), pp. 2956-2960.

23. Iriondo, A., Barrio, V.L., Cambra, J.F., Arias, P.L., Guemez, M.B., and Sanchez-Sanchez, M.C., 2010, “Glycerol steam reforming over Ni catalysts supported on ceria and ceriapromoted alumina,’’ Int. J. Hydrogen Energ., 35(20), pp. 11622-11633.

24. Franchini, C.A., Aranzaez, W., Duarte de Farias, A.M., Pecchi, G., and Fraga, M.A., 2014, “Cesubstituted $LaNiO_3$ mixed oxides as catalyst precursors for glycerol steam reforming,” Appl. Catal. B-Environ., 147, pp. 193-202.

25. Adhikari, S., Fernando, S., and Haryanto, A., 2007, “Production of hydrogen by steam reforming of glycerin over alumina-supported metal catalysts,’’ Catal. Today, 129(3-4), pp. 355-364.

26. Matas Guell, B., Babich, I., Nichols, K.P., Gardeniers, J.G.E., Lefferts, L., and Seshan, K., 2009, “Design of a stable steam reforming catalyst – a promising route to sustain – able hydrogen from biomass oxygenates,’’ Appl. Catal. B-Environ., 90(1-2), pp. 38-44.

27. Slinn, M., Kendall, K., Mallon, C., and Andrews, J., 2008, “Steam reforming of biodiesel byproductto make renewable hydrogen,’’ Bioresource Technol., 99(13), pp. 5851-5858.

28. Nichele, V., Signoretto, M., Menegazzo, F., Gallo, A., DalSanto, V., and Cruciani, G., 2012, “Glycerol steam reforming for hydrogen production: design of Ni supported catalysts,’’ Appl. Catal. B-Environ., 111-112, pp. 225-232.

29. Valliyappan, T., Ferdous, D., Bakhshi, N.N., and Dalai, A.K., 2008, “Production of hydrogen and syngas via steam gasification of glycerol in a fixed-bed reactor,” Top. Catal., 49(1-2), pp. 59-67.

30. Pompeo, F., Santori, G.F., and Nichio, N.N., 2011, “Hydrogen production by glycerol steam reforming with Pt/SiO_2 and Ni/SiO_2 catalysts,’’ Catal. Today, 172(1), pp. 183-188.

31. Cheng, C.K., Foo, S.Y., and Adesina, A.A., 2010, “Glycerol steam reforming over bimetallic Co-Ni/Al_2O_3,’’ Ind. Eng. Chem. Res., 49(21), pp. 10804-10817.

32. Cheng, C.K., Foo, S.Y., and Adesina, A.A., 2011, “Steam reforming of glycerol over Ni/Al_2O_3 catalyst,” Catal. Today, 178(1), pp. 25-33,

33. Adhikari, S., Fernando, S.D., and Haryanto, A., 2009, “Hydrogen production from glycerol: an update,” Energ. Convers. Manage., 50(10), pp. 2600-2604.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΜΙΚΡΟΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΥΣΗΣ

Α. Χατζηπασχάλη*, Α. Σταμάτης, Ν. Ανδρίτσος

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας,
383 34 Βόλος
e-mail: asixp@hotmail.com, nandrits@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη της απόδοσης ενός υβριδικού συστήματος αναερόβιας χώνευσης για την επεξεργασία του τυρόγαλου με έναν εμπορικά διαθέσιμο μικροστρόβιλο με απώτερο στόχο την παραγωγή της μέγιστης δυνατής ηλεκτρικής ισχύος. Οι αντιστρεπτότητες και οι θερμοδυναμικοί περιορισμοί αξιολογούνται με την εξέταση της εξεργειακής απόδοσης και τον υπολογισμό της ποσότητας της εξέργειας που καταστρέφεται και της απόδοσης κάθε τμήματος του συστήματος συμπαραγωγής. Το υβριδικό σύστημα αποδεικνύεται ότι έχει εξεργειακή απόδοση περίπου 36%, απόδοση που είναι αισθητά υψηλότερη από αυτή που επιτυγχάνεται μόνο με το σύστημα αναερόβιας χώνευσης. Η οικονομική ανάλυση του υβριδικού συστήματος με βάση την καθαρή παρούσα αξία δείχνει ότι το σύστημα που προτείνεται αποτελεί μία ελκυστική πρόταση με σημαντική εξοικονόμηση πόρων. Τέλος, από την αξιολόγηση των κυριότερων παραμέτρων προκύπτει ότι η εξεργειακή απόδοση επηρεάζεται σημαντικά από την ισεντροπική απόδοση του στροβίλου, ενώ σημαντική είναι η επίδραση της θερμοκρασίας των αερίων στην έξοδο του στροβίλου πάνω στην καθαρή παρούσα αξία.

Λέξεις Κλειδιά: *τυρόγαλο, εξεργειακή ανάλυση, οικονομική ανάλυση, μονάδα βιοαερίου*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε όλες σχεδόν τις χώρες του κόσμου τα απόβλητα από πολλές αγροτοβιομηχανικές δραστηριότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάλλιστα για την παραγωγή βιοαερίου. Μεταξύ των αποβλήτων από τις γαλακτοκομικές και τις τυροκομικές μονάδες, το τυρόγαλο αντιπροσωπεύει ένα από τα πλέον «δύσκολα» απόβλητα, λόγω του υψηλού οργανικού φορτίου (π.χ. εκφρασμένου ως COD) [1,2]. Λόγω του υψηλού αυτού φορτίου η αναερόβια χώνευση (AD) αποτελεί ίσως την καταλληλότερη μέθοδο όχι μόνο για την απομάκρυνση του μεγαλύτερου μέρους του COD, αλλά και για τη μερική κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της μονάδας [3]. Εκτιμάται ότι από ένα λίτρο τυρογάλακτος μπορούν να παραχθούν 20 L μεθανίου (~700 Btu) [4]. Αν και στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα άρθρων που πραγματεύονται τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη διεργασία, λίγες είναι σχετικά οι εργασίες που ασχολούνται με τη συμπαραγωγή (π.χ. [5,6]).

Η παρούσα εργασία εξετάζει την απόδοση ενός υβριδικού συστήματος αναερόβιας χώνευσης για την επεξεργασία του τυρόγαλακτος (CW AD) με έναν εμπορικά διαθέσιμο μικροστρόβιλο με απώτερο στόχο την επίτευξη της μέγιστης δυνατής ηλεκτρικής ισχύος. Η μοντελοποίηση της διεργασίας γίνεται με το λογισμικό EES. Η εξεργειακή και η οικονομική ανάλυση χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της απόδοσης του συστήματος με βάση υπάρχοντα δεδομένα από βιομηχανική εφαρμογή.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

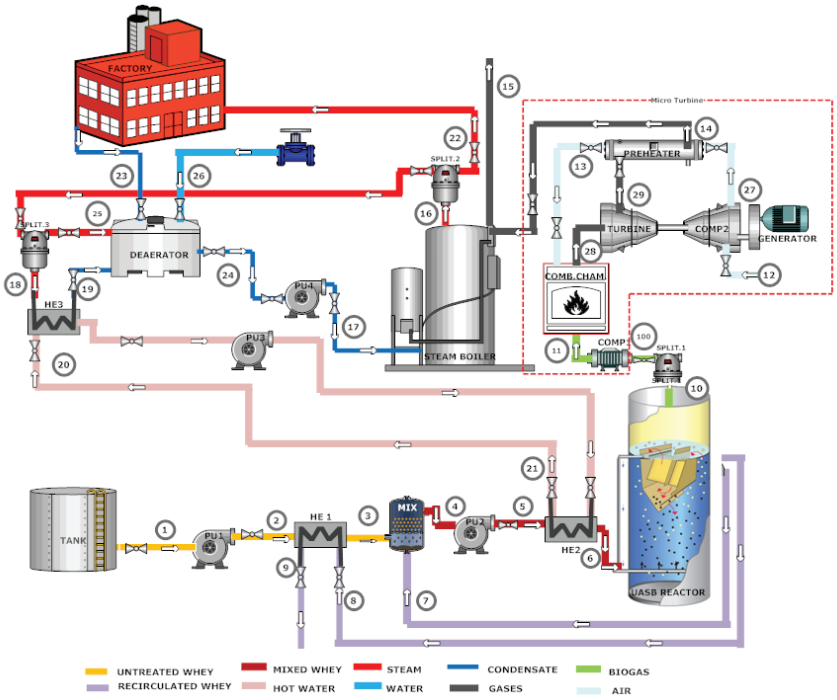
Ένα μοντέλο προσομοίωσης ενός συστήματος συμπαραγωγής του συστήματος επεξεργασίας CW AD και ενός μικροστροβίλου έχει αναπτυχθεί από τους συγγραφείς σε μια προηγούμενη εργασία [6]. Η διαφορά της προηγούμενης εργασίας από την παρούσα έγκειται στο γεγονός ότι μόνο ένα μέρος του παραγόμενου βιοαερίου αξιοποιήθηκε για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, αφού στόχος ήταν να καλυφθούν κυρίως οι θερμικές ανάγκες της μονάδας. Η αναερόβια μονάδα έχει σχεδιαστεί για την επεξεργασία 150 m^3 τυρογάλακτος ανά ημέρα, το οποίο αποτελεί προϊόν της διεργασίας μεμβρανών υπερδιήθησης (UF). Η εισαγωγή των μεμβρανών UF στη διαδικασία παρασκευής τυριών οφείλεται στην ανάγκη ελαχιστοποίησης του κόστους παραγωγής. Το διήθημα (τυρόγαλα) αποτελείται κυρίως από νερό κατά 95% και λακτόζη ($C_{12}H_{22}O_{11}$) κατά 5%, ενώ η περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες είναι μικρότερη από το 0,1% [7]. Το COD του τυρογάλακτος μετρήθηκε ίσο με περίπου 60.000 mg/L. Τα κατά προσέγγιση χαρακτηριστικά του τυρογάλακτος παρατίθενται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1: Σύνθεση και χαρακτηριστικά του ορού γάλακτος

Συστατικό	Ποσοστό (%)
Νερό	94-95
Πρωτεΐνες	0.8-1.0
Λακτόζη	4.5-5.0
Λίπος	<0.1
Μεταλλικά άλατα	<0.1
pH	4.5-5

Το τυρόγαλα συλλέγεται σε συνθήκες περιβάλλοντος σε δεξαμενή από ανοξείδωτο χάλυβα 125 m^3, η οποία χρησιμεύει και ως δεξαμενή εξισορρόπησης. Κατόπιν οδηγείται στον αντιδραστήρα με τη χρήση φυγοκεντρικής αντλίας με σταθερή ροή 6,25 m^3/hr. Το μη επεξεργασμένο τυρόγαλα θερμαίνεται στον πρώτο εναλλάκτη θερμότητας από το επεξεργασμένο τυρόγαλα που εξέρχεται από τον αντιδραστήρα και στη συνέχεια αναμιγνύεται με ανακυκλωμένο τυρόγαλα που λαμβάνεται από την κορυφή του αντιδραστήρα. Επειδή το ανακυκλωμένο τυρόγαλα λαμβάνεται πολύ κοντά στην έξοδο του επεξεργασμένου τυρόγαλου, μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει τα ίδια χαρακτηριστικά με αυτό. Το μεικτό αυτό ρεύμα οδηγείται στη συνέχεια στον αντιδραστήρα αφού διέλθει πρώτα από έναν δεύτερο εναλλάκτη θερμότητας στον οποίο θερμαίνεται στην επιθυμητή θερμοκρασία 35 °C. Ο τύπος του αντιδραστήρα σε αυτό το σύστημα είναι τύπου αναερόβιου στρώματος ιλύος ανοδικής ροής (upflow anaerobic sludge blanket reactor, UASB). Η επιλογή βασίστηκε στο γεγονός ότι ο UASB είναι ένας αντιδραστήρας στον επιτυγχάνονται υψηλές αποδόσεις απομάκρυνσης οργανικών με αρκετά μικρό

χρόνο παραμονής (hydraulic retention time, HRT) των αποβλήτων στον αντιδραστήρα όπως έχει περιγραφεί στην εργασία [8]. Η θέρμανση στον δεύτερο αντιδραστήρα επιτυγχάνεται με τη χρήση ζεστού νερού το οποίο με τη σειρά του παράγεται με τη χρήση ατμού που προκύπτει από την καύση του βιοαερίου. Το βιοαέριο που παράγεται στον αντιδραστήρα συλλέγεται από την κορυφή. Το βιοαέριο που παράγεται και συλλέγεται από την κορυφή του αντιδραστήρα οδηγείται κατευθείαν στον μικροστρόβιλο. Εξετάζεται επίσης η επιλογή του καταλληλότερου μικροστροβίλου μεταξύ των διαθέσιμων στο εμπόριο μικροστροβίλων. Τα κύρια τμήματα της όλης διεργασίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Διάγραμμα ροής του συστήματος που εξετάζεται.

Τα καυσαέρια που παράγονται από τον μικροστρόβιλο κατευθύνονται επίσης στον ατμολέβητα και στη συνέχεια διατίθενται στο περιβάλλον σε χαμηλή θερμοκρασία. Ο ατμός που παράγεται στον ατμολέβητα κατευθύνεται στη μονάδα για να καλύψει μέρος των θερμικών του αναγκών. Ένα μικρό μέρος του παραγόμενου ατμού χρησιμοποιείται για να θερμανθεί το συμπύκνωμα στον απαερωτήρα σε θερμοκρασία 102 °C. Λόγω των απωλειών που συμβαίνουν στη μονάδα, οι ποσότητες συμπυκνώματος που επιστρέφουν στον απαερωτήρα δεν είναι ίδιες με τις ποσότητες που διατίθενται στη μονάδα. Η υπόλοιπη απαιτούμενη ποσότητα καλύπτεται με προσθήκη φρέσκου νερού.

3. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Για τη μοντελοποίηση του συστήματος χρησιμοποιήθηκε ο εμπορικά διαθέσιμος προσομοιωτής διεργασιών EES, που διαθέτει πλούσια βάση δεδομένων και επιτρέπει την εκτίμηση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων που χρειάζονται. Στο μοντέλο, κάθε στοιχείο του συστήματος θεωρείται ως ένας ξεχωριστός όγκος ελέγχου και στον οποίο εφαρμόζονται η αρχή της διατήρησης της μάζας καθώς και ο πρώτος και ο δεύτερος νόμος της θερμοδυναμικής. Προκειμένου να απλοποιηθεί η ανάλυση του συστήματος έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές: λειτουργία σε μόνιμη κατάσταση, συνθήκες αναφοράς 1,013 bar και 25 °C, το μη επεξεργασμένο τυρόγαλα αποτελείται μόνο από νερό (95%) και

λακτόζη (5%), το βιοαέριο και τα προϊόντα καύσης είναι ιδανικά αέρια, οι αντιδράσεις καύσης είναι πλήρεις, οι μοναδικές απώλειες θερμότητας στο σύστημα προέρχονται από τον καυστήρα και τον θάλαμο καύσης, ο υπολογισμός των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων (ενθαλπία, εντροπία, πίεση κτλ.) σε κάθε κατάσταση πραγματοποιείται με εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για ασυμπίεστο υγρό και μείγματα ιδανικών αερίων. Ακολουθεί μία συνοπτική παρουσίαση των βασικών εξισώσεων που χρησιμοποιούνται.

Η αρχή της διατήρησης της μάζας είναι μια θεμελιώδης αρχή στην ανάλυση οποιωνδήποτε θερμοδυναμικών συστημάτων. Αυτή η αρχή ορίζεται για έναν όγκο ελέγχου, όπως δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\sum_{k}\dot{m}_{inlet}-\sum_{k}\dot{m}_{outlet}=\frac{dm_{cv}}{dt} \qquad (1)$$

όπου $\dot{m}$ είναι η μαζική παροχή και ο δείκτης cv δηλώνει τον όγκο ελέγχου.

Για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης το σύστημα μεταφοράς των ρευστών χρησιμοποιείται η σχέση των Colebrook – White για τον συντελεστή τριβής.

Σε κάθε εναλλάκτη θερμότητας εφαρμόζεται το ισοζύγιο θερμότητας (h είναι η ενθαλπία):

$$\dot{m}_{hot}\left(h_{hot,inlet}-h_{hot,outlet}\right)=\dot{m}_{cold}\left(h_{cold,outlet}-h_{cold,inlet}\right) \qquad (2)$$

Η θεωρητική ποσότητα του CH_4 που παράγεται στην AD μπορεί να υπολογιστεί υποθέτοντας ότι η απομάκρυνση του COD είναι η ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για την οξείδωση του CH_4 σε H_2O και CO_2 [9] και η ογκομετρική παροχή του μεθανίου δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{Q}_{CH_4}=\dot{Q}_{CW}\cdot COD_{content}\cdot COD_{content-efficiency}\cdot 0,4\frac{m^3\ CH_4}{g\ COD_{removed}} \qquad (3)$$

Το επεξεργασμένο τυρόγαλο εξέρχεται από τον αντιδραστήρα με COD 1200 mg/L, το οποίο αντιστοιχεί σε απόδοση απομάκρυνσης COD 98%. Η περιεκτικότητα σε CH_4 στο βιοαέριο θεωρείται ίση με 60% και το υπόλοιπο είναι CO_2. Έτσι, με γνωστές τις πυκνότητες του CH_4 και του CO_2 στην κατάσταση της εξόδου του αντιδραστήρα UASB, μπορεί να υπολογιστεί ο ρυθμός ροής μάζας του βιοαερίου.

Το TOC (ολικός οργανικός άνθρακα) του ρευματος εισόδου και του βιοαερίου μπορεί να υπολογιστεί από τις σχέσεις:

$$TOC_1=\frac{\dot{m}_1\cdot X_{s,1}}{MB_{s,1}}\times A_{r,c}\times\left(\text{Carbon Atoms in Lactose}\right) \qquad (4)$$

$$TOC_{10}=\frac{\dot{m}_{CH_4}}{M_{CH_4}}\times\left(\text{Carbon Atoms in } CH_4\right)+\frac{\dot{m}_{CO_2}}{M_{CO_2}}\times\left(\text{Carbon Atoms in } CO_2\right) \qquad (5)$$

όπου M είναι το μοριακό βάρος.

Από τις παραπάνω εξισώσεις, μπορεί να βρεθεί ότι $TOC_{biogas}/TOC_{CW,inlet}$ = 90%. Το υπόλοιπο TOC κατανέμεται στη βιομάζα (5%) και στο επεξεργασμένο ρεύμα (5%). Μια σχέση ανάμεσα στο TOC, της χημικής εξέργειας και της ελεύθερης ενέργειας της οργανικής ύλης στα λύματα παρουσιάζεται στον Tai et al. [10]. Η χημική εξέργεια και η ελεύθερη ενέργεια του επεξεργασμένου ρεύματος θα μειωθούν κατά 95% σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στο μη επεξεργασμένο τυρόγαλα. Θεωρείται ότι η μείωση της ελεύθερης ενέργειας του επεξεργασμένου ρεύματος κατά 95% αντιστοιχεί στη μείωση της ενθαλπίας (h) και της εντροπίας (S) του επεξεργασμένου ρεύματος κατά το ίδιο ποσοστό, 95%. Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν οι εξής σχέσεις:

$$\overline{h}_{s,8}=\overline{h}_{s,7}=0.05\overline{h}_{s,1} \qquad (6)$$

$$\overline{s}_{s,8}=\overline{s}_{s,7}=0.05\overline{s}_{s,1} \qquad (7)$$

Υποτίθεται επίσης ότι η αποσύνθεση της λακτόζης προσεγγίζεται από την αντίδραση:

$$C_{12}H_{22}O_{11}\rightarrow A\cdot CH_4+B\cdot CO_2+C_aH_bO_c \qquad (8)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το 5% του TOC θα φτάσει στο επεξεργασμένη ρεύμα και το 5% θα καταναλωθεί από βιομάζα, παίρνουμε την ακόλουθη εξίσωση:

$$2\dot{m}_{s,8}=\dot{m}_{s,1}-\dot{m}_{10} \qquad (9)$$

Η ισοεντροπική απόδοση του βιοαερίου ορίζεται ως εξής:

$$n_{scomp}=\frac{h_{outlet,\ isentropic}-h_{inlet}}{h_{outlet}-h_{inlet}} \qquad (10)$$

Οι μικροστρόβιλοι αποτελούνται από τέσσερα βασικά τμήματα, που είναι ο αεροσυμπιεστής, ο θάλαμος καύσης, ο αεριοστρόβιλος και ο προθερμαντήρας. Η μοντελοποίηση του μικροστροβίλου περιγράφεται στην εργασία [11].

3.1. Εξεργειακή ανάλυση

Η εξεργειακή ανάλυση, η οποία βασίζεται το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής, είναι σε θέση να ανιχνεύσει τη θέση, τον τύπο και το πραγματικό μέγεθος των απωλειών (ή της καταστροφής) της εξέργειας σε ένα θερμικό σύστημα. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η εξεργειακή ανάλυση προτιμάται σε σχέση με την ενεργειακή ανάλυση που χρησιμοποιείται για τα θερμικά συστήματα. Η συνολική εξέργεια ενός συστήματος αποτελείται από τη φυσική, τη χημική, την κινητική και τη δυναμική εξέργεια (π.χ. [12]). Στη παρούσα μελέτη οι δύο τελευταίες συνιστώσες της ολικής εξέργειας, η κινητική και η δυναμική, θεωρούνται αμελητέες, καθώς έχουμε ελάχιστες αλλαγές στο ύψος και στην ταχύτητα. Έτσι λαμβάνεται υπόψη μόνο η θερμική εξέργεια, η οποία είναι το άθροισμα της φυσικής και της χημικής εξέργειας. Η φυσική, η χημική και η ολική εξέργεια για κάθε κατάσταση του συστήματος έχουν υπολογίζονται από τις ακόλουθες εξισώσεις αντίστοιχα:

$$E^{PH}=\dot{m}[(\bar{h}-\bar{h}_0)+P_0(\bar{s}-\bar{s}_0)] \qquad (11)$$

$$E^{CH}=\dot{m}\sum x_k\cdot\bar{e}_k^{CH}+R\cdot T_0\cdot\sum x_k\cdot\ln\left(x_k\right) \qquad (12)$$

$$E=E^{PH}+E^{CH} \qquad (13)$$

όπου xk και $\bar{e}_k$ είναι το μαζικό κλάσμα και η ειδική ενθαλπία του συστατικού k.

Το ισοζύγιο εξέργειας σε μόνιμη κατάσταση και χωρίς να ληφθούν υπόψη οι απώλειες θερμότητας δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση ισοζυγίου:

$$\sum\dot{m}_{inlet}\cdot\bar{e}_{inlet}-\sum\dot{m}_{outlet}\cdot\bar{e}_{outlet}-\dot{E}_D-\dot{W}_{MGT}=0 \qquad (14)$$

όπου $\bar{e}_{inlet}$ και $\bar{e}_{outlet}$ είναι η ειδική εξέργεια του ρεύματος εισόδου και εξόδου στον όγκο ελέγχου και $\dot{E}_D$ είναι η καταστροφή της εξέργειας. Η εξεργειακή απόδοση δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_{system}=\frac{\dot{E}_{steam\,to\,factory}-\dot{E}_{condensate\,from\,factory}+\dot{W}_{total,\,net}}{E_{untreated\,CW}+E_{air,turb}+E_{air,burner}+E_{water}} \qquad (15)$$

3.2. Οικονομική ανάλυση

Η οικονομική ανάλυση βασίζεται στην Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV) της επένδυσης για την επέκταση του υφιστάμενου συστήματος με την ενσωμάτωση ενός μικροστροβίλου για τη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ). Χρησιμοποιεί τα δεδομένα απόδοσης για το εκτεταμένο σύστημα και τα προφίλ φορτίου για ζήτηση θερμότητας και ισχύος. Στην ανάλυση αυτή λαμβάνονται υπόψη το κόστος υφιστάμενου συστήματος (λεπτομέρειες στην εργασία [6]) και το κόστος του μικροστροβίλου [13].

Στη μελέτη αυτή θεωρήθηκε ότι τα έσοδα προέρχονται από την εξοικονόμηση φυσικού αερίου (που είναι το προτιμητέο καύσιμο σε μία βιομηχανία για την κάλυψη των θερμικών αναγκών και κυρίως του ατμού) και από την πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο εθνικό δίκτυο.

Στην ανάλυση λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθες παράμετροι και δαπάνες: (i) το σύστημα AD για τη επεξεργασία του τυρογάλακτος λειτουργεί από το 2009, (ii) η εγκατάσταση της μικροστροβίλου στο σύστημα AD έγινε 4 χρόνια αργότερα, το 2013, (iii) η λειτουργία της αναερόβιας επεξεργασίας είναι

6480 ώρες ετησίως, (iv) η παρούσα τιμή της πωλούμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο είναι 0,253 €/kWh και θεωρείται αμετάβλητη, (v) ο ετήσιος ρυθμός αύξησης κόστους αναλωσίμων είναι 3% και (vi) η συνολική ισχύς του εξοπλισμού είναι 21,55 kW και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι 0,08 €/kWh (το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται ότι αυξάνει ετησίως κατά 7%). Το κόστος συντήρησης συνίσταται σε: (i) κόστος συντήρησης αντλιών και συμπιεστών (4% του κόστους αγοράς), (ii) κόστος συντήρησης μετρήσεων, δειγματοληψίας και ηλεκτρονικών συσκευών, (iii) κόστος συντήρησης του υπόλοιπου εξοπλισμού (π.χ. αντιδραστήρας, λέβητας ατμού, απαερωτήρας κτλ.) και (iv) κόστος συντήρησης του μικροστροβίλου που αναφέρεται στις συσκευές του συστήματος, όπως ο στρόβιλος, ο συμπιεστής, ο προθερμαντήρας κτλ.

Η εισερχόμενη χρηματοροή που οφείλεται στην εξοικονόμηση φυσικού αερίου για το πρώτο έτος (2009) ανέρχεται σε περίπου 300.000 €. Το μέσο κόστος του φυσικού αερίου το 2009 ήταν 0,31879 €/m^3. Θεωρείται ότι η εταιρεία αγοράζει ηλεκτρική ενέργεια από το εθνικό δίκτυο για να καλύψει τις θερμικές της ανάγκες σε χαμηλότερη τιμή (0,08 €/kWh) και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μέσω του μικροστροβίλου πωλείται στο εθνικό δίκτυο σε υψηλότερη τιμή όπως έχει αναφερθεί (0.253 €/kWh). Τέλος, το προεξοφλητικό επιτόκιο θεωρείται ότι είναι 5%.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

4.1. Εξεργειακή ανάλυση

Αρχικά, η ανάλυση που περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα εφαρμόζεται στο σύστημα προκειμένου να επιλεγεί ο καταλληλότερος μικροστροβίλος με στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα. Η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από το βιοαέριο που παράγεται από το σύστημα εκτιμάται σε 350 kW. Έτσι, έχει επιλεγεί μικροστρόβιλος μονής ατράκτου Model MT 350 kW για να ενσωματωθεί στο σύστημα επεξεργασίας CW AD. Τα τεχνικά δεδομένα αυτού του μικροστροβίλου λαμβάνονται από την βιβλιογραφία [13]. Σχετικά με την άγνωστη τιμή της θερμοκρασίας του αέρα στην έξοδο του προθερμαντήρα και την επιλογή της βέλτιστης τιμής της έχει πραγματοποιηθεί παραμετρική ανάλυση (T13: από 700 έως 900 K).

Οι τιμές των άλλων παραμέτρων που έχουν ληφθεί υπόψη για τη μοντελοποίηση του συστήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Μέσω της παραμετρικής ανάλυσης έχει επιλεγεί ως καταλληλότερη τιμή της θερμοκρασίας του αέρα στην έξοδο του προθερμαντήρα είναι οι 800 K. Ακολούθως, το μοντέλο που αναπτύχθηκε επικυρώθηκε με τα δεδομένα που παρουσιάζονται από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία [23] και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 2: Παράμετροι λειτουργίας του μικροστροβίλου MT 350 kW

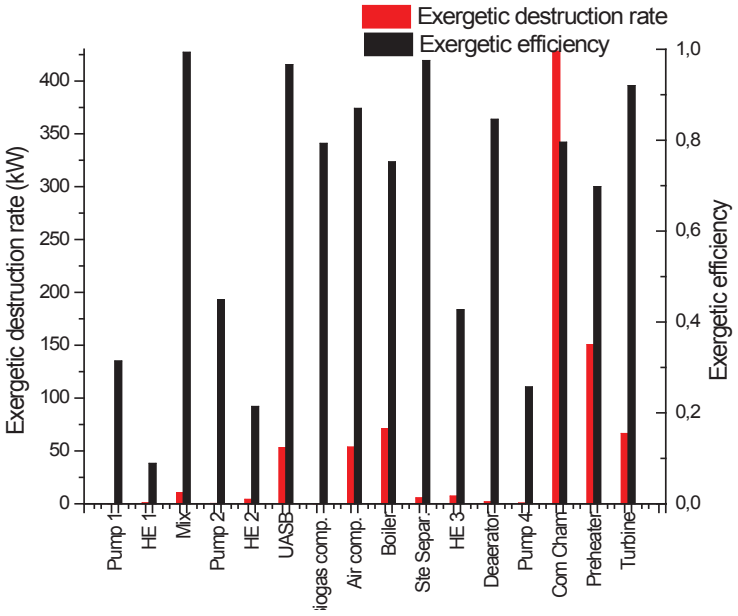
Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμές
Λόγος πίεσης τους συμπιεστή	L	4
Θερμοκρασία αερίων στο θάλαμο καύσης (K)	T_{28}	1223
Πτώση πίεσης στο θάλαμο καύσης (%)	dp	4
Ισεντροπική απόδοση στροβίλου	n_{Turb}	0,79
Ισεντροπική απόδοση συμπιεστή	n_{comp}	0,80

Πίνακας 2: Επικύρωση του μοντέλου

Παράμετρος	Σύμβολο	Κατασκευαστής	Υπολογισμός
Ηλεκτρική ισχύς (kW)	W_{MGT}	350	355
Θερμοκρασία απαερίων στο ΜΣ (K)	T_{14}	589	658.52
Θερμοκρασία συμπιεσμένου αέρα (K)	T_{27}	333,15	476,55
Θερμοκρασία εισόδου στον προθερμαντήρα	T_{29}	949,15	951,63

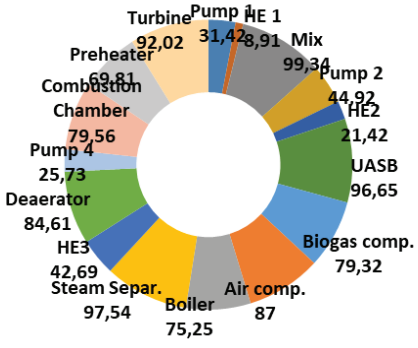
Τα αποτελέσματα της εξεργειακής ανάλυσης συνοψίζονται στο Σχήμα 2 και δείχνουν ότι η μεγαλύτερη καταστροφή εξέργειας συμβαίνει στον θάλαμο καύσης, κυρίως λόγω των μη αναστρεψιμότητων που

σχετίζονται με την καύση και τη μεγαλύτερης διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του αέρα που εισέρχεται στο θάλαμο καύσης και της θερμοκρασίας της φλόγας. Ο προθερμαντήρας εμφανίζει την επόμενη μεγαλύτερη καταστροφή εξέργειας, κυρίως λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των δύο ρευμάτων ρευστών που διέρχονται από αυτό, αλλά και λόγω της πτώσης πίεσης κατά μήκος της συσκευής.



Σχήμα 2: Ρυθμός εξεργειακής καταστροφής των κύριων συσκευών.

Οι εξεργειακές αποδόσεις των κύριων τμημάτων του συστήματος, δηλαδή ο λόγος της ανακτημένης εξέργειας προς την παρεχόμενη εξέργεια, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3. Επίσης, οι χαμηλότερες τιμές εξεργειακής απόδοσης αφορούν τους εναλλάκτες θερμότητας 1 και 2. Αυτό οφείλεται στις θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ των ρευστών και της πτώσης πίεσης.

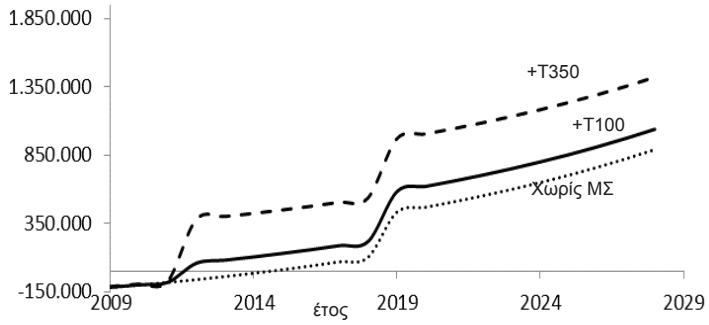


Σχήμα 3: Οι εξεργειακές αποδόσεις των κυριότερων συσκευών.

Η συνολική εξεργειακή απόδοση του συστήματος που εξετάζεται ανέρχεται σε 36,26%, η οποία είναι σημαντικά υψηλότερη από την αντίστοιχη τιμή στο αρχικό σύστημα χωρίς την ενσωμάτωση του μικροστροβίλου, κάτι που προφανώς ήταν αναμενόμενο

4.2. Οικονομική ανάλυση

Τα αποτελέσματα της οικονομικής ανάλυσης δείχνουν ότι το σύστημα που προέκυψε από την ενσωμάτωση ενός μικροστροβίλου στο σύστημα επεξεργασίας CW AD αποτελεί μια επικερδή και βιώσιμη επένδυση σε συγκεκριμένες βιομηχανίες. Για να έχουμε μια σαφέστερη εικόνα σχετικά με την οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος επιχειρείται η σύγκριση αυτού του συστήματος με το αρχικά σύστημα CW AD, χωρίς δηλαδή τη χρήση μικροστροβίλου, και με το σύστημα στο οποίο ενσωματώνεται ο μικροστρόβιλος T100 [6]. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται οι αθροιστικές χρηματοροές για τα τρία συστήματα που εξετάζονται.



Σχήμα 4: Σύγκριση των αθροιστικών ταμειακών ροών (σε ευρώ) για τα τρία συστήματα που εξετάστηκαν.

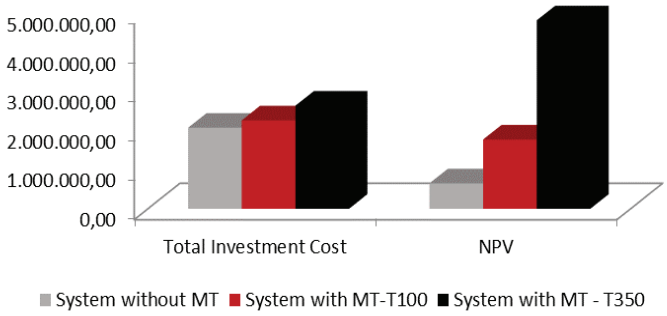
Από το Σχήμα 4 είναι εύκολο να συναχθεί ότι το μέγεθος της μικροστροβίλου έχει σημαντικό αντίκτυπο στην οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος επεξεργασίας CW AD. Το σύστημα με την ενσωμάτωση του μικροστροβίλου T350 παρουσιάζει υψηλότερες χρηματορροές (όπως και στα έσοδα), γεγονός που οφείλεται κυρίως στην υψηλή τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στο εθνικό δίκτυο. Σημειώνεται ότι κατά το έτος 2013 παρατηρείται σημαντική αύξηση των ταμειακών ροών λόγω της εισαγωγής των μικροστροβίλων στο σύστημα AD, όπως άλλωστε είναι αναμενόμενο. Τέλος, το Σχήμα 5 συγκρίνει το κόστος επένδυσης και την NPV για τα τρία συστήματα που εξετάστηκαν, με την τελευταία να είναι σημαντικά υψηλότερη για το σύστημα με την ενσωμάτωση του T350.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την εργασία μελετήθηκε και αξιολογήθηκε (με βάση την εξεργειακή και την οικονομική ανάλυση) ένα σύστημα αναερόβιας χώνευσης σε συνδυασμό με έναν μικροστρόβιλο. Το σύστημα βασίστηκε σε μία υπάρχουσα μονάδα AD και μοντελοποιήθηκε με τη βοήθεια του προσομοιωτή διεργασιών EES. Η επιλογή του εμπορικά διαθέσιμου μικροστροβίλου MT 350 έγινε με στόχο την επίτευξη της μέγιστης δυνατής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η επιλογή του μικροστροβίλου δεν αποτελεί μία τετριμμένη άσκηση, γιατί έπρεπε να συζευχθούν οι περιορισμοί και οι απαιτήσεις του υπάρχοντος συστήματος με τις προδιαγραφές και τα τεχνικά δεδομένα του μικροστροβίλου.

Τα αποτελέσματα από την εξεργειακή ανάλυση έδειξαν ότι ο θάλαμος καύσης του μικροστροβίλου και ο προθερμαντήρας είναι οι συσκευές με τον υψηλότερο ρυθμό καταστροφής εξεργείας. Ωστόσο, η απόδοση του συστήματος αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με το σύστημα χωρίς ενσωμάτωση μικροστροβίλων. Η οικονομική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε με βάση τη μέθοδο NPV έδειξε ότι η ενσωμάτωση ενός μικροστροβίλου στη διεργασία της AD αποτελεί επικερδή κίνηση για μία εταιρεία. Επίσης, έχει δειχθεί ότι η αύξηση της ισοεντροπικής απόδοσης του στροβίλου και της θερμοκρασίας

του θαλάμου καύσης έχουν θετική επίδραση τόσο στην εξεργειακή απόδοση του συστήματος όσο και στην NPV.



Σχήμα 5: Σύγκριση των τριών συστημάτων αναφορικά με το συνολικό κόστος επένδυσης και την καθαρή παρούσα αξία.

Εν κατακλείδι, η αναερόβια επεξεργασία «δύσκολων» αποβλήτων, όπως του τυρόγαλου, για την παραγωγή βιοαερίου και την περαιτέρω χρήση αυτού για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, αποτελεί έναν βιώσιμο και αποτελεσματικό τρόπο τόσο για την επεξεργασία των αποβλήτων όσο και για την κάλυψη των θερμικών αναγκών της μονάδας. Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε σε αυτή τη εργασία θα μπορούσε να αξιοποιηθεί σε παρόμοιες μελέτες για την αξιολόγηση της επίδρασης από την ενσωμάτωση μικροστροβίλων και σε άλλες μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Ben-Hassan, R. and Ghaly, A., 1994, “Continuous propagation of Kluyveromyces fragilis in cheese whey for pollution potential reduction,” Applied Biochemistry and Biotechnology, 47(1), pp. 89-105.

[2] Saddoud, A., Hassaïri, I., and Sayadi, S., 2007, “Anaerobic membrane reactor with phase separation for the treatment of cheese whey,” Bioresource Technology, 98(11), pp. 2102-2108.

[3] Ergüder, T.H., et al., 2001, “Anaerobic biotransformation and methane generation potential of cheese whey in batch and UASB reactors,” Waste Management, 21(7), pp. 643-650.

[4] Switzenbaum, M.S. and Danskin, S.C., 1982, “Anaerobic expanded bed treatment of whey,” Agricultural Wastes, 4(6), pp. 411-426.

[5] Coskun, C., et al., 2001, “Energy analysis of hydrogen production using biogas-based electricity,” Int. J. Hydrogen Energy, 36(17), pp. 11418-11424.

[6] Chatzipaschali, A.A. and Stamatis, A.G., 2014, “Exergetic and economic analysis of a cheese whey wastewater anaerobic treatment plant with a cogeneration system. Desalination and Water Treatment, 56(5), pp. 1223-1230.

[7] Hwang, S., Hansen C.L., Characterization of and bioproduction of short-chain organic acids from mixed dairy-processing wastewater. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1998. 41(3): p. 795-802.

[8] Chatzipaschali, A.A. and Stamatis, A.G., 2012, “Biotechnological Utilization with a Focus on Anaerobic Treatment of Cheese Whey: Current Status and Prospects,” Energies, 5(9), pp. 3492-3525.

[9] Metcalf & Eddy, Wastewater Engineering. Treatment, Disposal, and Reuse. McGraw-Hill, 4rd Edition. 2003.

[10] Tai, S., Matsushige, K., and Goda, T., 1986, “Chemical exergy of organic matter in wastewater,” Int. J. Environmental Studies, 27(3-4), pp. 301-315.

[11] Σταμάτης Α., 1990, Η Διαγνωστική στις Εγκαταστάσεις Αεριοστροβίλων και η εφαρμογή της στην Προληπτική Συντήρηση, Τεχνική Έκθεση ΕΜΠ.

[12] Tsatsaronis, G., 2007, “Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics,” Energy, 32(4), pp. 249-253.

[13] Darrow, K. et al., 2015, Catalogue of CHP Technologies, Environmental Protection Agency, [www.epa.gov/chp/catalog-chp-technologies].

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΣΩΜΑΤΩΜΑΤΩΝ (ΠΕΛΛΕΤΣ) ΑΠΟ ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΤΗΣ ΟΙΝΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Erman Dolmaci[1], Πάρις Α Φωκαΐδης[1]

[1] Σχολή Μηχανικής, Πανεπιστήμιο Frederick, Κύπρος
Φρειδερίκου 7, 1036, Λευκωσία, Κύπρος
p.fokaides@frederick.ac.cy

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία με τίτλο "Ενεργειακή και περιβαλλοντική αξιολόγηση συσσωματωμάτων (πέλλετς) από στερεά απόβλητα της οινοβιομηχανίας" εστιάζει στην εκτίμηση της δυνατότητας αξιοποίησης των στερεών αποβλήτων της οινοβιομηχανίας στην Κύπρο για παραγωγή στερεών βιοκαυσίμων. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, δύο διαφορετικά μείγματα βιομάζας έτυχαν της κατάλληλης επεξεργασίας πελλετοποίησης και ακολούθως αξιολογήθηκε η θερμική και περιβαλλοντική τους απόδοση ως καύσιμα για λέβητες στερεάς βιομάζας. Τα δείγματα που εξετάστηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας αποτελούνται από στέμφυλα (P1) και από μείγμα στέμφυλων και άλλων στερεών υπολειμμάτων (P2). Η πρώτη ύλη συλλέγηκε από το τοπικό οινοποιείο Άης Αμπέλης το οποίο βρίσκεται 28 χιλιόμετρα νοτιοδυτικά της πόλης της Λευκωσίας στην κοινότητα Καλού Χωριού Ορεινής (Λευκωσία, 35 ° 01'12.4 "N 33 ° 09'19.5" E). Η ξήρανση και η πελλετοποίηση της πρώτης ύλης πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις του Ινστιτούτου Γεωργικών Ερευνών του Υπουργείου Γεωργίας, Αγροτικής Ανάπτυξης και Περιβάλλοντος της Κυπριακής Δημοκρατίας. Η ανάλυση των παραγόμενων συσσωματωμάτων για προσδιορισμό της εμπεριεχόμενης υγρασίας και στάχτης πραγματοποιήθηκε στα εργαστήρια της ερευνητικής ομάδας αειφόρου ενέργειας του Πανεπιστημίου Frederick, σύμφωνα με τις διαδικασίες των συναφών ευρωπαϊκών προτύπων (14774, 14775, 14918). Η μέτρηση των εκπομπών καύσης των συσσωματωμάτων της εργασίας πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο λεβήτων του Πανεπιστημίου Frederick. Οι μετρήσεις αέριων εκπομπών επικεντρώθηκαν στην συγκέντρωση μονοξείδιου και διοξειδίου του άνθρακα, στην περίσσεια οξυγόνου (αριθμός λάμδα), στην θερμοκρασία των καυσαερίων και στον βαθμό απόδοσης της διεργασίας καύσης.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων των δειγμάτων που ερευνήθηκαν έδειξαν ότι τα περισσότερα μείγματα συσσωματωμάτων ικανοποιούσαν τις ελάχιστες απαιτήσεις των προτύπων EN ISO 17225-2 και EN ISO 17225-6 για συσσωματώματα ξυλοειδούς και μη ξυλοειδούς βιομάζας αντίστοιχα. Η περιεκτικότητα σε τέφρα και η περιεκτικότητα σε υγρασία και για τα δύο δείγματα βρέθηκαν επίσης να είναι εντός των ορίων των προτύπων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτής της μελέτης βρίσκονται επίσης σε αρκετά καλή συμφωνία με αποτελέσματα άλλων εργασιών που πραγματοποιήθηκαν για παρόμοιας φύσης πρώτη ύλη βιομάζας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας, η αξιοποίηση των στερεών αποβλήτων της οινοβιομηχανίας στην Κύπρο για παραγωγή ενέργειας θα μπορούσε δυνητικά να προσφέρει οικονομικά και περιβαλλοντικά ευφυής λύσεις, στο πνεύμα των αρχών της κυκλικής οικονομίας, η οποία βρίσκεται στην πρώτη γραμμή της ευρωπαϊκής περιβαλλοντικής πολιτικής.

Λέξεις Κλειδιά: Στερεά βιοκαύσιμα, στέμφυλα, συσσωματώματα, περιεκτικότητα σε τέφρα, περιεκτικότητα σε υγρασία, εκπομπές καύσης.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Στερεά απόβλητα οινοβιομηχανίας στην Κύπρο

Η βιομάζα είναι το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων και καταλοίπων βιολογικής προέλευσης από τη γεωργία (συμπεριλαμβανομένων των φυτικών και ζωικών ουσιών), της δασοκομίας και των συναφών βιομηχανιών, συμπεριλαμβανομένης της αλιείας και της υδατοκαλλιέργειας, καθώς και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων. Η θερμότητα που παράγεται από την καύση της βιομάζας μπορεί να αξιοποιηθεί άμεσα για θέρμανση χώρου, ξήρανση καλλιεργειών και άλλες βιομηχανικές διεργασίες. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ατμού για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [1]. Σύμφωνα με την εργασία των Christophorou & Fokaides (2016) [2] στην Κύπρο οι κύριοι πόροι γεωργικής προέλευσης οι οποίοι μπορούν να αξιοποιηθούν ως βιομάζα είναι οι ελαιοπυρήνες, τα στέμφυλα και τα κλάδεμα δέντρων. Μέσα από εργασίες οι οποίες έχουν ήδη υλοποιηθεί για θερμοχημική αξιολόγηση των πιο πάνω πόρων, είναι σαφές ότι σε πολλές περιπτώσεις αυτές οι πρώτες ύλες ικανοποιούν τις ελάχιστες απαιτήσεις σύσταση ςκαι θερμοχημικής συμπεριφοράς των προτύπων EN ISO 17225-2 και EN ISO 17225-6 για ξυλώδη και μη ξυλωειδή συσσωματώματα αντίστοιχα [2]. Η Κύπρος διαθέτει σημαντικό δυναμικό γεωργικών υπολειμμάτων και δυναμικού βιοαερίου. Σύμφωνα με το εθνικό σχέδιο δράσης της Κύπρου για προώθηση παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, μέχρι το 2020 η συνεισφορά της βιομάζας στο ενεργειακό μείγμα της Κύπρου αναμένεται να είναι 3,2 ktoe για θέρμανση και 13,5 ktoe για την παραγωγή ισχύος.

Τα βιοαποικοδομήσιμα απόβλητα στην Κύπρο συνίστανται κυρίως στο βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των αστικών στερεών αποβλήτων, της ιλύος καθαρισμού λυμάτων, των στερεών και υγρών γεωργικών υπολειμμάτων και των στερεών και υγρών αποβλήτων από βιομηχανίες τροφίμων και ποτών [3]. Η οινοπαραγωγική βιομηχανία, μία από τις σημαντικότερες αγορές στην Κύπρο, παράγει μεγάλες ποσότητες στερεών αποβλήτων σε ετήσια βάση. Το συμπιεσμένο υπόλειμμα που παραμένει μετά την εκχύλιση του χυμού από τα σταφύλια κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής οίνου αποτελείται από τον φλοιό και τους σπόρους σταφυλιών. Τα συστατικά των στερεών υπολειμμάτων της διαδικασίας οινοποιίας ποικίλλουν ανάλογα με την ποικιλία του οίνου (λευκό ή κόκκινο), γενικά αν και περιέχουν φλοιό, πολτό, σπόρους και στελέχη του καρπού. Κατά την παραγωγή οίνου, το 25% περίπου του βάρους των σταφυλιών παραμένει ως υποπροϊόν / απόβλητο. Στην Κύπρο, σύμφωνα με την βάση δεδομένων χρήσης γης Corine, 8892 εκτάρια καλλιεργήσιμης γης αξιοποιούνται αμπελοκαλλιέργειες, εκ των οποίων το 96,8% (8605,7 εκτάρια) του τελικού καρπού καταλήγει στην οινοβιομηχανία, ενώ ως επιτραπέζια σταφύλια καταλήγει το προϊόν της καλλιέργειας των υπόλοιπων 286,3 εκτάρια που αναφέρονται σε περιοχές με.

1.2. Πελλετοποίηση βιομάζας

Η πελλετοποίηση βιομάζας θεωρείται ως μια καθιερωμένη μέθοδος μηχανικής επεξεργασίας στερεάς ξυλοειδούς και μη βιομάζας για παραγωγή στερεών βιοκαυσίμων. Κατά την πελλετοποίηση, η επεξεργασμένη πρώτη ύλη συμπιέζεται και συμπυκνώνεται για αποδοτικότερη καύση αλλά και ευκολότερη διαχείριση (αποθήκευση και μεταφορά). Μέσα από την πελλετοποίηση αυξάνεται η ενεργειακή πυκνότητα της βιομάζας, καθιστώντας με αυτό τον τρόπο την καύση πιο αποτελεσματική. Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα της διαδικασίας πελλετοποίησης είναι η βελτίωση της συνολικής ποιότητας, σταθερότητας και αντοχής των βιοκαυσίμων [4]. Σημαντική παράμετρο στην διεργασία πελλετοποίησης αποτελεί η περιεχόμενη υγρασία, καθότι σε αρκετές περιπτώσεις, μέσα από την ορθή της επιλογή δύναται να αποφευχθεί η προσθήκη συνδετικών ή άλλων προσθέτων, πετυχαίνοντας έτσι συσσωματώματα τα οποία ικανοποιούν τις ελάχιστες μηχανικές ιδιότητες των προτύπων EN 17225 [5].

Ανάλογα με την κατάσταση της πρώτης ύλης, τα στάδια της διαδικασίας πελλετοποίησης είναι η ξήρανση, η κονιορτοποίηση, η συσσωμάτωση, η ψύξη, η διαλογή και η συσκευασία [6]. Η πελλετοποίηση θεωρείται σήμερα ένας από τους πλέον αποδοτικούς και οικονομικούς τρόπους για τη μετατροπή ξυλοειδούς και μη ξυλοειδούς στερεάς βιομάζας σε καύσιμο με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και καλή ποιότητα [7]. Η χρήση συσσωματωμάτων για παραγωγή θερμότητας στον οικιακό και εμπορικό τομέα, παραμένει κυρίαρχη στην αγορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ΕΕ. Η χρήση στερεών συσσωματωμάτων για παραγωγή θερμότητας, παρουσίασε κατά τη διάρκεια των ετών 2011 έως το 2014 αύξηση κατά 25% [8].

Οι κύριες τεχνολογίες που αξιοποιούνται σήμερα για θέρμανση χώρων με την χρήση συσσωματωμάτων είναι δυο, οι λέβητες και οι μεμονωμένες εστίες. Οι εστίες συσσωματωμάτων για οικιακή χρήση συνήθως αξιοποιούνται για ονομαστική θερμική ισχύ μέχρι 10kW. Η θερμότητα στην περίπτωση εστιών συσσωματωμάτων μεταφέρεται στον χώρο με ακτινοβολία. Όσον αφορά στους λέβητες, η ισχύς του ξεκινά από 20 kW για τους μικρότερους και φτάνει τις μερικές εκατοντάδες kW για μεγάλα κτήρια και βιομηχανικές εφαρμογές. Οι λέβητες συσσωματωμάτων διακρίνονται ανάλογα με τον τρόπο τροφοδοσίας των συσσωματωμάτων στον καυστήρα σε λέβητες με τροφοδοσία του καυστήρα στο κάτω μέρος, με οριζόντια τροφοδοσία και με τροφοδοσία κορυφής [9]. Ο βαθμός απόδοσης των λεβήτων συσσωματωμάτων κυμαίνεται από 80 μέχρι 90%. Σύμφωνα με την εργασία των Miranda et al. [10], τα συσσωματώματα στέμφυλων παρουσιάζουν αρκετά καλές θερμοφυσικές ιδιότητες κατά την διεργασία της καύσης.

1.3. Διεργασίες καύσης συσσωματωμάτων βιομάζας

Ανεξαρτήτως τεχνολογίας μετατροπής της βιομάζας σε θερμότητα, η διαδικασία καύσης των συσσωματωμάτων διακρίνεται σε δύο ζώνες: η κύρια ζώνη είναι η περιοχή όπου η πρωτογενής καύση λαμβάνει χώρα σε τρεις φάσεις (ξήρανση, πυρόλυση, καύση). Στη δεύτερη ζώνη, τα ξηρά συσσωματώματα αποσυντίθενται σε εύφλεκτα, πτητικά συστατικά και άνθρακα. Ο άνθρακας καίγεται κατά τη διάρκεια της πρωτογενούς καύσης, ενώ τα εύφλεκτα αέρια καίγονται στη δευτερεύουσα ζώνη. Κατά τη διάρκεια καύσης της βιομάζας, τα συσσωματώματα βιομάζας τροφοδοτούνται στην κύρια ζώνη καύσης, η πρωτογενής και η δευτερογενής καύση εντούτοις λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα. Η ποσότητα της περίσσειας αέρος στη δευτερεύουσα ζώνη είναι σημαντική για τη συγκέντρωση του μονοξείδιου του άνθρακα (CO) και των άκαυστων υδρογονανθράκων (UHC). Ανεπαρκής ποσότητα αέρα στον θάλαμο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών CO και UHC, την διατήρηση σε χαμηλά επίπεδα συγκέντρωσης του NOx, αλλά και την αύξηση της συγκέντρωσης των μικροσωματιδίων στα καυσαέρια [11].

Το βέλτιστο επίπεδο περίσσειας αέρα ποικίλει μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών και εφαρμογών. Εντούτοις η συνήθης πρακτικής αναφέρεται σε ρύθμιση της περίσσειας αέρα σε λέβητες συσσωμάτων βιομάζας στο 10%.. Για βελτιστοποιημένη αναλογία αέρα / καυσίμου, η εξοικονόμηση ενέργειας που προκύπτει δύναται να ανέλθει μέχρι το 25% [12]. Ο χρόνος παραμονής των καυσαερίων και η θερμοκρασία στο θάλαμο καύσης είναι σημαντικές παράμετροι για τη διατήρηση του μονοξειδίου του άνθρακα χαμηλού άνθρακα, των μη καμένων υδρογονανθράκων και των οξειδίων του αζώτου.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Δειγματοληψία πρώτης ύλης

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, η πρώτη ύλη η οποία αξιοποιήθηκε ήταν τα στερεά απόβλητα οινοβιομηχανίας, τα οποία περιλαμβάνουν τα στέμφυλα (φλοιό, κουκούτσια και μικρό μέρος του καρπού) καθώς και άλλα στερεά οργανικά απόβλητα της βιομηχανίας (βλαστοί, μίσχοι, φύλλα και κλαδιά). Η πρώτη ύλη συλλέγηκε σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφονται στα πρότυπα EN 14778 και EN 14780 από το οινοποιείο Άης Αμπέλης, 28 χιλιόμετρα νοτιοδυτικά της Λευκωσίας. Ο Άης Αμπέλης είναι ένα από τα γνωστά οινοποιεία στην Κύπρο που ιδρύθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 90 και βρίσκεται στις πλαγιές του Καλού Χωριού Ορεινής. Στο οινοποιείο τρυγούνται η ενδημική ποικιλία Μαραθεύτικο καθώς και οι εισαγόμενες ποικιλίες Syrah και Chardonnay. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας αναλύθηκαν δύο διαφορετικά μείγματα πρώτης ύλης: ένα μείγμα με στέμφυλα ποικιλίας Μαραθεύτικου (M1), και ένα δεύτερο μείγμα το οποίο αποτελούνταν από 70% (κ.ο.) στέμφυλα ποικιλίας Μαραθεύτικου και 30% (κ.ο.) από άλλη στερεά βιομάζα (φύλλα, κλαδιά, στελέχη κλπ) (M2).

2.2. Πελλετοποίηση πρώτης ύλης

Η πρώτη ύλη πελλετοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις του Ινστιτούτου Γεωργικών Ερευνών, του Υπουργείου Γεωργίας, Αγροτικής Ανάπτυξης και Περιβάλλοντος στην Αθαλάσσα στην Λευκωσία. Τα κύρια μέρη της μονάδας πελλετοποίησης είναι ο κονιορτοποιητής (μύλος) που χρησιμοποιείται για τον τεμαχισμό της πρώτης ύλης, σιλό αποθήκευσης, κοχλιοφόρος μεταφορέας, ο οποίος μεταφέρει την πρώτη ύλη από το σιλό αποθήκευσης στην μονάδα πελλετοποίησης, πρέσα πελλετοποίησης, μονάδα ψύξης με κόσκινο, ηλεκτρικός πίνακας ελέγχου της λειτουργίας της μονάδας, καθώς και φίλτρα σκόνης. Η πρώτη ύλη ξηράθηκε για μείωση την περιεκτικότητά της σε υγρασία στα κατάλληλα για πελλετοποίηση επίπεδα (10%), όπως αυτά ορίζονται στο πρότυπο EN ISO 17225-6: 2014. Η ακατέργαστη βιομάζα αλέστηκε μετά τη διαδικασία ξήρανσης για επίτευξη σκόνης ομοιόμορφης

διαμέτρου, όχι μεγαλύτερης των 6 mm. Κατά τη διαδικασία της πελλετοποίησης, οι πολύ ψηλές πιέσεις και η θερμότητα που αναπτύσσονται στην πρέσα του πελλετοποιητή, οδηγούν στην αύξηση της θερμοκρασίας της λιγνίνης, με αποτέλεσμα αυτή να μαλακώνει και η πρώτη ύλη να δύναται να μορφοποιηθεί σε μορφή συσσωματωμάτων. Κατά το στάδιο της ψύξης και διαλογής των συσσωματωμάτων, αφαιρείται η σκόνη και άλλα ξένα σωματίδια τα οποία δυνητικά μπορεί να επικαθήσουν στα συσσωματώματα κατά την διάρκεια της διεργασίας.

2.3. Ανάλυση υγρασίας και τέφρας

Η ανάλυση των φυσικών ιδιοτήτων των παραγόμενων συσσωματωμάτων πραγματοποιήθηκε στα εργαστήρια της Ερευνητικής Ομάδας Αειφόρου Ενέργειας του Πανεπιστημίου Frederick. Συγκεκριμένα η περιεκτικότητα σε υγρασία των μειγμάτων της μελέτης προσδιορίστηκε σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο EN 14774-3: 2009. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε κλίβανο ξήρανσης (τύπου SNOL 20/300) και ξηράθηκαν σε διαδοχικούς κύκλους στους 105 °C μέχρις ότου η διαδοχική μέτρηση μάζας ήταν μικρότερη του 0,2 %. Για την μέτρηση της μάζας των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε ζυγός ακριβείας τύπου KERN ABT 220-5DM.

Η περιεκτικότητα σε τέφρα των δειγμάτων καθορίστηκε χρησιμοποιώντας κλίβανο ξήρανσης (τύπου SNOL 4/1100) σύμφωνα με τη διαδικασία του προτύπου EN 14775: 2009. Η θερμοκρασία του κλιβάνου στους 250°C ρυθμίστηκε σε περίοδο 30 λεπτών με θέρμανση 6°C/min. Στη συνέχεια διατηρήθηκε σε αυτό το επίπεδο θερμοκρασίας για 60 λεπτά για να επιτρέψει την εξάτμιση των πτητικών ουσιών του δείγματος πριν από την ανάφλεξη του. Εν συνεχεία η θερμοκρασία ανυψώθηκε στους 550°C σε περίοδο 30 λεπτών με θέρμανσης 10°C/λεπτό και παρέμεινε σε αυτή τη θερμοκρασία για τουλάχιστον 120 λεπτά. Τα αποτελέσματα έχουν αναφερθεί λαμβάνοντας υπόψη την υπολογισμένη περιεκτικότητα σε υγρασία των δειγμάτων.

2.4. Μέτρηση εκπομπών καύσης

Η μέτρηση εκπομπών καύσης των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο λεβήτων του Πανεπιστημίου Frederick με την χρήση λέβητα τύπου BIOPLEX-HL ονομαστικής θερμικής ισχύος 29 kW και βαθμού απόδοσης 75%. Βάσει προτύπου EN 303-5 ο λέβητας ταξινομήθηκε με βάση την απόδοση και την ονομαστική θερμική του ισχύ ως λέβητας κατηγορίας 3. Ο λέβητας έχει τη δυνατότητα να παρέχει νερό μέγιστης θερμοκρασίας 95°C και είναι προσαρμοσμένος να λειτουργεί σε εγκαταστάσεις θέρμανσης με αντλίες, προστατευμένες από ανοικτό δοχείο πίεσης. Η ελάχιστη θερμοκρασία του νερού επιστροφής στο λέβητα ορίστηκε στους 60°C. Η σύσταση των καυσαερίων μετρήθηκε με την χρήση αναλυτή τύπου KANE 455. Η εκστρατεία μέτρησης επικεντρώθηκε στην σύσταση των καυσαερίων και ιδιαίτερα στη μέτρηση της συγκέντρωσης του μονοξειδίου και διοξειδίου του άνθρακα, της περίσσειας οξυγόνου, της θερμοκρασίας των καυσαερίων και του βαθμού απόδοσης του λέβητα. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε διάστημα έξι ωρών προκειμένου να δινόταν επαρκής χρόνος στο στερεό καύσιμο να ολοκληρώσει διαδοχικούς κύκλους καύσης.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Περιεχόμενη υγρασία και τέφρα

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται η περιεχόμενη υγρασία και η τέφρα των δύο μειγμάτων τα οποία εξετάστηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας.

Πίνακας 1: Περιεχόμενη Υγρασία και Τέφρα Μειγμάτων Μελέτης

Ανάλυση	Μείγμα 1	Μείγμα 2
Περιεχόμενη Υγρασία (Mad) [w%]	10	9
Τέφρα [w%]	8	10

Για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε υγρασία, η τελική μάζα ορίστηκε ως εκείνη για την οποία η μεταβολή από την προηγούμενη της μέτρησης δεν υπερβαίνει το 0.2% στη μάζα κατά τη διάρκεια μιας περαιτέρω περιόδου θέρμανσης στους 105 (±2)°C σε διάστημα 60 λεπτών. Η ακρίβεια της μέτρησης μάζας και των δύο δειγμάτων ήταν 0.1 mg. Ο απαιτούμενος χρόνος ξήρανσης ήταν 3 ώρες και για τα δύο δείγματα. Για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε τέφρα, τα δοχεία στα οποία

τοποθετήθηκε η οργανική ύλη θερμάνθηκαν για μία ώρα στους 250°C. Μετά από ψύξη τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα για 10 λεπτά και ζυγίστηκαν. Μετά τη ζύγιση των δειγμάτων και του δίσκου, τοποθετήθηκαν σε κλίβανο για θέρμανση για 1 ώρα στους 250°C και 3 ώρες στους 550°C. Μετά από 4 ώρες της διαδικασίας θέρμανσης τα δείγματα ψύχθηκαν και τοποθετήθηκαν σε ξηραντήρα για 10 λεπτά.

3.2. Εκπομπές Καύσης

Τα πειράματα καύσης έγιναν για δύο τύπους μιγμάτων, μετρώντας τις εκπομπές κατά τη διαδικασία καύσης στον λέβητα συσσωματωμάτων. Ο λέβητας που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη ήταν τύπου BIOPLEX HL25 μαζί με σύστημα ελέγχου τύπου ecoMAX 250RZ. Οι μετρήσεις αυτές συγκρίθηκαν με τα ονομαστικά όρια που καθορίζονται από το ευρωπαϊκό πρότυπο CYS EN 303-5, 2012. Η χρήση του προτύπου βοήθησε στον προσδιορισμό της καταλληλόλητας του λέβητα και του βιοκαυσίμου που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας, ελέγχοντας κατά πόσον το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO2) ήταν εντός των τυποποιημένων ορίων των προτύπων της ΕΕ, καθώς επίσης και την σχέση μεταξύ αυτών των δύο συγκεντρώσεων . Ο λέβητας που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική μελέτη ταξινομήθηκε με βάση τις διαδικασίες του προτύπου στην Κλάση 3.

Η πειραματική διαδικασία περιλάμβανε την αφαίρεση της στάχτης από την κλίνη καύσης και των συσσωματωμάτων από τον καυστήρα από προηγούμενο πείραμα, προκειμένου να μην επηρεάζονταν οι μετρήσεις εκπομπές από πρώτη ύλη που χρησιμοποιήθηκε σε προηγούμενα πειράματα. Ακολούθως τα συσσωματώματα των οποίων η συμπεριφορά σε καύση θα προσδιοριζόταν, τοποθετούνταν σε κυτίο, στο οποίο με την βοήθεια ατέρμονα κοχλία οδηγούνταν στον θάλαμο καύσης. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας γινόταν επίσης ρύθμιση της παροχής αέρα, με σκοπό την διατήρηση της συγκέντρωσης του μονοξειδίου του άνθρακα σε χαμηλά επίπεδα και της θερμοκρασίας του νερού και του βαθμού απόδοσης σε υψηλότερα επίπεδα. Σε αυτά τα πλαίσια ρυθμιζόταν επίσης και ο ρυθμός τροφοδοσίας στερεών βιοκαυσίμων στον καυστήρα.

Η μέτρηση καυσαερίων ξεκινούσε αφότου είχε περάσει αρκετός χρόνος από την έναυση του καυσίμου (περίπου 2 ώρες) και ο λέβητας βρισκόταν σε θερμική ισορροπία. Ο αισθητήρας του μετρητή καυσαερίων τοποθετούνταν στον αγωγό καυσαερίων (καμινάδα) στην κατάλληλη θέση, σε απόσταση που δεν υπερέβαινε τις τρεις διαμέτρους του σωλήνα μετά την εξαγωγή των αερίων από τον λέβητα. Χρησιμοποιώντας τον ανιχνευτή του αναλυτή καυσαερίων οι απαιτούμενες μετρήσεις για τις εκπομπές λαμβάνονταν σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, συγκεκριμένα ανά 10 λεπτά. Μετά την επίτευξη σταθερής κατάστασης λειτουργίας με σταθερές θερμοκρασίες καυσαερίων, οι εκπομπές αερίων μετρήθηκαν χρησιμοποιώντας αναλυτή καυσαερίων τύπου KANE455 με σταθερή ροή των καυσαερίων. Μετρήθηκαν οι συγκεντρώσεις διαφόρων αερίων όπως το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) και το οξυγόνο (O_2). Πραγματοποιήθηκαν πρόσθετες μετρήσεις, όπως της θερμοκρασίας των καυσαερίων (°C), του λόγου λάμδα (-) και του βαθμού απόδοσης (%).

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για το πρώτο μείγμα δίνονται στον Πίνακα 1. Οι μετρήσεις άρχισαν να λαμβάνονται αφού η φλόγα είχε φθάσει σε σταθερή κατάσταση. Για το πρώτο μείγμα, το μέσο ποσοστό συγκέντρωσης της περίσσειας O_2 μετρήθηκε να είναι 16% και η συγκέντρωση CO σε ppm ήταν κατά μέσο όρο 1407,3. Όπως φαίνεται στον πίνακα, τα επίπεδα μονοξειδίου του άνθρακα βρίσκονται στα αποδεκτά όρια του προτύπου EN 303-5. Οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα από την καύση βιομάζας εξαρτώνται κυρίως από τρεις παράγοντες: την θερμοκρασία της καύσης, την σωστή ανάμιξη καυσίμου και οξυγόνου και τον χρόνο παραμονής του καύσιμου στο θάλαμε καύσης. Υψηλότερες συγκεντρώσεις οξυγόνου αντιστοιχούν σε χαμηλότερο φορτίο, μειώνοντας τη θερμοκρασία του αερίου και καταλήγοντας με αυτό τον τρόπο σε υψηλότερες εκπομπές CO.

Για το δεύτερο μείγμα,, οι τιμές των παραμέτρων που μετρήθηκαν δίνονται στον Πίνακα 3. Ο μέσος όρος συγκέντρωσης CO (ppm) ήταν 2190,9 ppm ενώ όσον αφορά στην περίσσεια οξυγόνου ο μέσος όρος μετρήθηκε στο 14.4% . Όπως φαίνεται στον πίνακα, τα επίπεδα μονοξειδίου του άνθρακα βρίσκονται στα αποδεκτά όρια του προτύπου EN 303-5. Η συγκέντρωση οξυγόνου αποτελεί σημαντικό δείκτη της συνολικής απόδοσης. Η περίσσεια του αέρα οδήγησε σε χαμηλότερες αδιαβατικές θερμοκρασίες καύσης και έτσι σε μια διαδικασία με χαμηλότερη απόδοση, κάτι που δεν θεωρείται ως θεμιτό.

Πίνακας 2: Εκπομπές Καύσης, Απόδοση και Θερμοκρασία Καυσαερίων – Μείγμα 1

Χρόνος (min)	CO (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	TFc (C°)	Απόδοση (%)	Θερμ. Νερού (C°)
10	1511	5	15,4	67,4	92,9	35,1
20	1352	4,8	15,7	63,4	93,1	34,7
30	1372	4,5	16	65	92,4	34,7
40	1207	3,6	16,5	50,6	94	35
50	1502	4,6	16	67,1	92,1	35
60	1433	4,4	16,1	63,8	92,5	34,7
70	1474	4,2	16,4	62,9	92,1	34
Μέσος Όρος	**1407,3**	**4,4**	**16,0**	**62,9**	**92,7**	**34,7**

Πίνακας 3: Εκπομπές Καύσης, Απόδοση και Θερμοκρασία Καυσαερίων – Μείγμα 2

Χρόνος (min)	CO (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	TFc (C°)	Απόδοση (%)	Θερμ. Νερού (C°)
10	3641	7,5	12,7	69,2	95	30,5
20	2840	6,2	14,2	68,5	94,1	31,5
30	2781	6,4	13,9	68,4	94,3	33
40	1749	6	14,3	66,9	94,1	34
50	1516	4,9	15,2	60,9	94	34,4
60	1251	5,1	15,4	67,1	92,9	34,7
70	1558	5,4	15	67,1	93,4	34,8
Μέσος Όρος	**2190,9**	**5,9**	**14,4**	**66,9**	**94,0**	**33,3**

Για καλύτερη κατανόηση των σχέσεων μεταξύ των μετρούμενων παραμέτρων, έγινε ανάλυση συσχέτισης για τις μετρήσεις καύσης των δύο μιγμάτων. Η ανάλυση αυτή κρίνεται ως δόκιμη, καθότι στην περίπτωση ενός κύκλου καύσης στερεάς βιομάζας, το στερεό καύσιμο βρίσκεται σε διαφορετικές φάσεις καύσης, με αποτέλεσμα να μη δύναται η εξαγωγή δόκιμων και τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με την αλληλοσυσχέτηση των διαφόρων παραμέτρων καύσης. Για τα επίπεδα μονοξειδίου του άνθρακα του μείγματος 1 (Πίνακας 4), διαπιστώθηκε ότι συσχετίστηκαν θετικά με το διοξείδιο του άνθρακα και τη θερμοκρασία των καυσαερίων, και αρνητικά με τον αριθμό λάμδα και τον βαθμό απόδοσης της διεργασίας καύσης. Το επίπεδο του διοξειδίου του άνθρακα συσχετίστηκε με τον αριθμό λάμδα και το οξυγόνο. Ο βαθμός απόδοσης της διεργασίας συσχετίστηκε επίσης αρνητικά με την θερμοκρασία των καυσαερίων και των επιπέδων μονοξειδίου του άνθρακα. Ανάλογα συμπεράσματα προκύπτουν επίσης από την παλινδρόμηση των μετρήσεων για το Μείγμα 2 (Πίνακας 5).

Πίνακας 4: Ανάλυση Παλινδρόμησης Μετρήσεων – Μείγμα 1

	Χρόνος (min)	CO (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	TFc (C°)	Απόδοση (%)	Θερμ. Νερού (C°)
Χρόνος (min)	100%						
CO (ppm)	13%	100%					
CO2 (%)	-53%	69%	100%				
O2 (%)	77%	-48%	-93%	100%			
TFc (C°)	-14%	89%	89%	-69%	100%		
Απόδοση (%)	-45%	-81%	-43%	10%	-79%	100%	
Θερμ. Νερού (C°)	-63%	-16%	19%	-44%	-5%	47%	100%

Πίνακας 5: Ανάλυση Παλινδρόμησης Μετρήσεων – Μείγμα 2

	Χρόνος (min)	CO (ppm)	CO2 (%)	O2 (%)	TFc (C°)	Απόδοση (%)	Θερμ. Νερού (C°)
Χρόνος (min)	100%						
CO (ppm)	-92%	100%					
CO2 (%)	-86%	94%	100%				
O2 (%)	88%	-94%	-99%	100%			
TFc (C°)	-46%	60%	72%	-61%	100%		
Απόδοση (%)	-87%	85%	83%	-90%	23%	100%	
Θερμ. Νερού (C°)	95%	-96%	-89%	89%	-56%	-81%	100%

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο στόχος αυτής της εργασίας ήταν η εκτίμηση του δυναμικού των υπολειμμάτων της κυπριακής οινοβιομηχανίας για πελλετοποίηση και χρήση ως πρώτη ύλη για στερεά βιοκαύσιμα. Στα πλαίσια αυτής της μελέτης, πραγματοποιήθηκε δόκιμη συλλογή και πελλετοποίηση μειγμάτων στέμφυλων και άλλων στερεών υπολειμμάτων από οινοβιομηχανία της Κύπρου, καθώς επίσης και μετρήσεις για το περιεχόμενο σε υγρασία και τέφρα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση των δειγμάτων που ερευνήθηκαν έδειξαν ότι ικανοποιούν τις ελάχιστες απαιτήσεις των προτύπων EN ISO 17225-2 και EN ISO 17225-6 για πέλλετς ξυλώδους και μη-ξυλώδους βιομάζας αντίστοιχα. Πραγματοποιήθηκαν επίσης μετρήσεις καυσαερίων και άλλων παραμέτρων καύσης από την αξιοποίηση των παραγόμενων συσσωματωμάτων σε λέβητα στερεάς βιομάζας. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι τα στερεά υπολείμματα της κυπριακής οινοβιομηχανίας θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν ως πηγή ενέργειας για την παραγωγή θερμότητας που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί τόσο για τον τομέα της θέρμανσης των κτηρίων όσο και για τον βιομηχανικό τομέα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή αποτελεί διπλωματική εργασία η οποία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος MSc in Sustainable Energy Systems του Πανεπιστημίου Frederick. Οι συγγραφείς επιθυμούν να ευχαριστήσουν το Ινστιτούτο Γεωργικών Ερευνών του Υπουργείου Γεωργίας, Αγροτικής Ανάπτυξης και Περιβάλλοντος της Κυπριακής Δημοκρατίας, και ιδιαίτερα τον Δρ. Πολύκαρπο Πολυκάρπου για την πρόσβαση στην διάταξη πελλετοποίησης του Ινστιτούτου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] C. Okello, S. Pindozzi, S. Faugno and L. Boccia, “Bioenergy potential of agricultural and forest residues in Uganda,” Biomass Bioenergy, no. 56, pp. 515-525, 2013.

[2] E. A. Christoforou and P. A. Fokaides, “Thermochemical Properties of Pellets Derived from Agro-residues and the Wood Industry,” Springer, Nicosia, 2016.

[3] S. Kassinis, “Energy Production from Renewable Sources by 2020: The Cypriot Case,” in DEMSEE 2008, Nicosia, 2008.

[4] R. Saidur, E. Abdelaziz, A. Demirbas, M. Hossain and S. Mekhilef, “A review on biomass as a fuel for boilers,” Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 5, no. 15, pp. 2262-2289, 2011.

[5] M. Klemm, R. Schmersahl, C. Kirsten and N. Weller, “Biofuels: Upgraded New Solids,” Springer Science, pp. 138-156., 2013.

[6] A. Kylili, E. Christoforou and P. A. Fokaides, “Environmental evaluation of biomass pelleting using life cycle assessment,” Biomass and Bioenergy , no. 84, pp. 107-117, 2016.

[7] The European Pellet Council (EPC), “The European Pellet Council (EPC),” The European Pellet Council (EPC), [Online]. Available: http://www.pelletcouncil.eu/en/why-pellets/. [Accessed 01 12 2016].

[8] European Biomass Association, “AEBIOM Statistical Report 2015,” European Biomass Association, Brussels, 2015.

[9] F. Fiedler, “The State of The Art of Small Scale Pellet-Based Heating Systems and Relevant Regulations in Sweden, Austria and Germany,” Solar Energy Research Center SERC, Borlänge.

[10] M. Miranda, J. Arranz, S. Román, S. Rojas, I. Montero, M. López and J. Cruz, “Characterization of grape pomace and pyrenean oak pellets,” Fuel Processing Technology , no. 92, pp. 278-283, 2011.

[11] A. Garcia-Maraver and J. Perez-Jimenez, “Chapter 5: Biomass Pellet Fired Boilers,” in Biomass Pelletization: Standards and Production, WIT Press, 2015, p. 79.

[12] A. G. Maraver and J. P. Jimenez, Biomass Pelletization: Standards and Production, Jaen: WIT Press, 2015.

[13] E. Christoforou and P. Fokaides, “A review of quantification practices for plant- derived biomass potential.,” Int. J. Green Energy , no. 12 (4), p. 368–378, 2015.

[14] The European Pellet Council (EPC), “The European Pellet Council (EPC),” The European Pellet Council (EPC), [Online]. Available: http://www.pelletcouncil.eu/en/why-pellets/. [Accessed 01 October 2017].

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΞΥΛΕΙΑΣ ΣΕ ΝΗΣΙΩΤΙΚΕΣ ΑΓΡΟΤΙΚΕΣ ΚΟΙΝΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ ΜΕΣΟΓΕΙΟΥ (ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ: ΑΝΩΓΕΙΑ, ΚΡΗΤΗ)

Ν. Σαββάκης, Σ. Τουρνάκη, Ν. Καλλέργης, Θ. Τσούτσος*

[1]* Εργαστήριο Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων
Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης
731 00 Χανιά, e-mail: theocharis.tsoutsos@enveng.tuc.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ξυλώδης βιομάζα αποτελεί σημαντική παραδοσιακά πηγή ενέργειας για την θέρμανση σε πολλές νησιωτικές κοινότητες της Ευρώπης, ιδιαίτερα για τις ορεινές και τις αγροτικές. Ωστόσο, η εκτεταμένη χρήση της σε παλαιού τύπου εστίες καύσης (π.χ. παραδοσιακά τζάκια, σόμπες ξύλου) μπορεί να θέσει σε κίνδυνο υποβάθμισης την ποιότητα του αέρα στους εσωτερικούς χώρους και το εξωτερικό περιβάλλον.

Η εργασία παρουσιάζει μια ολιστική μεθοδολογική προσέγγιση για την βελτίωση της υφιστάμενης κατάστασης μέσω της αλλαγής της ενεργειακής συμπεριφοράς των κατοίκων στις ορεινές και αγροτικές περιοχές της Μεσογείου, την αύξηση χρήσης των ΑΠΕ και την ένταξη μέτρων βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης ως οριζόντιες αρχές στον αναπτυξιακό σχεδιασμό σε τοπικό επίπεδο.

Για τον σκοπό αυτό υλοποιείται πιλοτική δράση, με περιοχή μελέτης τα Ανώγεια (Κρήτη), η οποία περιλαμβάνει την συλλογή και την ανάλυση ποσοτικών και ποιοτικών δεδομένων σχετικά με τη χρήση βιομάζας ξυλείας, την διεξαγωγή επί τόπου μετρήσεων της ποιότητας του αέρα (CO_2, CO, NO_X, PM1, PM2.5, PM4, PM10, TPM) στους εσωτερικούς χώρους και το εξωτερικό περιβάλλον των κατοικιών που χρησιμοποιούν βιομάζα ξυλείας για θέρμανση, υπό διαφορετικές καιρικές συνθήκες μέτρησης, την παροχή τεχνικών συμβουλών για την αναβάθμιση των συστημάτων θέρμανσης, την επίδειξη των ορθών πρακτικών χρήσης της βιομάζας ξυλείας και την δημιουργία τοπικού επιχειρηματικού μοντέλου, βάσει των αρχών της κυκλικής οικονομίας, για την αξιοποίηση των υπολειμμάτων βιομάζας ξυλείας.

Η μελέτη υλοποιείται από την Ευρωπαϊκή πρωτοβουλία “COMPOSE – Rural communities engaged with positive energy”, η οποία στοχεύει στην προώθηση εφαρμογών μικρής κλίμακας ΑΠΕ στις αγροτικές και νησιωτικές περιοχές της Μεσογείου και συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης στο πλαίσιο του προγράμματος INTERREG MED. Το έργο υλοποιεί 15 πιλοτικές δράσεις σε 11 χώρες (Ελλάδα, Γαλλία, Ισπανία, Ιταλία, Κροατία, Κύπρος, Πορτογαλία, Σλοβενία, Αλβανία, Βοσνία & Ερζεγοβίνη, Μαυροβούνιο), με στόχο την ανάπτυξη και πιλοτική εφαρμογή μεθοδολογίας αναπτυξιακού σχεδιασμού έργων ΑΠΕ, που θα επιτρέψει σε πόλεις και περιφέρειες της Μεσογείου να αυξήσουν τις ΑΠΕ στο ενεργειακό τους μείγμα και παράλληλα να ενισχύσουν τις τοπικές επιχειρήσεις και τις τοπικές αλυσίδες προστιθέμενης αξίας προϊόντων και υπηρεσιών, εφαρμόζοντας παραδείγματα καλής πρακτικής και αξιοποιώντας την υφιστάμενη Ευρωπαϊκή εμπειρία και τεχνογνωσία.

Λέξεις Κλειδιά: *Βιομάζα ξυλείας, συστήματα θέρμανσης υψηλής ενεργειακής απόδοσης, περιβαλλοντικές επιπτώσεις καύσης βιομάζας ξυλείας, αναπτυξιακός σχεδιασμός ΑΠΕ μικρής κλίμακας*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η περιοχή της Κρήτης παρουσιάζει υψηλό δυναμικό βιομάζας ξυλείας, το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως για τους σκοπούς της θέρμανσης στις ορεινές και αγροτικές κοινότητες [1]. Η πρακτική αυτή εφαρμόζεται για πολλά χρόνια από τους κατοίκους με σχετικά χαμηλό εισόδημα. Τα τελευταία χρόνια, λόγω της σοβαρής οικονομικής κρίσης, παρατηρείται σημαντική αύξηση στη χρήση βιομάζας δεδομένου ότι η τιμή της καταγράφεται χαμηλότερη σε σχέση με το πετρέλαιο θέρμανσης

Από την άλλη πλευρά, σημαντικοί κοινωνικοί και περιβαλλοντικοί κίνδυνοι ενδέχεται να προκληθούν ως συνέπεια του πολύπλοκου μίγμα αέριων ρύπων που εκλύεται κατά την καύση ξυλείας [2]. Ειδικότερα, η εκτεταμένη χρήση βιομάζας μπορεί να οδηγήσει σε:

- ατμοσφαιρική ρύπανση (εντός ή εκτός του σπιτιού), που προκαλείται κυρίως από μονοξείδιο του άνθρακα, υδρογονάνθρακες και άλλους αέριους ρύπους.
- προβλήματα υγείας λόγω συστηματικής έκθεσης σε αυξημένες συγκεντρώσεις αερίων ρύπων, καθώς η ποιότητα της καύσης επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία, τον τύπο (σόμπα ή το τζάκι), την καμινάδα, την ταχύτητα καύσης, τη χρήση ακατάλληλων υλικών κλπ.
- υπερεκμετάλλευση των δασών μέσω της ανεξέλεγκτης κοπής των δένδρων για την απόκτηση ελεύθερης ξυλείας [3].

Στην βιβλιογραφία παρατίθενται αρκετές μελέτες για σύγχρονες μεθόδους και τεχνικές θέρμανσης χώρων και ζεστού νερού που θα μπορούσαν να ικανοποιήσουν τις σύγχρονες ενεργειακές απαιτήσεις με τις λιγότερες πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις [4, 5], ενώ μικρός αριθμός μελετών διερευνά το ρόλο της βιοενέργειας στις ορεινές και νησιώτικες κοινότητες της Μεσογείου [3, 6]. Κατά συνέπεια, η διεξαγωγή μιας ολιστικής μελέτης για την ποσοτικοποίηση και την αξιολόγηση των κοινωνικών, περιβαλλοντικών και οικονομικών επιπτώσεων της αυξημένης χρήσης βιομάζας ξυλείας για θέρμανση στις νησιώτικες αγροτικές κοινότητες, θα συμβάλει στην προσπάθεια για υιοθέτηση ενός αειφορικού μοντέλου ενεργειακής αξιοποίησης του υφιστάμενου δυναμικού.

Για την επίτευξη των στόχων της έρευνας επιλέχθηκε ως περίπτωση μελέτης ο Δήμος Ανωγείων. Βασικά κριτήρια επιλογής ήταν η τοποθεσία του στις παρυφές του ορεινού όγκου του Ψηλορείτη με το μεγαλύτερο ποσοστό της έκτασης του να χαρακτηρίζεται ως ορεινή (υψόμετρο 800m), οι αυξημένες ανάγκες για θέρμανσης και το υψηλό δυναμικό βιομάζας ξυλείας στην περιοχή [7].

Στα κύρια βήματα υλοποίησης της έρευνας περιλαμβάνονται:

- Η αξιολόγηση των επιπτώσεων από την χρήση παραδοσιακών μεθόδων θέρμανσης μέσω της διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων της ποιότητας του αέρα σε εσωτερικούς χώρους κατοικιών και το εξωτερικό περιβάλλον
- Η μελέτη των υφιστάμενων πρακτικών χρήσης της βιομάζας ξυλείας, με την υλοποίηση έρευνας πεδίου με συνεντεύξεις σε κατοίκους και επαγγελματίες της περιοχής μέσω δομημένου ερωτηματολογίου.
- Η παροχή κατάλληλων τεχνικών συμβουλών για την αναβάθμιση των υφιστάμενων συστημάτων θέρμανσης, την βελτίωση της ενεργειακής "συμπεριφοράς" των κατοίκων και την ενεργειακή αξιοποίηση των υπολειμμάτων βιομάζας της ευρύτερης περιοχής.
- Η διερεύνηση για την δημιουργία μονάδας παραγωγής μικροτεμαχιδίων ξύλου (π.χ. pellets, wood chips) στην ευρύτερη περιοχή των Ανωγείων.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μελέτη των υφιστάμενων πρακτικών βασίζεται στη διεξαγωγή έρευνας πεδίου στο Δήμο Ανωγείων σε δύο φάσεις, κατά τη διάρκεια της περιόδου Αύγουστος 2017 - Φεβρουάριος 2018, προκειμένου να καταγραφούν ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα σε σχέση με τη χρήση βιομάζας ξυλείας στην υπό μελέτη περιοχή. Στην παρούσα μελέτη παρατίθενται τα στοιχεία της Α’ φάσης της έρευνας, η οποία υλοποιήθηκε το χρονικό διάστημα από 27 Σεπτεμβρίου 2017 έως 8 Οκτωβρίου 2017. Αναλυτικά, η υλοποίηση της έρευνας περιλαμβάνει τις ακόλουθες δραστηριότητες:

- Έρευνα πεδίου για την καταγραφή των μεθόδων, των ποσοτήτων, της προέλευσης και του βαθμού χρήσης της βιομάζας ξυλείας στα νοικοκυριά και τις επιχειρήσεις εστίασης μέσω δομημένου ερωτηματολογίου.
- Διερεύνηση των βασικών γνώσεων/αντιλήψεων των κατοίκων και των επαγγελματιών της περιοχής σε σχέση με τη βιομάζα ξυλείας μέσω προσωπικών συνεντεύξεων.
- Επιτόπιες μετρήσεις της ποιότητας αέρα σε επιλεγμένες θέσεις (ανοικτούς χώρους, εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον κατοικιών) με την βοήθεια φορητών αναλυτών για την καταγραφή των συγκεντρώσεων αέριων ρύπων και αιωρούμενων σωματιδίων (CO_2, CO, NO, NO_2, VOC_S, PM1, PM2.5, PM4, PM10, TPM), υπό διαφορετικές μετεωρολογικές συνθήκες (θερινή, χειμερινή περίοδος).

Τα αποτελέσματα από την διαδικασία της έρευνας πεδίου και των πειραματικών μετρήσεων θα αποτελέσουν την βάση συζήτησης με τις τοπικές αρχές και τους πολίτες για την βελτίωση της υφιστάμενης κατάστασης με στόχο α) την επίδειξη των ορθών πρακτικών χρήσης της βιομάζας ξυλείας, β) την αναβάθμιση των συστημάτων θέρμανσης και την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, γ) την ανάδειξη επιχειρηματικών ευκαιριών για την αξιοποίηση των υπολειμμάτων βιομάζας ξυλεία και τη δημιουργία βιώσιμου τοπικού επιχειρηματικού μοντέλου.

Μετά την ολοκλήρωση της πιλοτικής δράσης αναμένεται να έχει επιτευχθεί η σύνδεση της ανάγκης για συστήματα θέρμανσης υψηλής ενεργειακής απόδοσης με την δυνατότητα αξιοποίησης του τοπικού δυναμικού υπολειμμάτων βιομάζας ξυλείας, η μείωση των εκπομπών CO_2 σε τοπικό επίπεδο και η διαμόρφωση μιας τεκμηριωμένης μελέτης σκοπιμότητας για την δημιουργία μικρής τοπικής μονάδας παραγωγής τεμαχιδίων ξυλώδους βιομάζας (wood chips, pellets).

2.1. Διεξαγωγή έρευνας μέσω ερωτηματολογίου

Για την επίτευξη των ειδικών στόχων της έρευνας, πραγματοποιήθηκαν επισκέψεις προκειμένου να καταγραφούν σημαντικές πληροφορίες και δεδομένα μέσω της συμπλήρωσης ειδικά δομημένων ερωτηματολογίων. Η έρευνα έλαβε χώρα την περίοδο 27 Σεπτεμβρίου 2017 – 8 Οκτωβρίου 2017 από κατάλληλα εκπαιδευμένη ομάδα ερευνητών. Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω προσωπικών συνεντεύξεων (face-to-face) σε 50 νοικοκυριά και 10 επιχειρήσεις εστίασης, με το δείγμα ελέγχου να είναι αντιπροσωπευτικό του πληθυσμού της περιοχής. Το δείγμα συνίσταται από: άνδρες & γυναίκες, ηλικίας άνω των 18 ετών, μόνιμους κάτοικους στο Δήμο Ανωγείων. Οι βασικές ενότητες του ερωτηματολογίου για τα νοικοκυριά είναι:

Α. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΟΙΚΙΑΣ/ΝΟΙΚΟΚΥΡΙΟΥ (αφορά τύπο, θέση, χρήση, ενοίκους)

Β. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΟΙΚΙΑΣ (αφορά τύπο καυσίμου, συστήματα, τεχνολογίες, κατανάλωση, προέλευση κλπ.), με υποενότητες:

- Β1 ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ
- Β1.1 ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ με εστίες καύσης παραδοσιακού ή νέου τύπου (π.χ. τζάκι παραδοσιακό, τζάκι ενεργειακό, θερμάστρα/σόμπα ξύλου, ενεργειακή σόμπα ξύλου).
- Β2 ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΕ ΑΛΛΕΣ ΧΡΗΣΕΙΣ, ΕΚΤΟΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Γ. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΡΩΤΩΜΕΝΟΥ

Οι βασικές ενότητες του ερωτηματολογίου για τους επαγγελματίες εστίασης είναι:

Α. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗΣ (αφορά τύπο, θέση, χρήση)

Β. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ (αφορά τύπο καυσίμου, συστήματα, τεχνολογίες, κατανάλωση, προέλευση κλπ.), με υποενότητες:

- Β1 ΧΡΗΣΕΙΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗΣ
- Β1.1 ΧΡΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΜΑΓΕΙΡΕΜΑ (π.χ. ξυλόφουρνος, ψησταριά)
- Β1.2 ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΟΥ ΧΩΡΟΥ με εστίες καύσης παραδοσιακού ή νέου τύπου (π.χ. τζάκι παραδοσιακό, τζάκι ενεργειακό, θερμάστρα/σόμπα ξύλου, ενεργειακή σόμπα ξύλου).

Γ. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΡΩΤΩΜΕΝΟΥ

2.2. Διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων

Κύριος στόχος των πειραματικών μετρήσεων είναι η μελέτη της ποιότητας του αέρα σε επιλεγμένες θέσεις (ανοικτούς χώρους, εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους κατοικιών) της περιοχής των Ανωγείων ώστε να χαρακτηριστούν τα επίπεδα συγκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων (PM1, PM2.5, PM4 ή Respirable, PM10, TPM) και των αέριων ρύπων (CO, CO_2, NO, NO_2, VOCs, εύφλεκτα αέρια) κατά την θερινή και την χειμερινή περίοδο, να καταστεί εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα σχετικά πρότυπα διεθνών οργανισμών και αποτελέσματα άλλων σχετικών μελετών και να εξεταστεί η επίδραση των μετεωρολογικών παραμέτρων (π.χ. θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου) στις καταγεγραμμένες μετρήσεις κατά την πειραματική διαδικασία. Ειδικότερα, η διαδικασία λαμβάνει χώρα στους εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους 50 κατοικιών, οι οποίες χρησιμοποιούν βιομάζας ξυλείας για τους σκοπούς της θέρμανσης και άλλων χρήσεων, ενώ επιπρόσθετες μετρήσεις έχουν προγραμματιστεί σε 6 ανοικτούς χώρους, οι οποίοι γειτνιάζουν με χώρους όπου παρατηρείται αυξημένη χρήση βιομάζας (π.χ. χώρους εστίασης, κατοικίες με παραδοσιακά τζάκια κλπ.) και μεγάλη επισκεψιμότητα καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικές παράμετροι και τα κύρια χαρακτηριστικά των φορητών οργάνων μέτρησης, η χρήση των οποίων διασφαλίζει την επιτυχή ολοκλήρωση των πειραματικών μετρήσεων:

Πίνακας 1: Βασικές παράμετροι και όργανα μέτρησης

Παράμετρος	Όργανο Μέτρησης	Εύρος Λειτουργίας
Θερμοκρασία	Kestrel 4500 NV (Pocket Weather Tracker)	-10 – 55 ^{o}C
Σχετική Υγρασία		0-100%
Ταχύτητα ανέμου		0 - 60m/s
Διεύθυνση ανέμου		0-360^{o}
Μονοξείδιο του άνθρακα (CO)	MX6 iBRID	0-1,000 ppm
Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)		0-5%
Μονοξείδιο του αζώτου (NO)		0-1,000 ppm
Διοξείδιο του αζώτου (NO_2)		0-100 ppm
Πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs)		0-2,000 ppm
Συγκέντρωση μάζας αιωρούμενων σωματιδίων εσωτερικού & εξωτερικού περ/ντος (PM1, PM2,5, PM4, PM10, TPM)	Dust Trak DRX 8534 (handheld)	0.001 – 150 mg/m^3
Εύφλεκτα αέρια	Ventis MX4	0-100% LEL

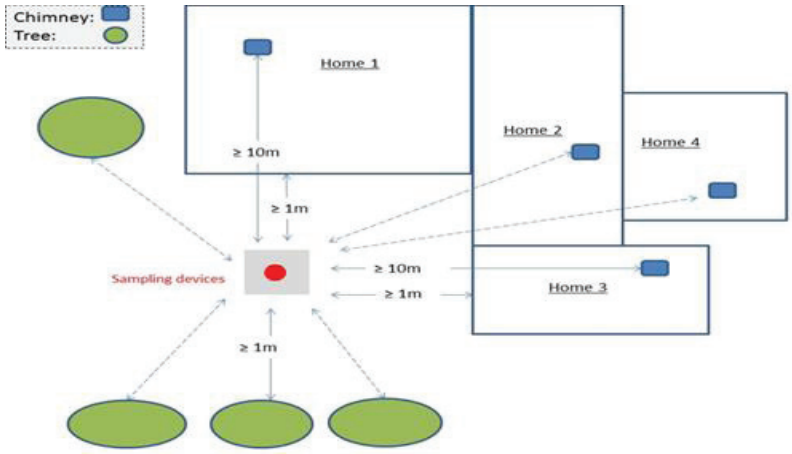
2.2.1. Πρωτόκολλο διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων

Η διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων στις επιλεγμένες θέσεις πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Η Α' φάση δειγματοληψίας υλοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της περιόδου 27 Σεπτεμβρίου - 8 Οκτωβρίου 2017, παράλληλα με την διεξαγωγή της έρευνας ερωτηματολογίου, με την διενέργεια επαναλαμβανόμενων πειραματικών μετρήσεων των εξεταζόμενων παραμέτρων. Στόχος της δειγματοληψίας ήταν ο έλεγχος της ποιότητας του αέρα πριν την έναρξη της περιόδου λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης στην υπό μελέτη περιοχή. Η Β' φάση δειγματοληψίας, θα λάβει χώρα κατά τη διάρκεια της περιόδου 20 Δεκεμβρίου 2017 - 20 Φεβρουαρίου 2018 με σκοπό την καταγραφή της μεταβολής των υπό παρακολούθηση παραμέτρων κατά την περίοδο αυξημένης χρήσης βιομάζας.

Για την ορθή διεξαγωγή των μετρήσεων στο περιβάλλον ελήφθησαν υπόψη τα παρακάτω κριτήρια:

- Δείγματα αέρα του εξωτερικού περιβάλλοντος δεν θα πρέπει να λαμβάνονται από σημεία που βρίσκονται σε απόσταση ≤ 1m από παρακείμενα κτίρια σύμφωνα με το πρότυπο ISO 16000-1.
- Κατά τη διάρκεια βροχόπτωσης δεν θα πρέπει να λαμβάνονται μετρήσεις λόγω του αυξημένου ποσοστού υγρασίας.

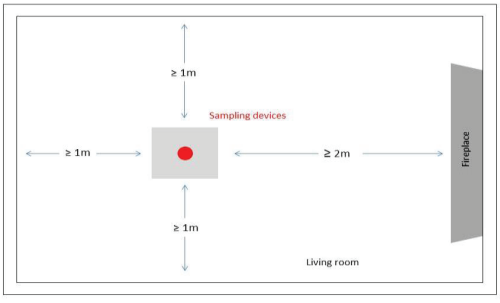
- Θα πρέπει να αποφεύγονται τα σημεία που είναι εκτεθειμένα σε ηλιακή ακτινοβολία.
- Θα πρέπει να αποφεύγονται σημεία στα οποία παρατηρείται δραστηριότητα ικανή να επηρεάσει την ποιότητα των λαμβανόμενων μετρήσεων (π.χ. οικοδομικές εργασίες).
- Θα πρέπει να αποφεύγονται σημεία τα οποία βρίσκονται απόσταση σε απόσταση ≤ 10m τοπικές πηγές παραγωγής ρύπων (π.χ. καπνοδόχους, κλιματιστικές μονάδες, συστήματα εξαερισμού).
- Η τοποθέτηση των οργάνων θα πρέπει να γίνεται σε απόσταση τουλάχιστον 1m από δέντρα και κάθετες επιφάνειες (π.χ. τοίχος) και σε ύψος από 1.5 – 2.0m από το επίπεδο του δρόμου (αναπνεύσιμο κλάσμα).



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση επιλογής θέσεων δειγματοληψίας

Οι θέσεις τοποθέτησης των οργάνων στους εσωτερικούς χώρους κατοικιών είναι συμβατές με τις απαιτήσεις που περιγράφονται στο πρότυπο ISO 16000-1. Το κέντρο του χώρου είναι το καταλληλότερο σημείο για την δειγματοληψία ωστόσο στις περιπτώσεις που αυτό δεν είναι εφικτό θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα:

- Η τοποθέτηση των οργάνων να γίνεται σε απόσταση τουλάχιστον 1m από τους τοίχους, 2m από την εστία καύσης και σε ύψος από 0.8 – 1.1m από το δάπεδο.
- Θα πρέπει να αποφεύγονται σημεία που είναι εκτεθειμένα σε ηλιακή ακτινοβολία.
- Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας θα πρέπει να αποφεύγεται η υλοποίηση παράλληλων δραστηριοτήτων, οι οποίες αναμένεται να επηρεάσουν την ποιότητα των λαμβανόμενων μετρήσεων (π.χ. λειτουργία απορροφητήρα, γενική καθαριότητα σπιτιού, κάπνισμα κλπ.).



Εικόνα 2: Σχηματική απεικόνιση κατάλληλης θέσης τοποθέτησης των οργάνων στον εσωτερικό χώρο κατοικίας

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο πλαίσιο διερεύνησης των υφιστάμενων πρακτικών χρήσης της βιομάζας ξυλείας, προέκυψε σημαντικός όγκος δεδομένων και αποτελεσμάτων. Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζεται μέρος των κυριότερων αποτελεσμάτων της έρευνας μέσω ερωτηματολόγιου και της Α' φάσης των πειραματικών μετρήσεων.

3.1. Ποιοτικά αποτελέσματα της έρευνας

3.1.1. Γενικά χαρακτηριστικά των κατοικιών

Η πλειοψηφία των κατοικιών του δείγματος είναι ιδιόκτητες μονοκατοικίες ή διπλοκατοικίες, με επιφάνεια 80 – 120 m^2, οι οποίες κατασκευάστηκαν την περίοδο 1960-1985. Οι κάτοικοι απασχολούνται κυρίως ως μισθωτοί/ελεύθεροι επαγγελματίες ή κτηνοτρόφοι με το μέσο οικογενειακό εισόδημα να μην ξεπερνά τις 20.000 €/έτος.

3.1.2. Ενεργειακά χαρακτηριστικά των κατοικιών

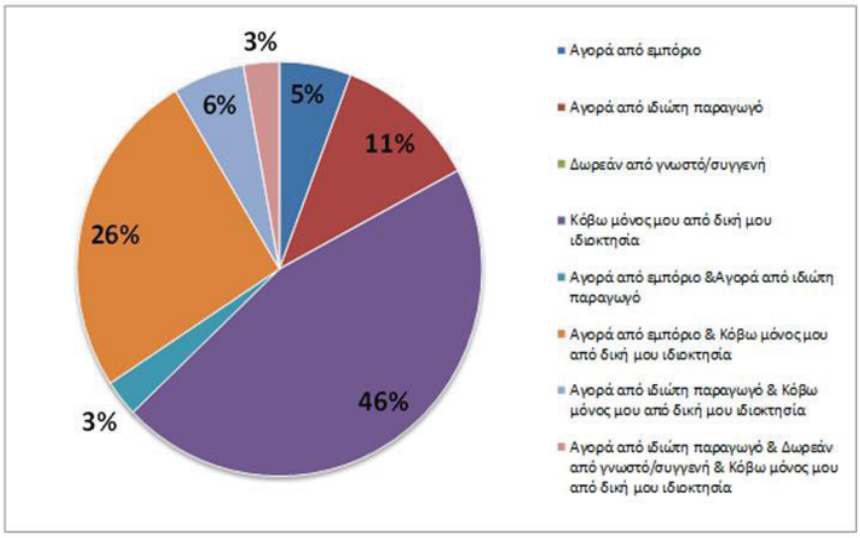
Η ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν μέσω της έρευνας έδειξε ότι το 31% των νοικοκυριών χρησιμοποιούν ως βασικό σύστημα θέρμανσης το ενεργειακό τζάκι, ενώ 28% κάνει χρήση θερμάστρας ξύλου/συσσωματωμάτων για την θέρμανση των χώρων της οικίας του (Πίνακας 2). Ωστόσο, επισημαίνεται το γεγονός ότι το 72% των νοικοκυριών της περιοχής χρησιμοποιεί συμπληρωματικό σύστημα θέρμανσης, με το παραδοσιακό τζάκι να αποτελεί τη πιο συνηθισμένη πρακτική (Πίνακας 2). Το 46% των νοικοκυριών του οικισμού χρησιμοποιεί βιομάζα ξυλείας που προέρχεται από δική τους ιδιοκτησία (κυρίως γεωργικών υπολείμματα - 85% κλαδέματα, κλπ.). Η περίοδος θέρμανσης στη περιοχή μελέτης είναι 6-8 μήνες και διαρκεί από τον μήνα Οκτώβριο έως τον μήνα Μάιο, με τη μέση ημερήσια διάρκεια λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης να κυμαίνεται από 12 έως 16 ώρες (έτη αναφοράς: 2015, 2016, 2017). Η μέση ετήσια ποσότητα κατανάλωσης καυσόξυλων ανά νοικοκυριό στην ορεινή περιοχή των Ανωγείων εκτιμάται στους 7-8 tn/έτος.

3.1.3. Χρήσεις βιομάζας ξυλείας για τη λειτουργία επιχειρήσεων εστίασης

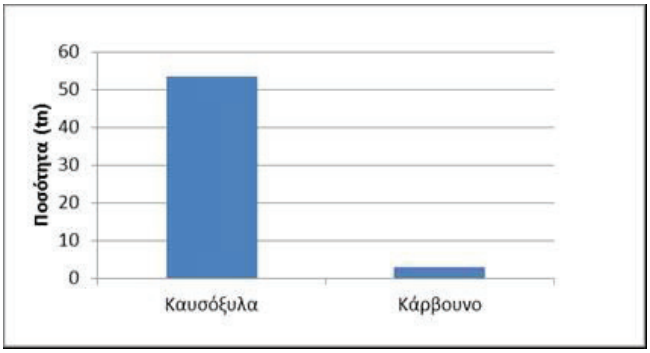
Τα αποτελέσματα της έρευνας για τους επαγγελματίες εστίασης υποδεικνύουν αυξημένη καύση βιομάζας ξυλείας για μαγείρεμα, με το 67% των επιχειρήσεων να χρησιμοποιεί ψησταριά σε καθημερινή βάση (κυρίως την θερινή περίοδο και την χειμερινή περίοδο) και τη σχετική διάρκεια χρήσης να κυμαίνεται από 8-10 ώρες. Το 46% των επιχειρήσεων εστίασης χρησιμοποιεί βιομάζα ξυλείας που προέρχεται από δική τους ιδιοκτησία, ενώ το 36% προμηθεύεται την βιομάζα ξυλείας από το εμπόριο. Επιπλέον, η συνολική ποσότητα καυσόξυλων που απαιτήθηκε για την κάλυψη των αναγκών κατά την διάρκεια του τελευταίου έτους ήταν ίση 53,5 tn (Εικόνα 4).

Πίνακας 2: Βαθμός χρήσης των κύριων τεχνολογιών θέρμανσης

Κύριες τεχνολογίες θέρμανσης	**Είδος χρήσης**	
	Βασικό σύστημα (n=50)	Συμπληρωματικό σύστημα (n=36)
Τζάκι παραδοσιακό	3%	47%
Τζάκι ενεργειακό	31%	3%
Θερμάστρα ξύλου ή συσσωματωμάτων	29%	17%
Κεντρική Θέρμανση (πετρέλαιο)	26%	11%
Θερμάστρα πετρελαίου	3%	0%
Θερμάστρα ηλεκτρική	0%	19%
Θερμάστρα υγραερίου	0%	0%
Συσκευές κλιματισμού	0%	3%
Αντλία θερμότητας	0%	0%
Θερμοσυσσωρευτές	0%	0%
Άλλο (Λέβητας Βιομάζας-πυρηνόξυλου ελιάς)	9%	0%



Εικόνα 3: Προέλευση της χρησιμοποιούμενης βιομάζας στα νοικοκυριά του Δήμου Ανωγείων

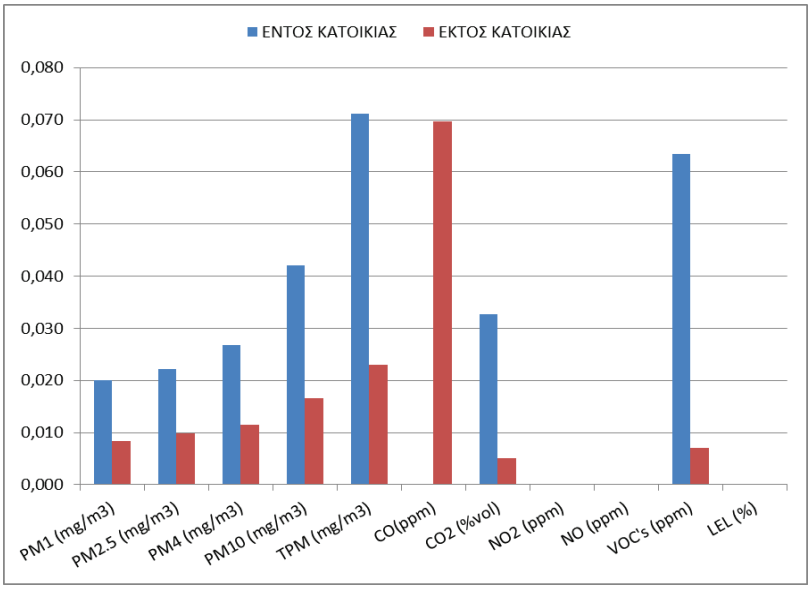


Εικόνα 4: Ποσότητες βιομάζας ξυλείας που χρησιμοποιήθηκαν από τους επαγγελματίες εστίασης στο Δήμο Ανωγείων (έτος αναφοράς 2017)

3.2. Ποσοτικά αποτελέσματα της διαδικασίας διεξαγωγής πειραματικών μετρήσεων

Η Α' φάση δειγματοληψίας υλοποιήθηκε κατά την περίοδο 27 Σεπτεμβρίου - 8 Οκτωβρίου 2017, με σκοπό τον έλεγχο της ποιότητας του αέρα εντός και εκτός των κατοικιών στην υπό μελέτη περιοχή πριν την έναρξη της περιόδου λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης. Αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις προβλέπεται να λάβουν χώρα κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης ώστε να καταστεί δυνατή η αξιολόγηση του βαθμού επίδρασης στην ποιότητα του αέρα από την αυξημένη χρήση στερεών καυσίμων βιομάζας σε επιλεγμένες θέσεις.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων παρουσιάζονται συνοπτικά στην παρακάτω γραφική απεικόνιση (Εικόνα 5).



Εικόνα 5: Γραφική απεικόνιση των μέσων τιμών συγκέντρωσης των παραμέτρων ελέγχου αέριας ρύπανσης εντός και εκτός των κατοικιών.

Κατά την θερινή περίοδο, η συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα (CO) ανιχνεύθηκε σε χαμηλά επίπεδα εντός και εκτός των κατοικιών, με τα αποτελέσματα να βρίσκονται εντός των ορίων που θέτει η Ευρωπαϊκή και η Εθνική νομοθεσία (10 mg/m^3 - μέγιστη ημερήσια τιμή - οκτάωρη έκθεση). Όσον αφορά τις συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα (CO_2), πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) και οξειδίων του αζώτου (NO, NO_2), οι τιμές που προέκυψαν καταγράφονται επίσης εντός των ορίων ασφαλούς έκθεσης. Τα παραπάνω αποτελέσματα χαρακτηρίζονται ως αναμενόμενα, δεδομένου ότι την περίοδο διεξαγωγής της Α' φάσης δεν είχαν τεθεί σε λειτουργία τα συστήματα θέρμανσης, και οι όποιες καταγραφές προκύπτουν ως αποτέλεσμα της κίνησης οχημάτων εντός του οικισμού.

Οι συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων (PM1, PM2,5, PM4, PM10, TPM) παρατηρήθηκαν σημαντικά υψηλότερες στους εσωτερικούς χώρους των κατοικιών σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές στους εξωτερικούς χώρους, με την τάση αυτή σημειώνεται στο σύνολο των καταγεγραμμένων μετρήσεων. Ενδεικτικά, η μέση τιμή συγκέντρωσης των σωματιδίων PM10 για τους εξωτερικούς και τους εσωτερικούς χώρους ήταν 0.017 mg/m^3 και 0.042 mg/m^3, αντίστοιχα. Συγκρίνοντας τα παραπάνω αποτελέσματα με τα όρια ασφαλείας που έχουν τεθεί, παρατηρήθηκε ότι οι προσδιορισθείσες τιμές στους εσωτερικούς χώρους ήταν οριακά χαμηλότερες από το όριο 0.05 mg/m^3 (μέση ημερήσια τιμή, να μην υπερβαίνεται περισσότερο από 35 φορές το χρόνο). Αντίστοιχα, η μέση τιμή συγκέντρωσης των σωματιδίων PM2.5, που θεωρούνται ως τα πλέον επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία, σημειώθηκε εντός των κατοικιών ίση με 0.022 mg/m^3, και εκτός των κατοικιών ίση με 0.010 mg/m^3. Τα παραπάνω αποτελέσματα χαρακτηρίζονται ως αναμενόμενα, ωστόσο σημαντικά ευρήματα αναμένεται να προκύψουν έπειτα από τη διεξαγωγή της Β' φάσης, κατά την περίοδο λειτουργίας των συστημάτων θέρμανσης, από την σύγκριση των μετρήσεων για τις δύο περιόδους.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η βιομάζα ξύλου είναι παραδοσιακά μια βασική πηγή ενέργειας για την θέρμανση και το μαγείρεμα, ειδικά για τις ορεινές και αγροτικές κοινότητες της Μεσογείου. Ωστόσο, η εκτεταμένη χρήση της μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις - ατμοσφαιρική ρύπανση και προβλήματα υγείας λόγω των εκπομπών από τη διαδικασία καύσης. Τα αποτελέσματα από την πρώτη φάση της έρευνας πεδίου έδειξαν ότι περίπου το 70% των νοικοκυριών της περιοχής μελέτης, στα Ανώγεια Κρήτης, χρησιμοποιούν βιομάζα ξυλείας για τους σκοπούς της θέρμανσης σε συστήματα με χαμηλή

ενεργειακή απόδοση (έως και 25%), με αποτέλεσμα μεγάλες ποσότητες καυσόξυλων να καταναλώνονται ετησίως.

Η ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων ποιότητας του αέρα έδειξε σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις PM10 κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου, κυρίως εντός των κατοικιών. Ακόμη, η καύση βιομάζας ξύλου σε παραδοσιακά τζάκια ή σόμπες ξύλου αναμένεται να επιβαρύνει σημαντικά την ποιότητα του αέρα με σωματίδια και άλλους αέριους ρύπου τους εσωτερικούς χώρους των κατοικιών που χρησιμοποιούν παραδοσιακές εστίες καύσης. Το εισόδημα των νοικοκυριών φαίνεται να επηρεάζει την επιλογή του συστήματος θέρμανσης, καθώς οι περισσότεροι κάτοικοι που ασχολούνται με γεωργικές δραστηριότητες ή είναι συνταξιούχοι χρησιμοποιούν κυρίως εστίες θέρμανσης παραδοσιακού τύπου.

Συνεπώς, η παροχή κατάλληλων τεχνικών συμβουλών για την αναβάθμιση των υφιστάμενων συστημάτων θέρμανσης, την βελτίωση της ενεργειακής "συμπεριφοράς" των κατοίκων και την αξιοποίηση των υπολειμμάτων βιομάζας της ευρύτερης περιοχής καθίσταται επιτακτική ώστε να βελτιωθεί η υφιστάμενη κατάσταση και να διασφαλιστεί η ποιότητα του περιβάλλοντος στην ευρύτερη περιοχή. Ειδικότερα, η μετατροπή των συμβατικών εστιών καύσης ξύλου (τζάκια/ σόμπες) σε ενεργειακές εστίες υψηλής απόδοσης (ενεργειακά τζάκια/ σόμπες- βαθμός απόδοσης έως 90%) θα συμβάλει στην εξοικονόμηση πρώτης ύλης (βιομάζα ξυλείας), με συνέπεια τη μείωση της κοπής δέντρων και τη βελτίωση της ποιότητας του αέρα στους εσωτερικούς χώρους δεδομένου ότι τα ενεργειακά τζάκια ή σόμπες εκλύουν πολύ χαμηλότερες εκπομπές αερίων ρύπων. Επιπλέον, η λειτουργία μονάδας παραγωγής μικροτεμαχιδίων ξύλου (π.χ. pellets, wood chips) για την αξιοποίηση του τοπικού δυναμικού ξυλώδους βιομάζας θα μπορούσε να αποτελέσει ικανή απάντηση για την μείωση του κόστους θέρμανσης των νοικοκυριών στην περιοχή και την αντιμετώπιση των επιπτώσεων τη χρήση κακής ποιότητας καυσίμων βιομάζας (ανεπεξέργαστο πυρηνόξυλο ελίας), ενώ παράλληλα θα μπορούσε να ενισχύσει την τοπική οικονομία.

Η μελέτη υλοποιείται στο πλαίσιο της Ευρωπαϊκής πρωτοβουλίας “COMPOSE – Rural communities engaged with positive energy”, και συγχρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης στο πλαίσιο του προγράμματος INTERREG MED.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Vamvuka, D., Tsoutsos, T., 2002, “Energy exploitation of biomass residues in the island of Crete”, Ener. Explor. Exploit., 20(1), pp. 113-120.

[2] Reisen, F., Meyer, C.P., McCaw, L., Powell, J.C., Tolhurst, K., Keywood, M. D., Gras, J.L., 2011, “Impact of smoke from biomass burning on air quality in rural communities in southern Australia“, J. Atmosph. Environ. , 45(24), pp. 3944-3953.

[3] Charalambous, A., Kordatos, H., Tsoutsos, T., Tournaki, S., Charalambides, A., “Potential, Origin and Utilization of Wood Biomass in Cyprus - Case Study of a Practice Followed in Many Island Communities in Europe“, 19th European Biomass Conference and Exhibition, 6-10 June 2011, Berlin, Germany

[4] Vallios, I., Tsoutsos,T., Papadakis, G., 2009, “Design of Biomass District Heating Systems”, J. Biomass and Bioenergy, 33(4), pp. 659-678

[5] Vallios, I., Tsoutsos, T., Papadakis, G., 2016, “A software for technical and economical assessment of biomass district heating systems”, I. J. Sustain. Ener. , 35(3), pp. 267-294.

[6] Koukios, E.G., Pyrgiotis, L.A., Tsoutsos, T.D., Christensen, M.N., "The role of bioenergy in the energy system of Aperathou village", Energy, 16 (9), pp. 1213-1214.

[7] Municipality of Anogeia, 2014, “Sustainable Energy Action Plan“.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΥΣΗΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΜΠΗΚΤΩΝ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΞΥΛΟΥ (PELLETS) ΠΟΥ ΚΥΚΛΟΦΟΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΑΓΟΡΑ

Βασιλική Καμπερίδου[1*], Ιωάννης Μπαρμπούτης[1]

[1] Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
*e-mail: vkamperi@for.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αξιοποίηση της ξυλώδους βιομάζας στην παραγωγή βιοκαυσίμων και ενέργειας, μπορεί να προσφέρει πλήθος περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών ωφελειών, ειδικά όταν πραγματοποιείται υπό τις κατάλληλες συνθήκες. Τα τελευταία χρόνια, η χρήση σύμπηκτων ξυλώδους βιομάζας (pellets) για παραγωγή ενέργειας και ηλεκτρισμού έλκει το ενδιαφέρον των καταναλωτών και παρουσιάζει ιδιαίτερη αύξηση η κατανάλωσή τους σε Βόρεια Αμερική, Ευρώπη, καθώς και στη χώρα μας. Ελάχιστες είναι οι ελληνικές επιχειρήσεις που παράγουν σύμπηκτα, εξαιτίας των πολύ χαμηλών τιμών των σύμπηκτων γειτονικών χωρών (Βουλγαρία, Αλβανία κτλ.), ενώ η απουσία ελέγχου των χαρακτηριστικών των σύμπηκτων που εισάγονται νόμιμα ή παράνομα μπορεί να οδηγήσει στην πιθανή κατανάλωση αμφιβόλου ποιότητας σύμπηκτων με πιθανότητα επιβλαβών συνεπειών στην υγεία, την ατμόσφαιρα, αλλά και πρόκληση φθοράς στον εξοπλισμό καύσης. Η παρούσα έρευνα εξετάζει για πρώτη φορά τα χαρακτηριστικά σύμπηκτων που κυκλοφορούν στο ελληνικό εμπόριο (Βόρεια Ελλάδα), όπως το ποσοστό περιεχόμενης τέφρας, που αποτελεί τον υψηλότερης σημασίας παράγοντα σύμφωνα με τα αντίστοιχα διεθνή πρότυπα που αφορούν στα βιοκαύσιμα, σύμφωνα με τον οποίο το υλικό κατατάσσεται σε διαφορετικές κατηγορίες επιτρεπόμενης χρήσης (οικιακή, βιομηχανική κτλ.), αλλά εξετάζεται και η συνεκτικότητα (μηχανική αντοχή), ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας και η χωρική πυκνότητα των σύμπηκτων, με σκοπό να εξαχθούν συμπεράσματα για την καταλληλότητα καύσης των συγκεκριμένων σύμπηκτων.

Λέξεις Κλειδιά: *μηχανική αντοχή, σύμπηκτα βιομάζας, τέφρα, χωρική πυκνότητα*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ανέκαθεν, η παραγωγή ενέργειας αποτελούσε θέμα μείζονος σημασίας για τον άνθρωπο, καθώς θεωρείται καθοριστική για την ύπαρξη και την εξέλιξή του. Κυρίως μετά τη βιομηχανική επανάσταση, το μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας προέρχεται από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αποφέροντας αρνητικές συνέπειες στην ατμόσφαιρα και στο περιβάλλον και σταδιακή εξάντληση των πηγών ορυκτών πρώτων υλών, τα οποία σε συνδυασμό με τις εθνικές δεσμεύσεις έναντι της Ε.Ε. περί της χρήσης βιοκαυσίμων (Οδηγία 2003/30/ΕΚ), της υποκατάστασης μέρους της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και βιομάζα (οδηγία 2001/77/EC) και της ευθυγράμμισης της χώρας με τις υποχρεώσεις του Πρωτοκόλλου του Κιότο, οδηγούν στην αναζήτηση βιώσιμων λύσεων παραγωγής και χρήσης στερεών βιοκαυσίμων [1].

Σε σύγκριση με άλλες πηγές καυσίμων, το ξύλο είναι 99% εύφλεκτο σε ξηρή κατάσταση και η φθηνότερη, η πλέον προσιτή πηγή ενέργειας, διαθέσιμη 24 ώρες/ημέρα, χωρίς να επηρεάζεται από ανεξέλεγκτους παράγοντες [2, 3]. Το εύφλεκτο του ξύλου εξαρτάται από διάφορους παράγοντες: είδος, υγρασία, θερμοκρασία, διαστάσεις [4]. Η παρουσία υγρασίας ελαττώνει τη θερμαντική αξία, ενώ η πυκνότητα και η παρουσία εκχυλισμάτων (ρητίνης) και λιγνίνης την αυξάνει [5, 6]. Ο φλοιός παρουσιάζει συνήθως υψηλότερη περιεκτικότητα σε τέφρα από το ξύλο και η υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα συνδέεται με χαμηλότερη θερμαντική αξία [7].

Τα σύμπηκτα βιομάζας (pellets) αποτελούν τυποποιημένο βιολογικό καύσιμο, για την παρασκευή του οποίου, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του αντίστοιχου προτύπου, δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται κόλλες ή χημικά πρόσθετα, παρά μόνο υψηλή πίεση και ατμός, γεγονός που τα καθιστά απόλυτα φιλικά προς το περιβάλλον [8]. Η μόνη ουσία που λειτουργεί ως συγκολλητική ουσία για το τελικό προϊόν, μετά από τη θερμή συμπίεση, είναι η λιγνίνη. Το σχηματιζόμενο προϊόν χαρακτηρίζεται από υψηλή συνοχή, χαμηλό ποσοστό υγρασίας (<10%) (ISO 18134), έως 2% τέφρας (ISO 18122 - οικιακή χρήση) και μεγάλη πυκνότητα (>650 kgr/m3)(ISO 17828), γεγονός που επιτρέπει την καύση και την υψηλή θερμαντική του απόδοση (4063-4541 Kcal/Kg) [9]. Επιπλέον, οι μικρές του διαστάσεις επιτρέπουν την εύκολη αποθήκευση και χειρισμό του.

Η περιεκτικότητα σε τέφρα ποικίλλει μεταξύ δασικών ειδών και μεταξύ περιοχών του ιδίου είδους, ενώ αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά καυσίμων, δεδομένου ότι ως υποπροϊόν της καύσης, καταλήγει ως στάχτη εναπομένουσα στον πυθμένα ή αιωρούμενη στον αέρα. Η τέφρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή άλλων προϊόντων και η γνώση του ποσοστού περιεχόμενης τέφρας ενός καυσίμου, επιφέρει οικονομικές συνέπειες. Επιπλέον, η χημική σύνθεση της τέφρας μπορεί να συμβάλλει στη σκωρία και στη διάβρωση του εξοπλισμού καύσης (καυστήρες κτλ.), και να αναγκάζει τον χρήστη να καθαρίζει πολύ συχνότερα τον εξοπλισμό καύσης και είναι συνεπώς σημαντικό να γνωρίζουμε το ποσοστό τέφρας που περιέχεται στο καύσιμο. Είναι χαρακτηριστικό το γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει πολύ αυστηρές οι προδιαγραφές των προτύπων που αφορούν στο ποσοστό περιεχόμενης τέφρας του υλικού που προορίζεται για παραγωγή σύμπηκτων, καθώς οι κατηγορίες που αφορούν σύμπηκτα οικιακής χρήσης αναφέρουν επιτρεπόμενο όριο έως 2%, ενώ όριο για χρήση βιομηχανική είναι το 3% (ISO 17225-2).

Η μηχανική αντοχή είναι ένα μέτρο της αντίστασης των συμπιεσμένων καυσίμων προς τους κραδασμούς και / ή την τριβή ως συνέπεια των διαφόρων χειρισμών και της μεταφοράς. Αποτελεί μεγάλης σημασίας χαρακτηριστικό ποιότητας των σύμπηκτων, καθώς μπορεί να οδηγεί σε απώλεια υλικού κατά την αποθήκευση, μεταφορά, αλλαγή συσκευασίας κτλ. και επηρεάζει την συνεχόμενη ροή και την σωστή καύση του υλικού μέσα στο σύστημα των καυστήρων.

Η χωρική πυκνότητα είναι μια σημαντική παράμετρος για τη χρήση καυσίμων με βάση τον όγκο και σε συνδυασμό με την καθαρή θερμογόνο δύναμη καθορίζουν την ενεργειακή πυκνότητα. Επίσης, διευκολύνει την εκτίμηση των απαιτήσεων χώρου για τη μεταφορά και την αποθήκευση. Τα στερεά καύσιμα συνήθως μεταφέρονται και αποθηκεύεται σε δοχεία ή σιλό μεγάλων διαστάσεων, όπου δημιουργείται υψηλό φορτίο μάζας που οδηγεί σε αυξημένη πίεση φορτίου και σε καθίζηση του υλικού, το οποίο μπορεί επίσης να ενισχυθεί επιπροσθέτως από τους κραδασμούς κατά τη μεταφορά. Επιπλέον, οι εργασίες γεμίσματος ή εκφόρτωσης στην πράξη συνήθως εφαρμόζουν μεγάλο βάθος πτώσης, το οποίο έχει επίσης ως αποτέλεσμα μια αντίστοιχα υψηλότερη συμπύκνωση λόγω της αυξημένης κινητικής ενέργειας των σωματιδίων που πέφτουν. Μία διαδικασία που εφαρμόζει ένα ελεγχόμενο «σοκ πτώσης» στο δείγμα πιστεύεται ότι αντανακλά την πρακτικά επικρατούσα πυκνότητα όγκου με έναν καλύτερο τρόπο από μια μέθοδο χωρίς «σοκ πτώσης». Αυτό ισχύει ιδιαίτερα όταν η μάζα ενός καυσίμου που παραδίδεται, πρέπει να εκτιμηθεί από το φορτίο όγκου ενός οχήματος

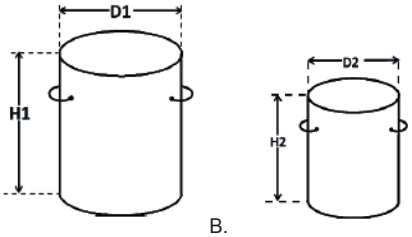
μεταφοράς, το οποίο είναι μια κοινή διαδικασία σε πολλές χώρες. Για μια συνοπτική εκτίμηση της ευαισθησίας των διαφόρων στερεών βιοκαυσίμων προς την έκθεση σε κραδασμούς, ορισμένα στοιχεία έρευνας που παρατίθεται στο αντίστοιχο πρότυπο, δείχνουν συμπίεση μεταξύ 6% και 18% για τα καύσιμα βιομάζας [10].

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι να ελεγχθούν για πρώτη φορά κάποια από τα πιο κρίσιμα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά, καθώς και χαρακτηριστικά καύσης, σύμπηκτων που κυκλοφορούν στο ελληνικό εμπόριο, όπως η περιεχόμενη τέφρα, συνεκτικότητα και μηχανική αντοχή, η χωρική πυκνότητα και το ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας, ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για κατά πόσο είναι αληθείς οι πληροφορίες που αναγράφονται στις συσκευασίες πώλησης σύμπηκτων που συναντώνται στην ελληνική αγορά για χαμηλά ποσοστά τέφρας, υγρασίας, υψηλής μηχανικής αντοχής κτλ. και γενικά, για την ποιότητα των σύμπηκτων που κάνει χρήση ο Έλληνας καταναλωτής.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η συλλογή του ερευνητικού υλικού, πραγματοποιήθηκε δειγματοληπτικά ερχόμενοι σε επαφή με έναν μεγάλο αριθμό επιχειρήσεων εμπορίας, αλλά και καταναλωτών σύμπηκτων της Βορείου Ελλάδας. Εντοπίστηκαν και περιλήφθηκαν στο πείραμα οι 21 εταιρείες που χρησιμοποιούνται κατά κόρον από πωλητές και καταναλωτές. Η προέλευση των σύμπηκτων είναι διαφόρων χωρών (Φιλανδία, Σουηδία, ΗΠΑ, Βουλγαρία, Αλβανία, Τουρκία κ.α.). Επιλέχθηκε το βόρειο τμήμα της χώρας, καθώς συνορεύει με χώρες νόμιμης, αλλά συχνά και παράνομης εισαγωγής σύμπηκτων και έχουν εκφραστεί υπόνοιες στο παρελθόν ότι τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που αναγράφονται στις συσκευασίες δεν είναι απόλυτα αληθή. Σε κάθε περίπτωση, γινόταν προμήθεια αρκετά μεγάλου αριθμού σύμπηκτων (περίπου 1 τσουβάλι 15 kg / περίπτωση), ώστε να γίνουν όλοι οι απαραίτητοι ποιοτικοί έλεγχοι (ποσοστό τέφρας, χωρική πυκνότητα, υγρασία, συνοχή και μηχανική αντοχή), οι οποίοι περιγράφονται παρακάτω.

Η χωρική πυκνότητα των στερεών βιοκαυσίμων υπόκειται σε διακυμάνσεις λόγω διαφόρων παραγόντων όπως οι κραδασμοί, η πίεση, η βιοαποικοδόμηση, η ξήρανση και η διαβροχή. Επομένως, η μετρούμενη χωρική πυκνότητα μπορεί να αποκλίνει από τις πραγματικές συνθήκες κατά τη μεταφορά, αποθήκευση ή μεταφόρτωση. Η μέτρηση της χωρικής πυκνότητας των σύμπηκτων βασίζεται στη διαδικασία που περιγράφεται στο αντίστοιχο πρότυπο, ISO 17828: 2015.



Εικόνα 1 Α. Μεγάλο δοχείο μέτρησης χωρικής πυκνότητας: διάμετρος 360 mm και ύψος 491 mm, Β. Μικρό δοχείο: διάμετρος 167 mm και ύψος 228 mm

Δύο τυποποιημένα δοχεία γνωστών διαστάσεων και σχήματος (Εικόνα 1) γεμίζονται με το προς μέτρηση υλικό μέχρι επάνω, χωρίς να προεξέχει του δοχείου, συμπυκνώνεται με καθορισμένη έκθεση σε κραδασμούς και στη συνέχεια μετριέται το βάρος του. Η ολική χωρική πυκνότητα υπολογίζεται από το καθαρό βάρος ανά πρότυπο όγκο και αναφέρεται με την καθορισμένη περιεκτικότητα του υλικού σε υγρασία. Η τιμή της χωρικής πυκνότητας προσδιορίζεται βάση της παρακάτω εξίσωσης (1):

$$BD_{ar} = (m_2 - m_1) / V \quad (1)$$

Όπου, BD_{ar} : η χωρική πυκνότητα (kg/m^3), m1: η μάζα του άδειου δοχείου μέτρησης (kg), m_2: η μάζα του γεμάτου με σύμπηκτα δοχείου μέτρησης (kg), V: ο καθαρός όγκος του δοχείου μέτρησης (m^3). Πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις για κάθε κατηγορία υλικού και υπολογίστηκε ο μέσος όρος των τιμών.

Για τον προσδιορισμό της μηχανικής αντοχής των σύμπηκτων χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία που περιγράφεται αναλυτικά στο διεθνές πρότυπο ISO 17831-1:2015 (Part1: Pellets). Δύο δείγματα υλικού σύμπηκτων των 500 ± 10 g τοποθετούνται στις ειδικές θήκες/δοχεία που φέρει η συσκευή ελέγχου μηχανικής αντοχής, τα οποία στριφογυρίζουν, με αποτέλεσμα τα σύμπηκτα να υπόκεινται σε συγκεκριμένης έντασης και διάρκειας κίνηση και τριβή μεταξύ τους, αλλά και με τα τοιχώματα των περιστρεφόμενων δοχείων (500 στροφές) (Εικόνα 2Α). Η τιμή της μηχανικής αντοχής των σύμπηκτων προκύπτει μετά από τον προσδιορισμό του τμήματος του υλικού που απομένει μετά τη διαδικασία κοσκίνισης (κόσκινο οπής διαμέτρου 3,15 mm, Εικόνα 2Β) και αφαίρεσης του κατεστραμμένου, πολύ λεπτόκοκκου υλικού, σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση (2):

$$DU= (m_A / m_E) *100 \quad (2)$$

Όπου, DU: η μηχανική αντοχή του υλικού σε ποσοστό (%), m_E: η μάζα του αρχικού δείγματος πριν τη διαδικασία ελέγχου (g), m_A: η μάζα του κοσκινισμένου υλικού μετά τη διαδικασία ελέγχου (g). Πραγματοποιήθηκαν δύο μετρήσεις μηχανικής αντοχής για κάθε κατηγορία σύμπηκτων και υπολογίστηκε ο μέσος όρος αυτών.

A.  B. 

Εικόνα 2 Α. Συσκευή προσδιορισμού μηχανικής αντοχής σύμπηκτων, Β. κόσκινο οπής 3,15 mm

Για τον προσδιορισμό της τέφρας χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία του προτύπου EN14775:2010 (Εικόνα 3). Οι πρώτες ύλες των σύμπηκτων θρυμματίστηκαν με τη βοήθεια ενός φορητού σπαστήρα «Chipper». Οι διαστάσεις των κομματιών μειώθηκαν σε αντιπροσωπευτικό δείγμα περίπου 0,5 kg και αλέστηκαν χρησιμοποιώντας μύλο Willey με κόσκινο 0,7 mm. Για να διασφαλιστεί πλήρης αποτέφρωση, η διαδικασία επαναλαμβάνονταν, μέχρι οι μεταβολές της μάζας να είναι <0,2mg. Η περιεκτικότητα σε τέφρα σε ξηρή βάση υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση (3):

$$Ad= [(m_3 - m_1) / (m_2 - m_1)] * 100 \quad (3)$$

Όπου, Ad: ποσοστό τέφρας (%), m_1: μάζα χωνευτηρίου (g), m_2: μάζα χωνευτηρίου μαζί με ξηρό δείγμα (g), m_3: μάζα χωνευτηρίου μαζί με τέφρα (g).

Πραγματοποιήθηκαν 3 επαναλήψεις για κάθε υλικό.



Εικόνα 3 Κλίβανος αποτέφρωσης

Η περιεκτικότητα σε υγρασία προσδιορίστηκε σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 18134-1:2015 (μέρος 1, 2 και 3) που αφορά στον προσδιορισμό περιεχόμενης υγρασίας στερεών βιοκαυσίμων μέσω της ξηρής μεθόδου προσδιορισμού υγρασίας με χρήση κλιβάνου. Συγκεκριμένα, η συλλογή των δειγμάτων πραγματοποιείται σύμφωνα με το πρότυπο δειγματοληψίας, βασική αρχή του οποίου είναι η διατήρηση της σύνθεσης του δείγματος σε σχέση με το πρωτότυπο υλικό κατά τη διάρκεια των διαφόρων σταδίων. Πραγματοποιείται παραγωγή ξυλόσκονης για κάθε διαφορετική κατηγορία υλικού με χρήση μύλου τύπου Wiley, ανάμιξη του δείγματος και ζύγισή του με κλίμακες με ακρίβεια τουλάχιστον 0,1 g. Επίσης, ζυγίζεται το κενό δοχείο ξήρανσης (m1). Το μέγεθος του δείγματος πρέπει να είναι τουλάχιστον 300 g για τα σύμπηκτα, ενώ το στρώμα σωματιδίων του δείγματος δεν πρέπει να είναι πολύ παχύ (<31,5 mm (ονομαστικό ύψος κορυφής). Το δείγμα σκόνης αμέσως μετά τη ζύγιση (τιμή m_2) ξηραίνεται σε κλίβανο σε θερμοκρασία 105°C ± 2°C, με την βαλβίδα εξαερισμού του φούρνου (βαλβίδα εξαγωγής) ανοιχτή, ώστε ο υγρός αέρας να βγαίνει από αυτόν ελεύθερα, μέχρι σταθερού βάρους (όχι περισσότερο από 24 ώρες). Αμέσως μετά την ξήρανση, το δείγμα ξαναζυγίζεται (τιμή ζύγισης m_3) και ο υπολογισμός της υγρασίας (M_{ar}) με υγρή βάση γίνεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4:

$$M_{ar} = [(m_2-m_3) / (m_2 -m_1)] * 100 \quad (4)$$

'Οπου M_{ar}: η υγρασία όπως ελήφθη (w-%) , m_1: βάρος του δοχείου ξήρανσης (g), m_2: το συνδυασμένο βάρος δοχείου και δείγματος πριν από την ξήρανση (g), m_3: το βάρος του δοχείου ξήρανσης μαζί με το βάρος του δείγματος μετά την ξήρανση (g).
Η τελική τιμή υπολογίζεται με ακρίβεια 0,1 ποσοστιαίων μονάδων και μία μέτρηση είναι αρκετή (EN ISO 18134-2).

Οι μέσοι όροι των τιμών και η στατιστική ανάλυση της μεταβλητότητας των μέσων όρων των τιμών υπολογίστηκαν με χρήση του στατιστικού πακέτου SPSS Statistics.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας που παρατίθενται στον πίνακα 1, η υγρασία των δειγμάτων κυμάνθηκε σε χαμηλό επίπεδο, μεταξύ 3,32 και 10,37%. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προτύπου ISO 18134, το ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας σύμπηκτων θα πρέπει να είναι αρκετά ,χαμηλό ≤10% όταν αυτά προοριζονται για οικιακή χρήση. Συνεπώς, με εξαίρεση την κατηγορία σύμπηκτων 3, όλες οι υπόλοιπες κατηγορίες σύμπηκτων πληρούν την απαίτηση της χαμηλής περιεχόμενης υγρασίας.

Επίσης, τα περισσότερα είδη σύμπηκτων που εξετάστηκαν, εμφάνισαν ικανοποιητικές τιμές χωρικής πυκνότητας (536,325 – 728,375 kg/m^3), το οποίο αποτελεί ένα χαρακτηριστικό των στερεών βιοκαυσίμων μεγάλης σημασίας, καθότι δύνανται να τοποθετηθούν και να μεταφερθούν μεγαλύτερες ποσότητες καυσίμου σε μικρότερη συσκευασία, αλλά και να αποθηκευθούν σε μικρότερο χώρο, γεγονός που μειώνει και το κόστος του παραγόμενου καυσίμου. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου ISO 17828, η τιμή της χωρικής πυκνότητας των σύμπηκτων θα πρέπει να είναι 600-750 kg/m^3. Συνεπώς, σύμφωνα με τον πίνακα αποτελεσμάτων μόνο οι περιπτώσεις των σύμπηκτων της ομάδας 3, 5 και 6 δεν πληρούν τις απαιτήσεις του προτύπου που αφορά οικιακή χρήση, ενώ θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στην περίπτωση βιομηχανικής χρήσης (κατηγορία ποιότητας I3).

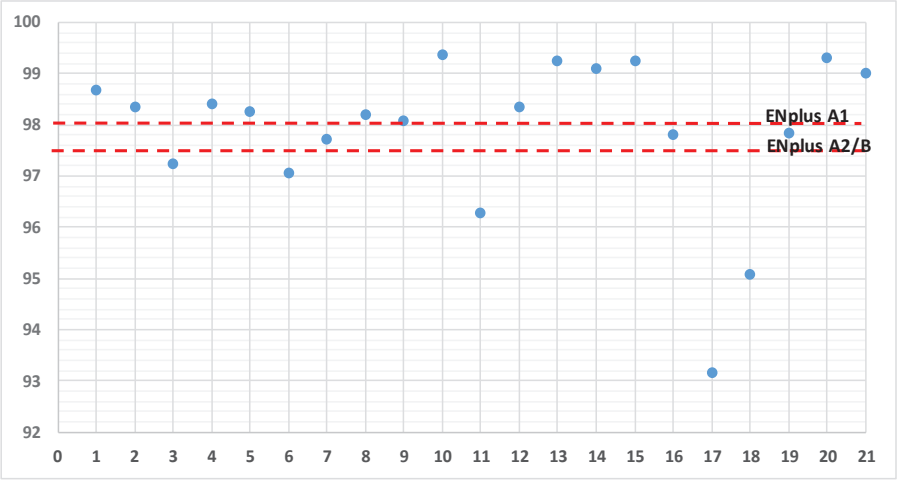
Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά καύσης και μηχανικής αντοχής σύμπηκτων

Δείγμα Σύμπηκτων	**Υγρασία (%)**	**Χωρική πυκνότητα** (kg/m^3)**	**Μηχανική Αντοχή (%)**	**Τέφρα (%)**
1	6,87	639,13 (11)*	98,69 (0,02)	1,20 (0,20)
2	6,80	663,845 (6)	98,35 (0,09)	0,60 (0,12)
3	10,37	556,935 (3)	97,23 (0,14)	0,48 (0,13)
4	7,92	609,54 (0)	98,42 (0,05)	0,47 (0,15)
5	8,36	593,095 (1)	98,26 (0,07)	0,46 (0,10)

6	6,72	536,325 (67)	97,06 (0,21)	0,44 (0,09)
7	7,16	587,035 (2)	97,73 (0,03)	0,58 (0,11)
8	7,06	602,085 (1)	98,19 (0,01)	0,50 (0,15)
9	7,23	622,765 (8)	98,07 (0,06)	0,50 (0,16)
10	5,52	643,005 (7)	99,36 (0,02)	0,27 (0,07)
11	6,32	618,39 (6)	96,27 (0,23)	1,13 (0,19)
12	6,54	649,11 (8)	98,37 (0,02)	0,24 (0,08)
13	6,11	635,88 (5)	99,25 (0,04)	0,35 (0,05)
14	7,31	650,55 (6)	99,09 (0,01)	0,38 (0,08)
15	6,77	635,85 (7)	99,26 (0,01)	0,28 (0,05)
16	5,41	638,65 (12)	97,81 (0,01)	0,62 (0,09)
17	3,32	728,375 (9)	93,17 (0,19)	0,52 (0,05)
18	5,21	620,375 (6)	95,08 (0,14)	1,86 (0,27)
19	6,79	608,375 (2)	97,86 (0,07)	0,62 (0,04)
20	5,65	642,03 (3)	99,32 (0,01)	0,37 (0,03)
21	5,26	649,865 (13)	99,02 (0,05)	0,29 (0,01)

* Τιμές τυπικής απόκλισης εντός των παρενθέσεων
** Οι τιμές χωρικής πυκνότητας αναφέρονται σε σύμπηκτα που περιέχουν υγρασία

Όσον αφορά στη μηχανική αντοχή των σύμπηκτων, το αντίστοιχο πρότυπο ISO 17831-1 καθορίζει ως χαμηλότερο όριο της καλύτερης κατηγορίας (υψηλότερης ποιότητας ENplus A1) το ≥98%, ενώ για τη δεύτερη (ENplus A2) και τρίτη (ENplus B) κατηγορία ποιότητας, που αφορούν όλες τους οικιακή χρήση των σύμπηκτων, αναγράφεται ως χαμηλότερη τιμή το όριο ≥97,5%. Όπως είναι εμφανές και στο διάγραμμα (Εικόνα 4), 13 κατηγορίες σύμπηκτων κατατάχθηκαν στην καλύτερη κατηγορία ποιότητας ως αναφορά στη μηχανική τους αντοχή, ενώ άλλες 3 κατηγορίες κατατάχθηκαν στις κατηγορίες ENplus A2 και ENplus B. Οι υπόλοιπες 5 κατηγορίες που εξετάστηκαν βρέθηκαν να μην πληρούν τις απαιτήσεις των προδιαγραφών για οικιακή χρήση και δεν θα έπρεπε να πωλούνται ως τέτοιας κατηγορίας.



Εικόνα 4 Μηχανική αντοχή των 21 κατηγοριών σύμπηκτων που εξετάστηκαν (≥98% όριο της ENplus A1 κατηγορίας και ≥97,5% των ENplus A2 και ENplus B)

Τέλος, το πρότυπο ISO 18122, που αφορά στα επιτρεπτά ποσοστά περιεχόμενης τέφρας σύμπηκτων, εμφανίζει ως ανώτατο όριο της καλύτερης κατηγορίας ENplus A1 το ≤0,7%, της δεύτερης ποιοτικής κατηγορίας ENplus A2 το ≤1,2% και της τρίτης κατηγορίας ENplus B το 2%, που αφορούν σε οικιακή χρήση. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας, όλες οι κατηγορίες σύμπηκτων πληρούν τις απαιτήσεις σε χαμηλό ποσοστό τέφρας των κατηγοριών οικιακής χρήσης (<2%). Επιπρόσθετα, όλες οι κατηγορίες σύμπηκτων που εξετάστηκαν στην παρούσα έρευνα, πλην τριών (κατηγορία 1, 11 και 18) πληρούν τις απαιτήσεις της καλύτερης ποιοτικής κατηγορίας ENplus A1, καταγράφοντας πολύ χαμηλά ποσοστά τέφρας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα έρευνα ελέγχθηκαν τα σημαντικότερα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά, καθώς και χαρακτηριστικά καύσης, σύμπηκτων 21 εταιρειών που κυκλοφορούν στο αγορά της Βόρειας Ελλάδας, (περιεχόμενη τέφρα, μηχανική αντοχή, χωρική πυκνότητα και το ποσοστό περιεχόμενης υγρασίας). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η υγρασία των δειγμάτων κυμάνθηκε σε χαμηλό επίπεδο, (3,32 - 10,37%), πληρώντας τις απαιτήσεις του προτύπου ISO 18134 (≤10% για οικιακή χρήση).

Όλες οι κατηγορίες σύμπηκτων εμφάνισαν ικανοποιητικά επίπεδα τιμών χωρικής πυκνότητας, εκτός των ομάδων 3, 5 και 6, που βρέθηκαν να μην πληρούν τις απαιτήσεις του αντίστοιχου προτύπου ISO 17828, για οικιακή χρήση, ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν πιθανόν για βιομηχανική χρήση (κατηγορία ποιότητας I3).

Όσον αφορά στη μηχανική αντοχή των σύμπηκτων, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου ISO 17831-1, οι 13 κατηγορίες σύμπηκτων από αυτές που εξετάστηκαν, κατατάχθηκαν στην καλύτερη κατηγορία ποιότητας (ENplus A1), άλλες 3 κατατάχθηκαν στις ENplus A2 και ENplus B, ενώ οι υπόλοιπες 5 κατηγορίες βρέθηκαν να μην πληρούν τις απαιτήσεις των προδιαγραφών για οικιακή χρήση και δεν θα έπρεπε να πωλούνται ως τέτοιας κατηγορίας, όπως γίνεται σήμερα.

Τέλος, όλες οι κατηγορίες σύμπηκτων βρέθηκαν να πληρούν τις απαιτήσεις σε χαμηλό ποσοστό τέφρας των κατηγοριών οικιακής χρήσης (<2%, ISO 18122) και συγκεκριμένα, όλες οι κατηγορίες πλην τριών (1, 11, 18) πληρούν τις απαιτήσεις της καλύτερης ποιοτικής κατηγορίας ENplus A1, καταγράφοντας πολύ χαμηλά ποσοστά τέφρας.

Συνεπώς, τα στοιχεία που αναγράφονται στις συσκευασίες των σύμπηκτων που κυκλοφορούν στην ελληνική αγορά είναι εν μέρει αληθή και θα πρέπει να πραγματοποιούνται συχνοί έλεγχοι των θερμικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των στερεών βιοκαυσίμων που παράγονται ή εισάγονται, με σκοπό να διασφαλίζεται υψηλή ποιότητα των καυσίμων που κάνουν χρήση οι καταναλωτές.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς επιθυμούν να ευχαριστήσουν το Ινστιτούτο Μεσογειακών Δασικών Οικοσυστημάτων και Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων, του Ερευνητικού Οργανισμού ΕΛΓΟ-ΔΗΜΗΤΡΑ, για τον εξοπλισμό που διέθεσε για μέρος του πειράματος και το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών για την κάλυψη μέρους των εξόδων (τμήμα μεταδιδακτορικής έρευνας).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Ζαμπανιώτου, Α., Σκουλού, Β. και Ο. Ιωαννίδου, 2006. “Τεχνική έκθεση αποτελεσμάτων έργου «PRORAES: Προώθηση των δυνατοτήτων των ανανεώσιμων γεωργικών ενεργειακών πηγών»”. INTERREG IIIC, Θεσσαλονίκη, Δεκέμβριος 2006.

[2] Hannum, L.C., 2009. “Developing machinery to harvest small diameter woody biomass – transforming a fire hazard into an energy crisis solution”. [M.Sc. Thesis] North Carolina State University, Raleigh, NC, USA p. 101.

[3] Καμπερίδου, Β και Ι. Μπαρμπούτης, 2011. “Χρήση δασικής βιομάζας για παραγωγή ενέργειας”. 15ο Πανελ. Δασολ. Συνέδριο, Καρδίτσα, 16-19 Οκτ. 2001.

[4] Μουρτσιάδης, Α., 2010. “Ενεργειακή αξιοποίηση βιομάζας”. Εισήγηση Συνεδρίου ΤΕΕ “Ενέργεια: Σημερινή Εικόνα – Σχεδιασμός - Προοπτικές”, Αθήνα, 8 έως 10 Μαρτίου 2010.

[5] Τσουμής, Γ.Θ., 1994. “Επιστήμη και Τεχνολογία του Ξύλου”. Τόμος Α΄: Δομή και Ιδιότητες. Υπηρεσία Δημοσιευμάτων Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη, 1994.

[6] Khider T. and O. Elsaki, 2012. “Heat Value of Four Hardwood Species from Sudan”. Journal of Forest Products & Industries, 2012, 1(2), 5-9.

[7] Filbakk, T., Høibø, O.A., Dibdiakova, J., Nurmi J., 2011. “Modelling moisture content and dry matter loss during storage of logging residues for energy”. Scandinavian Journal of Forest Research 26 (3): 267-277.

[8] Bergman R. and J. Zerbe, 2004. “Primer on Wood Biomass for Energy”. USDA Forest Service, State and Private Forestry Technology Marketing Unit Forest Products Laboratory, Madison, Wisconsin.

[9] Wu, H., Fu, Q., Giles, R., Bartle, J., 2005. “Energy Balance of Mallee Biomass Production in Western Australia”. «Biomass for Energy, the Environment and Society», Melbourne.

[10] EN ISO 17828:2015 Solid biofuels. Determination of bulk density.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Μ. Λουκαΐδης, Γ. Ιτούδης, Γ. Περκουλίδης*, Ν. Μουσιόπουλος

Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ, ΤΘ 483, 541 24 Θεσσαλονίκη
e-mail: gperk@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από βιομάζα χρησιμοποιούνται εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες όπως λέβητες αποκλειστικής ή συνδυασμένης καύσης βιομάζας σε μονάδες παραγωγής ή συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού αλλά και μηχανές εσωτερικής καύσης όπου επεξεργάζεται το βιοαέριο που παράγεται από χώρους υγειονομικής ταφής απορριμμάτων ή από την αναερόβια ζύμωση των οργανικών αποβλήτων. Οι λιγότερο ώριμες τεχνολογίες της αεριοποίησης και πυρόλυσης είτε έχουν μόλις αναπτυχθεί σε εμπορική κλίμακα είτε βρίσκονται σε πειραματική επίδειξη.

Κύριος στόχος της παρούσας εργασίας απετέλεσε η ανάπτυξη και εφαρμογή ενός συστήματος λήψης απόφασης για την ανάκτηση ενέργειας από βιομάζα. Το εν λόγω σύστημα προέκυψε μετά από τη συλλογή και την επεξεργασία βιβλιογραφικών δεδομένων που αφορούσαν στις μεθόδους και τα πειραματικά αποτελέσματα αεριοποίησης βιομάζας. Αναπτύχθηκε λαμβάνοντας υπόψη, μεταξύ άλλων, την ποσοτική και ποιοτική ανάλυση και το περιεχόμενο σε υγρασία της πρώτης ύλης καθώς και την ωριμότητα και απόδοση της τεχνολογίας της αεριοποίησης.

Η εφαρμογή του συστήματος πραγματοποιήθηκε για τον υπολογισμό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την αεριοποίηση βιομάζας λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα αλλά και το κόστος μεταφοράς της πρώτης ύλης που παράγεται σε περιοχές της Περιφερειακής Ενότητας Πέλλας.

Λέξεις Κλειδιά: *Αεριοποίηση, βιομάζα, σύστημα υποστήριξης αποφάσεων*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενέργεια αποτελεί έναν από τους καθοριστικούς παράγοντες για την επίτευξη των στόχων της ανάπτυξης, απασχόλησης και αειφορίας εντός των συνόρων της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ). Η παρούσα εργασία ασχολείται με ένα μεγάλο κομμάτι των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τη βιομάζα και πιο συγκεκριμένα με τις δυνατότητες ανάκτησης ενέργειας με αεριοποίηση της βιομάζας.

Στατιστικά στοιχεία δείχνουν ότι στην Ελλάδα υπάρχει πολύ ενθαρρυντικό δυναμικό βιομάζας. Η προσπάθεια για αξιοποίηση του δυναμικού βιομάζας πρέπει να έχει στόχο την ανάκτηση ενέργειας, τη μείωση του αποτυπώματος της Ελλάδας όσον αφορά στα αέρια θερμοκηπίου, την ενεργειακή ανεξαρτησία της χώρας καθώς και την επίτευξη οικονομικού οφέλους, το οποίο με τη σειρά του θα οδηγήσει σε θέσεις εργασίας και βελτίωση της ποιότητας ζωής.

Οι διαθέσιμες τεχνικές για την ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, α) τις τεχνικές βιολογικής επεξεργασίας και β) τις θερμοχημικές διεργασίες αξιοποίησης βιομάζας. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι αντιδραστήρων αεριοποίησης βιομάζας, α) αεριοποιητές σταθερής κλίνης και β) αεριοποιητές ρευστοποιημένης κλίνης. Η κάθε κατηγορία έχει θετικά και αρνητικά στοιχεία, ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής, τα οποία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή μιας συγκεκριμένης τεχνολογίας.

Ο όρος βιομάζα, δεν είναι ακριβής χημικός όρος. Χρησιμοποιείται συνήθως για να υποδηλώσει τις εξής κατηγορίες υλικών: α) υποπροϊόντα και κατάλοιπα φυτικής, ζωικής, δασικής και αλιευτικής παραγωγής (άχυρα, φύλλα, στελέχη, κοπριά, θάμνοι, καρποί), β) παραπροϊόντα της βιομηχανικής επεξεργασίας των προϊόντων αυτών (φλούδες, πυρήνες, πίττες, απόβλητα σφαγείων, τυρόγαλα, απόβλητα χαρτοποιίας, απόβλητα βιομηχανίας επεξεργασίας ξύλου), γ) αστικά απόβλητα, στερεά (σκουπίδια) και υγρά (λύματα) και δ) προϊόντα φυσικών δασών και ειδικών φυτειών δασικού ή γεωργικού τύπου με στόχο την παραγωγή ενέργειας (ενεργειακές καλλιέργειες). Πρόκειται δηλαδή για υλικά φυτικής ή ζωικής προέλευσης που αντιμετωπίζονται σαν ενεργειακοί πόροι.

Η βιομάζα σχηματίζεται από τη φωτοσυνθετική μετατροπή της ηλιακής ενέργειας, αφθονεί στον πλανήτη και αποτελεί ένα τεράστιο ενεργειακό δυναμικό που παραμένει κατά το μεγαλύτερο μέρος ανεκμετάλλευτο (Τσιλιγκιρίδης, 2010). Η ενέργεια αποτελεί έναν από τους καθοριστικούς παράγοντες για την επίτευξη των στόχων της ανάπτυξης, απασχόλησης και αειφορίας εντός των συνόρων της ΕΕ. Οι λόγοι της ανεπαρκούς και μη αποδοτικής αξιοποίησης της βιομάζας μέχρι σήμερα είχαν να κάνουν τόσο με τις τεχνικές δυσκολίες όσο και ποικίλα κοινωνικοοικονομικά προβλήματα, όπως ανασφάλεια και έλλειψη ευελιξίας στην υιοθέτηση καλών πρακτικών καινοτόμων μεθόδων αξιοποίησης της βιομάζας που συνεισφέρουν παράλληλα στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου

Το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις ΑΠΕ, εκπονήθηκε στο πλαίσιο εφαρμογής της Ευρωπαϊκής Ενεργειακής Πολιτικής σε σχέση με τη διείσδυση των ΑΠΕ, την Εξοικονόμηση Ενέργειας και τον περιορισμό των εκπομπών αερίων ρύπων του θερμοκηπίου. Ειδικότερα για το σύνολο των Κρατών-Μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μέχρι το 2020, προβλέπεται: α) 20% μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 σύμφωνα με την Οδηγία 2009/29/ΕΚ, β) 20% διείσδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σύμφωνα με την Οδηγία 2009/28/ΕΚ και γ) 20% εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας. Ειδικά για την Ελλάδα, ο στόχος για τις εκπομπές αερίων ρύπων του θερμοκηπίου είναι μείωση κατά 4% στους τομείς εκτός εμπορίας σε σχέση με τα επίπεδα του 2005, και 18% διείσδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση. Η Ελληνική κυβέρνηση στο πλαίσιο υιοθέτησης συγκεκριμένων αναπτυξιακών και περιβαλλοντικών πολιτικών, με το Νόμο 3851/2010 προχώρησε στην αύξηση του εθνικού στόχου συμμετοχής των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας στο 20%, ο οποίος και εξειδικεύεται σε 40 % συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, 20 % σε ανάγκες θέρμανσης-ψύξης και 10% στις μεταφορές. Όσον αφορά στη βιομάζα, ο εθνικός στόχος ανέρχονταν σε 350 MW εγκατεστημένης ισχύος έως το 2020 σύμφωνα με το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις ΑΠΕ σύμφωνα με την Κοινοτικής Οδηγία 2009/28/ΕC όπως ενημερώθηκε βάσει της ΥΑ Α.Υ./Φ1/οικ.19598 της 01.10.2010 (ΥΠΕΚΑ 2009) (Πίνακας 1).

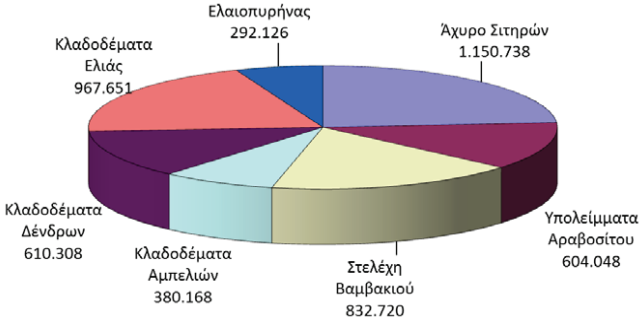
Πίνακας 1: Εθνικοί στόχοι για τη Βιομάζα ως το 2014 και 2020 (Γερασίμου, 2011).

Έτος	2014		2020	
Τομέας	Ισχύς	Ενέργεια	Ισχύς	Ενέργεια
Ηλεκτροπαραγωγή	200MW	997GWh	350MW	1.745GWh
Θερμανση-Ψύξη		1.105.000ΤΙΠ		1.222.000ΤΙΠ
Μεταφορές		339.000ΤΙΠ		617.000ΤΙΠ

Για το μήνα Μάρτιο του 2017, ημερομηνία τελευταίας ενημέρωσης από το Λειτουργό Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε. (ΛΑΓΗΕ), ειδικά για ηλεκτροπαραγωγή από βιομάζα καταγράφηκε, εγκατεστημένη ισχύς 58,18 MW και παραγόμενη ενέργεια 23.285 MWh. Συμπεραίνεται λοιπόν πως ο ρυθμός αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος δεν ήταν αρκετός για την επίτευξη του εθνικού στόχου όσον αφορά στην ηλεκτροπαραγωγή από βιομάζα.

2. ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

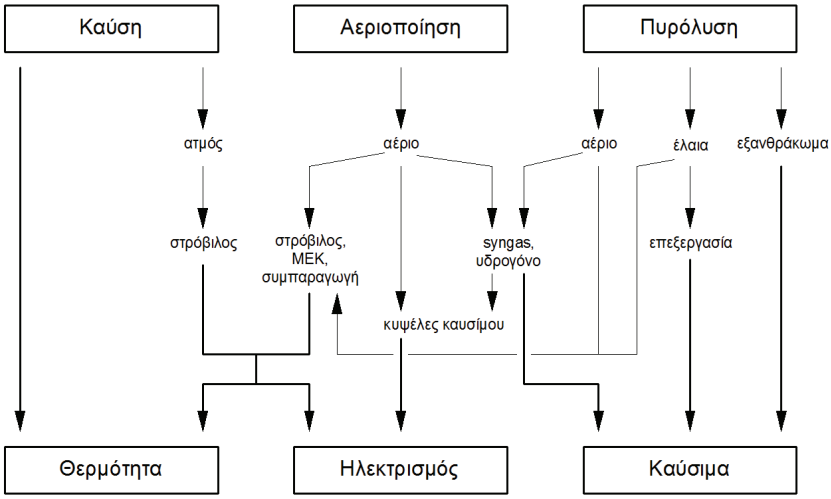
Η εκτίμηση του δυναμικού βιομάζας αποτελεί μια δυσχερή διαδικασία λόγω της εξάρτησης από βιολογικούς, τεχνο-οικονομικούς και κοινωνικούς παράγοντες και απρόβλεπτες φυσικές μεταβολές. Επίσης παρουσιάζει δυσκολία ακριβούς εκτίμησης και καταγραφής των στοιχείων της πρώτης ύλης (ποσότητα, διαθεσιμότητα), λόγω: α) ποικιλομορφίας των γεωργικών καλλιεργειών και πολυκερματισμού του κλήρου, β) αδυναμίας παροχής επαρκούς και διαρκούς πληροφόρησης από τους αρμόδιους φορείς, γ) έλλειψης ικανών εργαλείων επεξεργασίας, γ) πολυδιάσπασης των υπηρεσιών, δ) πολλαπλών χρήσεων και εξάρτησης από διάφορες βιομηχανίες/βιοτεχνίες του δευτερογενούς τομέα και ε) έλλειψης συγκεκριμένης μεθοδολογίας και προτύπων για τον υπολογισμό των ποσοτήτων πρώτης ύλης. Ο Γεωργικός τομέας στην Ελλάδα αποτελεί το 6% του ΑΕΠ και το 20% της απασχόλησης και καλύπτει συνολικά 9.2 εκ εκτάρια γης συμπεριλαμβανομένων των βοσκοτόπων έκταση η οποία αποτελεί το 69% της συνολικής έκτασης της χώρας. Τα κύρια γεωργικά υπολείμματα προέρχονται κυρίως από κλαδοδέματα ελιάς, ελαιοπυρήνα, άχυρο σιτηρών, κλαδοδέματα δέντρων, κλαδοδέματα αμπελιών, στελέχη βαμβακιού και υπολείμματα αραβοσίτου (Εικόνα 1) (ΚΑΠΕ, 2013).



Εικόνα 1: Τεχνικά διαθέσιμο δυναμικό των γεωργικών υπολειμμάτων (t ξηρής ουσίας) (Χρήστου, 2007).

3. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ

Οι διαθέσιμες τεχνικές για την ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: α) τις τεχνικές βιολογικής επεξεργασίας και β) τις θερμοχημικές διεργασίες αξιοποίησης βιομάζας. Οι θερμοχημικές διεργασίες αξιοποίησης βιομάζας διακρίνονται στην καύση, πυρόλυση και αεριοποίηση (Εικόνα 2).



Εικόνα 2: Θερμοχημικές διεργασίες αξιοποίησης βιομάζας (Faaij, 2006).

Η διεργασία της καύσης, είναι η πλέον διαδεδομένη και τεχνολογικά ώριμη θερμοχημική διεργασία ενεργειακής αξιοποίησης βιομάζας. Σύγχρονη εφαρμογή υψηλού βαθμού απόδοσης είναι η χρήση του Οργανικού Κύκλου Rankine [Organic Rankine Cycle (ORC)] για συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού κατά την οποία ο συνολικός βαθμός απόδοσης φθάνει στο 90% με θερμικό βαθμό 85% και ηλεκτρικό 30% (Obernberger et al., 2003).

Η πυρόλυση της βιομάζας λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες 300 ^{o}C < T < 600 ^{o}C σε αδρανή ατμόσφαιρα και αποτελεί μια ενδόθερμη διεργασία (Encinar et al, 1998). Από την πυρόλυση των μοριακών δεσμών βιομάζας παράγεται το αέριο πυρόλυσης που αποτελείται κυρίως από CO, H_2, CO_2, CH_4 και ελαφρείς πτητικούς υδρογονάνθρακες (C_2H_m). Παραπροϊόν αποτελεί το εξανθράκωμα πυρόλυσης (pyrolytic char) που αποτελείται από τον μόνιμο άνθρακα (fixed carbon) και την τέφρα (ash) της βιομάζας, ενώ βαρείς υδρογονάνθρακες και υδατική φάση αποτελούν την πίσσα (tar) (Σκούλου, 2009).

Η αεριοποίηση είναι διεργασία θερμοχημικής μετατροπής υγρών ή στερεών καυσίμων σε καύσιμο αέριο (Basu, 2006). Στις περιπτώσεις χρήσης βιομάζας, η διεργασία πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες 800 - 950 °C, υπό την παρουσία οξειδωτικού μέσου (συνήθως αέρας, ατμός ή καθαρό οξυγόνο) σε ποσότητα μικρότερη της στοιχειομετρικά απαιτούμενης για την πλήρη καύση του καυσίμου (Higman and van de Burgt, 2003, McKendry, 2003a-c).

Το ποσοστό του πτητικού προς το μη πτητικό άνθρακα βιομάζας, ο μεγάλος λόγος C/N και η υψηλή θερμογόνος δύναμη οδήγησαν στην επιλογή των θερμοχημικών διεργασιών της πυρόλυσης ή αεριοποίησης (Vamvouka and Zografos, 2004).

4. ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ και ΑΔΕΙΟΔΟΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Στην προσπάθεια της Ελλάδας για εναρμόνιση με τις ευρωπαϊκές οδηγίες σε σχέση με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τη γενική τάση που επικρατεί για χρήση πιο ήπιων μορφών ενέργειας αλλά και για απλοποίηση και επιτάχυνση της αδειοδοτικής διαδικασίας έγιναν διάφορες τροποποιήσεις στη νομοθεσία. Στο νομοθετικό πλαίσιο περί ΑΠΕ εντάσσεται ιδίως ο νόμος 3468/2006 όπως έχει τροποποιηθεί με νεότερους νόμους μεταξύ των οποίων οι νόμοι 4062/2012, 4152/2013, 4203/2013, 4254/2014, 4296/2014, 4315/2014, 4342/2015, 4409/2016 και 4414/2016. Σημαντικές αλλαγές στο ν. 3468/2006 επέφερε ο ν. 3851/2010 με στόχο τη μείωση του χρόνου αδειοδότησης των έργων ΑΠΕ και την παράλληλη κατά το δυνατόν ροή των επί μέρους σταδίων της αδειοδοτικής διαδικασίας που εκτελούνταν σειριακά.

Για την κατασκευή και τη λειτουργία ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, απαιτείται η έκδοση ή υπογραφή σχετικών αδειών και συμβάσεων. Αυτές χορηγούνται από τους αρμόδιους κατά περίπτωση φορείς κατόπιν αιτήσεως που συνοδεύεται από τα απαραίτητα δικαιολογητικά και μελέτες. Γενικά, τα βήματα που χρειάζεται να γίνουν είναι τα εξής:

- Έκδοση Άδειας Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΡΑΕ).

Ταυτόχρονα (παραλληλισμός διαδικασιών) αιτήσεις για:

- Διατύπωση Προσφοράς Σύνδεσης του σταθμού παραγωγής στο Σύστημα ή σε Δίκτυο (αρμόδιος Διαχειριστής – ΔΕΗ ή ΔΕΣΜΗΕ).
- Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων (Ε.Π.Ο.) ή Απαλλαγή από Ε.Π.Ο. (Περιφέρεια).
- Άδεια Επέμβασης σε δάσος ή δασική έκταση, εφόσον απαιτείται, ή γενικά των αναγκαίων αδειών για την απόκτηση του δικαιώματος χρήσης της θέσης εγκατάστασης του έργου (Περιφέρεια).

Ταυτόχρονα (παραλληλισμός διαδικασιών) ενέργειες για:

- Έκδοση Άδειας Εγκατάστασης (Περιφέρεια).
- Έκδοση Οικοδομικών Αδειών (όπου απαιτείται εκτέλεση δομικών έργων) ή άλλων αδειών και εγκρίσεων που τυχόν απαιτούνται και μπορούν να εκδοθούν χωρίς να υπάρχει ακόμα η Άδεια Εγκατάστασης (Πολεοδομία ή αρμόδια κατά περίπτωση αρχή).
- Υπογραφή Σύμβασης Σύνδεσης στο Σύστημα ή σε Δίκτυο (αρμόδιος Διαχειριστής – ΔΕΗ ή ΔΕΣΜΗΕ).
- Υπογραφή Σύμβασης Αγοραπωλησίας Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΣΜΗΕ)
- Δοκιμαστική Περίοδος και έκδοση Άδειας Λειτουργίας (Περιφέρεια).

Η διαδικασία αυτή διαφοροποιείται ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ του σταθμού παραγωγής, τη χρησιμοποιούμενη τεχνολογία και τον τόπο εγκατάστασης.

5. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η εξέταση της οικονομικής σκοπιμότητας για μια επένδυση είναι απαραίτητη διαδικασία και τα αποτελέσματά της είναι πολύ σημαντικός παράγοντας στην διαδικασία λήψης της τελικής απόφασης για τη δημιουργία της επένδυσης.

Σύμφωνα με τον IRENA (International Renewable Energy Agency) και τη μελέτη που εκπόνησε το 2012, τα στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον υπολογισμό του κόστους ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας για ηλεκτροπαραγωγή ή συμπαραγωγή είναι:

- Είδος της βιομάζας. Η βιομάζα βρίσκεται σε πολλές διαφορετικές μορφές με διαφορετικές ιδιότητες οι οποίες επηρεάζουν τον τρόπο χρήσης της για ανάκτηση ενέργειας.
- Μετατροπή της βιομάζας. Αυτή είναι η διαδικασία κατά την οποία η βιομάζα θα μετασχηματιστεί στη μορφή, η οποία θα δώσει την ενέργεια για παραγωγή θερμότητας ή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Τεχνολογία ηλεκτροπαραγωγής. Υπάρχουν διάφορες ώριμες τεχνολογίες, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ηλεκτροπαραγωγή η συμπαραγωγή.

Λαμβάνοντας υπόψη τα πιο πάνω καθώς και άλλους παράγοντες όπως το κόστος κεφαλαίου για κάθε περίπτωση, το συνολικό κόστος εγκατάστασης, την τιμή της βιομάζας ο IRENA υπολογίζει το ανηγμένο (ειδικό) κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [Levelised Cost of Electricity (LCOE) (USD/kWh)].

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^{n} \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

Όπου, I_t είναι το κόστος επένδυσης για το έτος *t*, M_t οι λειτουργικές δαπάνες και τα έξοδα συντήρησης, F_t τα κόστη καυσίμου για το έτος *t*, E_t οι μονάδες παραγόμενης Η/Ε για το έτος *t*, *r* το προεξοφλητικό επιτόκιο και *n* η διάρκεια ζωής της μονάδας κατά κατηγορία πρωτογενούς ενέργειας.

6. ΑΠΛΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

Η αεριοποίηση της βιομάζας είναι μια διαδικασία που λαμβάνει χώρα σε έναν αεριοποιητή και έχει σαν ιδανικό στόχο τη μετατροπή όλης της στερεάς βιομάζας σε αέριο καύσιμο (αέριο σύνθεσης), το οποίο έχει συνήθως μέση θερμογόνο δύναμη 2 - 9 MJ/m^3.Τα συστατικά, τα οποία συνεισφέρουν κυρίως στο ενεργειακό περιεχόμενο του αερίου σύνθεσης είναι το H_2 και το CO.

Η πρόβλεψη της σύστασης του παραγόμενου αεριού καθώς και της θερμογόνου του δύναμης είναι αναγκαία πριν προχωρήσει κανείς στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός αεριοποητή. Στην παρούσα εργασία γίνεται δοκιμή ενός απλού μοντέλου ισορροπίας για την προσομοίωση της διεργασίας της αεριοποίησης και την πρόβλεψη της σύστασης του αερίου σύνθεσης και της θερμογόνου του δύναμης για αεριοποιητή κατερχόμενης ροής.

Για την ανάπτυξη του μοντέλου γίνεται παραδοχή ότι όλες οι χημικές αντιδράσεις βρίσκονται σε ισορροπία. Επίσης, θεωρείται πώς οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την αεριοποίηση είναι οι ακόλουθες:

$C + CO_2 \rightarrow 2CO$ (1)

$C + H_2O \rightarrow CO + H_2$ (2)

$C + 2H_2 \rightarrow CH_4$ (3)

Από τις εξισώσεις (1) και (2) έχουμε την αντίδραση υδραερίου:

$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ (4)

Η σταθερά ισορροπίας για την αντίδραση σχηματισμού μεθανίου [εξ. (3)] είναι:

$$K_1 = \frac{PCH_4}{(PH_2)^2} \quad (5)$$

και η σταθερά ισορροπίας για την αντίδραση υδραερίου είναι :

$$K_2 = \frac{PCO_2 PH_2}{PCOPH_2O} \quad (6)$$

Ο χημικός τύπος για τη βιομάζα είναι της μορφής:

CH_hO_o

Η αντίδραση αεριοποίησης μπορεί να γραφεί ως ακολούθως:

$CH_hO_o + wH_2O + mO_2 + 3.76mN_2 \rightarrow$

$x_1H_2 + x_2CO + x_3CO_2 + x_4H_2O + x_5CH_4 + 3.76mN_2$ (7)

όπου w: η ποσότητα του νερού στο καύσιμο σε kmol, m: η ποσότητα του οξυγόνου σε kmol και $x_{1,2,3,4,5}$: η ποσότητα των συστατικών αντίστοιχα.

Η υγρασία στη βιομάζα συνήθως δίνεται σαν ποσοστό της υγρής βάσης της βιομάζας. Για ευκολία στη χρήση του μοντέλου και για πειραματισμό σε διαφορετικά ποσοστά υγρασίας, γίνεται μετατροπή του ποσοστού υγρασίας σε kmol.

Έστω ότι Π.Υ είναι το ποσοστό υγρασίας της βιομάζας

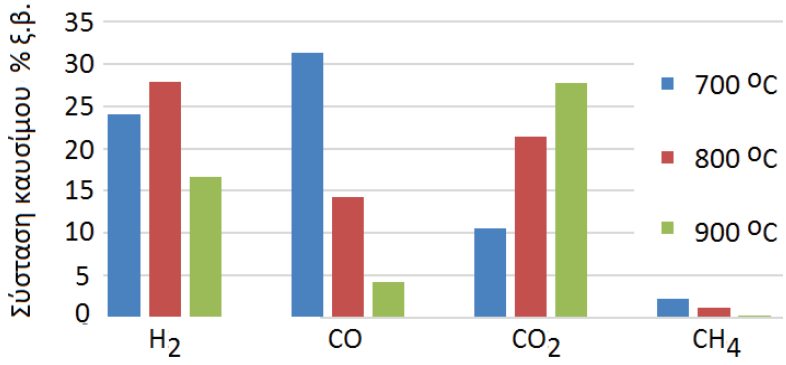
$$\Pi.Y = \frac{\text{μαζα νερού}}{\text{μάζα υγρής βιομάζας}} X\ 100\% \Rightarrow \Pi.Y = \frac{18w}{12c+1h+16o+18w}$$

Συνεπώς,

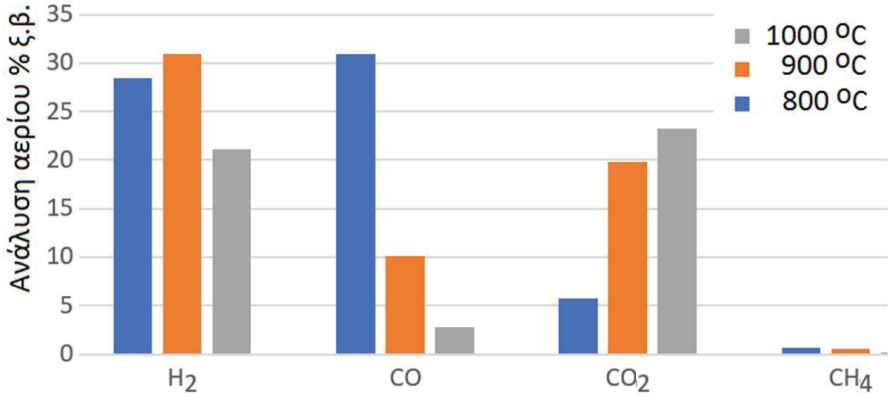
$$W = \frac{(12c+1h+16o)\times\Pi.Y}{18\times(1-\Pi.Y)}$$

Από τις πιο πάνω αντιδράσεις προκύπτουν έξι άγνωστοι, τα x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 και m. Ως εκ τούτου χρειάζονται έξι εξισώσεις για την επίλυση του συστήματος και τον προσδιορισμό των αγνώστων.

Στην Εικόνα 2 φαίνεται η σύσταση του αερίου σύνθεσης για διαφορετικές θερμοκρασίες. Παρατηρείται συνεχής μείωση του CO και αντίστοιχη αύξηση του CO_2 με την αύξηση της θερμοκρασίας, ενώ όσον αφορά στην παραγωγή H_2, αυτό παρουσιάζει αύξηση από τους 700 ^{o}C έως και τους 800 ^{o}C ενώ μετά μειώνεται σημαντικά μέχρι τους 900 ^{o}C. Οι ίδιες τάσεις παρατηρούνται και στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3: Μεταβολή σύστασης παραγόμενου αερίου συναρτήσει της μεταβολής της θερμοκρασίας για ελαιοπυρήνα με 10% υγρασία και λόγο αέρα λ = 0,35.



Εικόνα 3: Μεταβολή σύστασης παραγόμενου αερίου συναρτήσει της μεταβολής της θερμοκρασίας για ξύλο με 10% υγρασία και λόγο αέρα λ = 0.35.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτή την εργασία επιχειρήθηκε μία, κατά το δυνατό, σφαιρική αξιολόγηση των προοπτικών αξιοποίησης της βιομάζας με τη μέθοδο της αεριοποίησης. Δυστυχώς στην Ελλάδα δεν πραγματοποιούνται τακτικές καταμετρήσεις ή υπολογισμός του δυναμικού παρά μόνο σποραδικά και

από διαφορετικούς οργανισμούς με μεγάλες διαφορές στις εκτιμήσεις τους και αποτελούν παράγοντες που μειώνουν την αξιοπιστία.

Ο εθνικός στόχος για την αξιοποίηση της βιομάζας ήταν για το 2020: 350 MW εγκατεστημένης ισχύος για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 1.745 GWh, 1.222.000 Τόνοι Ισοδύναμου Πετρελαίου (ΤΙΠ) για θέρμανση-ψύξη και 617.000 ΤΙΠ για τις μεταφορές. Η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος από το 2015 μέχρι το 2017 ήταν μόνο 18%, ρυθμός που δεν ήταν σε καμία περίπτωση επαρκής για την επίτευξη του εθνικού στόχου. Η νομοθεσία είναι αρκετά περίπλοκη και γίνονται συνεχείς τροποποιήσεις με χρονοβόρες αδειοδοτικές διαδικασίες.

Η επικρατούσα άποψη στη βιβλιογραφία είναι πως η αξιοποίηση βιομάζας μέσω αεριοποίησης είναι οικονομικά σκόπιμη. Αν και υπάρχει απόκλιση μεταξύ διαφορετικών ερευνών όσον αφορά στο κόστος επένδυσης (3.400-5.687 €/kW_{el}) και το ειδικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 0,06-0,29 €/kWh_{el}, δίνονται κίνητρα, όπως πέρα από τις επιχορηγημένες τιμές και μία σταθερή συμφωνημένη τιμή.

Από τα δεδομένα του δήμου Πέλλας και για τρεις χειμερινούς μήνες, βγήκε το συμπέρασμα ότι η ποσότητα του αερίου σύνθεσης που παράγεται από υλικά τα οποία γενικά μένουν αναξιοποίητα είναι αρκετή και έχει αρκετά καλό ενεργειακό περιεχόμενο. Μόνο για κλαδέματα και ελαιοπυρήνα η μέγιστη ποσότητα αερίου σύνθεσης είναι 19.261.880 Nm3 και έχει ενεργειακό περιεχόμενο 134 TJ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Basu Pr. (2006): Combustion and Gasification in Fluidised Beds, CRC Press, Taylor and Francis Group, FL USA

Encinar, J. M., Beltran, F. J., Ramiro, A., and Gonzalez, J. F. 1998. Pyrolysis/gasification of agricultural residues by carbon dioxide in the presence of different additives: Influence of variables. Fuel Proc. Technol. 55:219–233.

Faaij A., (2006), Modern biomass conversion technologies, Mitigation and adaptation strategies forglobal change, 11: 343-385, DOI: 10.1007/s11027-005-9004-7.

Higman C., van de Burgt M., (2003): Gasification, Elsevier Science, New York.

McKendry P., (2003a) Energy production from biomass (part 1): overview of biomass, Bioresource Technology 83, 37-46

McKendry P., (2003b) Energy production from biomass (part 2): conversion technologies, Bioresource Technology 83, 47-54

McKendry P., (2003c) Energy production from biomass (part 3): gasification technologies, Bioresource Technology 83, 55-63

Obernberger I., Carlsen H., Biedermann F., (2003): State of the art and future developments regarding small scale biomass CHP systems with a special focus on ORC and Stirling engine technologies, International Nordic Bioenergy 2003 conference

Vamvouka, D., Zografos, D. Predicting the behavior of ash from agricultural wastes using combustion. Fuel, 2004; 83(14-15): 295-304.

Γερασίμου Α., 2011, Παρουσίαση της ΕΛΕΑΒΙΟΜ: Η αγορά Βιομάζας στην Ελλάδα - Βιομάζα – Βιοενέργεια: το σήμερα και το αύριο. Ανθούσα, 3 Δεκεμβρίου 2011.

Σκούλου Β., 2009, Σχεδιασμός και ανάπτυξη αντιδραστήρα αεριοποίησης για την ενεργειακή αξιοποίηση βιομάζας, Διδακτορική Διατριβή, Τομέας Ανάλυσης, Σχεδιασμού, Ρύθμισης Χημικών Διεργασιών & Εγκαταστάσεων, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

Τσιλιγκιρίδης Γ., 2010, Πανεπιστημιακές σημειώσεις στο μάθημα «Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας».

Χρήστου Μ., 2007, Ενέργεια από Βιομάζα την Ελλάδα: Παρούσα κατάσταση και προοπτικές, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Μάρτιος (http://www.cres.gr/kape/publications/pdf/energy_res/7.Christou_EnergyRes.pdf, 10/07/2017).

ΠΡΩΤΟΤΥΠΟΣ ΠΙΛΟΤΙΚΟΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗΣ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ FENTON ΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Κωνσταντίνος Πλάκας[1*], Irene Salmerón[2], Isabel Oller[2], Ignasi Sirés[3], Manuel Ignacio Maldonado[2], Sixto Malato[2], Αναστάσιος Καράμπελας[1]

[1*] Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων (ΙΔΕΠ), Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ), Θεσσαλονίκη, Ελλάδα
[2] Plataforma Solar de Almería (PSA)-CIEMAT, Almería, Spain
[3] Laboratori de Ciència i Tecnologia Electroquímica de Materials, Departament de Química Física, Facultat de Química, Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain
e-mail: kplakas@cperi.certh.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία περιγράφονται τα κυριότερα αποτελέσματα της συνεργατικής έρευνας που διενεργήθηκε στην Ηλιακή Πλατφόρμα της Αλμερίας στην Ισπανία (PSA/CIEMAT) με αντικείμενο την εκκίνηση και δοκιμαστική λειτουργία μίας πρωτότυπης μονάδας επεξεργασίας νερού και υγρών αποβλήτων, σε πιλοτική κλίμακα. Η πιλοτική εγκατάσταση συνδυάζει τρεις διεργασίες, δηλαδή την ανοδική οξείδωση σε ηλεκτρόδιο αδάμαντα εμπλουτισμένο με βόριο (boron doped diamond-BDD), την ηλεκτροχημική οξείδωση Fenton, κατά την οποία το ηλεκτρικά παραγόμενο υπεροξείδιο του υδρογόνου αντιδρά με δισθενή ιόντα σιδήρου προς σχηματισμό ισχυρών οξειδωτικών μέσων (π.χ. ρίζες υδροξυλίου, $^{\bullet}OH$), και την αναγέννηση των καταλυτικών ιόντων σιδήρου της αντίδρασης Fenton σε ηλιακό συλλέκτη με παραβολικό ανακλαστήρα, συνολικής επιφάνειας 2 m^2. Στόχος της υβριδικής διάταξης είναι η εξουδετέρωση δύσκολα βιοαποικοδομήσιμων οργανικών ρύπων, όπως είναι οι δραστικές ενώσεις φυτοφαρμάκων, οι φαρμακευτικές ουσίες, οι φαινόλες, οι χουμικές ενώσεις, κ.ά., που εντοπίζονται τόσο σε πηγές πόσιμου νερού όσο και σε βιομηχανικά απόβλητα, με αποτελεσματικό, οικονομικά ελκυστικό και περιβαλλοντικά φιλικό τρόπο.

Αρχικά, βελτιστοποιήθηκε το δυναμικό της μονάδας να παράγει επιτόπου (in situ) υπεροξείδιο του υδρογόνου (H_2O_2), το οποίο αποτελεί το βασικό αντιδραστήριο για την υλοποίηση αντιδράσεων τύπου Fenton ($Fe^{2+} + H_2O_2 + H^+ \rightarrow Fe^{3+} + H_2O + {}^{\bullet}OH$). Για το σκοπό αυτό καταστρώθηκε πρόγραμμα δοκιμών ως συνάρτηση των κύριων παραμέτρων λειτουργίας της πιλοτικής διάταξης (ηλεκτρικό ρεύμα, παροχή αέρα στο ηλεκτρόδιο καθόδου, παροχή και pH νερού τροφοδοσίας, συγκέντρωση ηλεκτρολύτη) με βάση τον εδροκεντρωμένο σύνθετο σχεδιασμό και τη μεθοδολογία των επιφανειών απόκρισης. Οι δοκιμές έλαβαν χώρα με ένα από τα τέσσερα πανομοιότυπα ηλεκτροχημικά κελιά της μονάδας, καθένα εκ των οποίων ήταν εφοδιασμένο με ζεύγη ηλεκτροδίων ανόδου/καθόδου τύπου διάχυσης αερίου (gas diffused electrode-GDE) και BDD, αντίστοιχα, επιφάνειας 100 cm^2 το καθένα. Οι βέλτιστες τιμές των λειτουργικών παραμέτρων της μονάδας εφαρμόσθηκαν στη συνέχεια σε επιτυχείς δοκιμές οξείδωσης οργανικών ρύπων με μίγματα οξέων μικρού μοριακού βάρους και φυτοφαρμάκων.

Λέξεις Κλειδιά: προηγμένη απορρύπανση νερού, ανοδική οξείδωση, ηλεκτροχημικές αντιδράσεις Fenton, ηλιακή αναγέννηση καταλυτικών ιόντων σιδήρου

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βιομηχανοποίηση, που σχετίζεται άμεσα με την παραγωγή και τη χρήση ολοένα και περισσότερων χημικών ενώσεων σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δραστηριότητας, συνοδεύεται, δυστυχώς, από την εισροή ενός μεγάλου πλήθους οργανικών ουσιών στο υδατικό περιβάλλον, με απρόβλεπτες, στις περισσότερες περιπτώσεις, συνέπειες για τον άνθρωπο. Προγράμματα παρακολούθησης φυσικών πηγών νερού από ομάδες επιστημόνων σε όλο τον κόσμο [1-4], υπογραμμίζουν τη σοβαρότητα του προβλήματος και επισημαίνουν τους ενδεχόμενους κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία και γενικότερα για το περιβάλλον που ενέχει η ύπαρξη τόσο των ίδιων των οργανικών μικρορυπαντών όσο και των παραγόμενων μεταβολιτών τους στο πόσιμο νερό. Συνήθως, το "κοκτέιλ" των οργανικών τοξικών ρυπαντών περιλαμβάνει ουσίες, που προέρχονται από διάφορες εφαρμογές, όπως τα γεωργικά φάρμακα, οι διαλύτες, τα χημικά βιομηχανικής προελεύσεως, τα συντηρητικά, οι φαρμακευτικές ουσίες, τα προϊόντα προσωπικής φροντίδας, τα λιπαντικά, κ.ά. Η εμφάνιση αυτών των ρύπων σχετίζεται κυρίως με τη διάθεση επεξεργασμένων και μη αστικών λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων σε επιφανειακά νερά (λίμνες, ποτάμια), καθώς και στη γεωργική, κτηνοτροφική και γενικότερα ανθρώπινη δραστηριότητα [3,4]. Η κατάσταση αυτή επιβάλλει ειδική μέριμνα στην επεξεργασία των αποβλήτων και του πόσιμου νερού με πρωταρχικό στόχο την ολοκληρωτική απομάκρυνση των τοξικών ρυπαντών και την προστασία τόσο του υδατικού περιβάλλοντος όσο και της ίδιας της ανθρώπινης υγείας.

Η εντατική έρευνα προς αυτή την κατεύθυνση οδήγησε τις τελευταίες δεκαετίες στην ανάπτυξη προηγμένων τεχνολογιών, όπως οι λεγόμενες *Προηγμένες Οξειδωτικές Μέθοδοι Αντιρρύπανσης* (ΠΟΜΑ) (*Advanced Oxidation Processes-AOPs*) οι οποίες αποκτούν σταδιακά όλο και μεγαλύτερη σπουδαιότητα λόγω των πλεονεκτημάτων τους έναντι των αντίστοιχων συμβατικών τεχνολογιών επεξεργασίας του νερού [5]. Κοινό χαρακτηριστικό των ΠΟΜΑ είναι η επιτόπια σύνθεση ριζών υδροξυλίου ($^{\bullet}OH$), οι οποίες με δυναμικό αναγωγής $E^{o}(^{\bullet}OH/H_2O)$=2,80 V (ως προς πρότυπο ηλεκτρόδιο υδρογόνου) αποτελούν το ισχυρότερο οξειδωτικό μέσο μετά το φθόριο. Πρόκειται για εξαιρετικά βραχύβιες ενώσεις, με μέσο χρόνο ζωής στο νερό ελάχιστα νάνο-δευτερόλεπτα, οι οποίες προσβάλλουν μη-επιλεκτικά τις οργανικές ενώσεις με αποτέλεσμα την οξείδωσή τους προς διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), νερό (H_2O), ανόργανα άλατα ή και σε οργανικά μόρια μικρότερου μοριακού βάρους, τα οποία μπορούν κατόπιν να αποικοδομηθούν βιολογικά με σχετική ευκολία [6]. Η απόδοση της οξείδωσης των οργανικών ρύπων σχετίζεται με τη συγκέντρωση και τη δραστικότητα των ριζών υδροξυλίου, οι οποίες μπορούν να διαφέρουν μεταξύ των ΠΟΜΑ. Συγκεκριμένα, οι ρίζες υδροξυλίου μπορούν να παραχθούν με διαφορετικές αποδόσεις με μία σειρά μεθόδων, όπως: α) φωτοχημικά, με υπεριώδη ακτινοβολία, παρουσία ενός ισχυρού οξειδωτικού παράγοντα ή ενός ημιαγώγιμου υλικού (π.χ. O_3/UV-B, H_2O_2/UV-C, TiO_2/UV-A), β) μέσω καταλυτικών διεργασιών Fenton και photo-Fenton (μίγμα αλάτων δισθενούς Fe και H_2O_2 με ή χωρίς ακτινοβολία UV-C ή ηλιακού φωτός), γ) με ραδιόλυση, δ) με εκπομπή ακτινοβολίας δεσμών ηλεκτρονίων, ε) με υπερήχους, στ) ηλεκτροχημικά, κτλ.

Ο συνδυασμός της ηλεκτροχημείας με το αντιδραστήριο Fenton οδήγησε στην ανάπτυξη νέων προηγμένων ηλεκτροχημικών μεθόδων οξείδωσης των οργανικών ρύπων του νερού, οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλές αποδόσεις και σημαντικά οφέλη [7]. Οι μέθοδοι αυτές συναντώνται στη βιβλιογραφία με την ονομασία *Προηγμένες Ηλεκτροχημικές Μέθοδοι Οξείδωσης* του νερού (*electrochemical advanced oxidation processes-EAOPs*), και περιλαμβάνουν όλες εκείνες τις διεργασίες διάσπασης των οργανικών ρύπων που πραγματοποιούνται, είτε απευθείας σε ηλεκτρόδια ανόδου, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση των ηλεκτροδίων BDD (Εξίσωση 1), είτε με το αντιδραστήριο Fenton, τα συστατικά του οποίου (Fe^{2+}/Fe^{3+}, H_2O_2) μπορούν να παραχθούν μερικώς ή και ολικώς μέσα από ηλεκτροδιακές αντιδράσεις. Στην πρώτη περίπτωση, η μέθοδος ηλεκτροχημικής διάσπασης των ρύπων ονομάζεται *ανοδική οξείδωση* (anodic oxidation-AO), η οποία μπορεί να συνδυαστεί και με την *καθοδική παραγωγή* H_2O_2 (μέθοδος AO-H_2O_2). Στη δεύτερη περίπτωση εντάσσεται η μέθοδος *electro-Fenton* (EF), κατά την οποία το H_2O_2 παράγεται στην κάθοδο με την προσθήκη O_2 ή αέρα (Εξίσωση 2), το οποίο αντιδρά με καταλυτικά σωματίδια σιδήρου (Fe^{2+}, Fe^{3+}, ή οξείδια του σιδήρου) προς σχηματισμό $^{\bullet}OH$ σύμφωνα με την αντίδραση Fenton (Εξίσωση 3) [7].

$$BDD + H_2O \rightarrow BDD(^{\bullet}OH) + H^+ + e^- \quad (1)$$

$$O_{2(g)} + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O_2 \quad (2)$$

$$Fe^{2+} + H_2O_2 + 2H^+ \rightarrow Fe^{3+} + H_2O + {}^{\bullet}OH \quad (3)$$

Πρόσφατες μελέτες ανέδειξαν τη σημαντική βελτίωση της οξείδωσης οργανικών ρύπων σε διατάξεις EF κατά την ταυτόχρονη έκθεση του επεξεργασμένου νερού/αποβλήτου σε υπεριώδη ακτινοβολία (UV, λ≤360nm) [8]. Η βελτίωση αυτή αποδίδεται (α) στην ενισχυμένη αναγέννηση των καταλυτικών ιόντων Fe^{2+} και την πρόσθετη παραγωγή $^{\bullet}OH$ κατά την φωτολυτική αναγωγή των τρισθενών κατιόντων σιδήρου, τα οποία απαντώνται σε όξινες τιμές pH του αποβλήτου (pH 2.8-3.5) με τη μορφή $Fe(OH)^{2+}$ (Εξίσωση 4), και (β) την απευθείας φωτόλυση τόσο των αρχικών οργανικών ρύπων όσο και των προϊόντων οξείδωσής τους, όπως τα καρβοξυλικά οξέα.

$$Fe(OH)^{2+} + h\nu \rightarrow Fe^{2+} + {}^{\bullet}OH \qquad (4)$$

Λαμβάνοντας υπόψη το σημαντικό ενεργειακό κόστος των λαμπών UV, αρκετοί ερευνητές έστρεψαν το ενδιαφέρον τους στην αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας (λ>300 nm) ως μιας εναλλακτικής και οικονομικής πηγής ενέργειας σε διεργασίες Fenton. Πράγματι, το ηλιακό φως αποδείχτηκε ικανό να αναγεννά δισθενή ιόντα σιδήρου (Εξίσωση 4) και να βελτιώνει τη συνολική απόδοση της νέας διεργασίας, η οποία συναντάται στη βιβλιογραφία με το όνομα *solar photoelectro-Fenton* (SPEF) [7,9]. Μεταξύ των ηλιακών φωτοαντιδραστήρων που έχουν μελετηθεί στη διεθνή βιβλιογραφία, οι ηλιακοί συλλέκτες με παραβολικό ανακλαστήρα (*solar compound parabolic collectors*, *CPCs*) έδειξαν τις υψηλότερες αποδόσεις για ένα πλήθος οργανικών ρυπαντών. Η αποτελεσματικότητα, ωστόσο, της νέας τεχνολογίας SPEF έχει αποδειχθεί μέχρι σήμερα μόνο σε εργαστηριακή κλίμακα, με τις περισσότερες μελέτες να βασίζονται σε μικρά ενιαία ηλεκτροχημικά κελιά (δοχεία ανάδευσης) στα οποία προσαρμόζονται τεχνητές λάμπες τύπου Xenon που προσομοιώνουν την ηλιακή ακτινοβολία. Η έλλειψη εμπεριστατωμένων μελετών SPEF σε μεγαλύτερη κλίμακα, σε συνδυασμό με τις σημαντικές προοπτικές της τεχνολογίας για πρακτικές εφαρμογές, οδήγησε στην υλοποίηση της παρούσας έρευνας η οποία αφορά τη λειτουργία μίας πρωτότυπης μονάδας SPEF για την επεξεργασία νερού και υγρών αποβλήτων σε πιλοτική κλίμακα. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα κύρια αποτελέσματα της σχετικής πειραματικής έρευνας που διενεργήθηκε στην Ηλιακή Πλατφόρμα της Αλμερίας στην Ισπανία (PSA/CIEMAT) με τη συμμετοχή τριών ερευνητικών φορέων με υψηλή εμπειρογνωμοσύνη σε προηγμένες μεθόδους επεξεργασίας νερού και αποβλήτων, και ιδιαίτερα σε ηλεκτρικές και φωτοκαταλυτικές ΠΟΜΑ. Η αξιολόγηση της απόδοσης της πιλοτικής μονάδας σε ρεαλιστικές συνθήκες βρίσκεται σε εξέλιξη, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της λειτουργίας της με βάση τεχνικά και οικονομικά κριτήρια.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

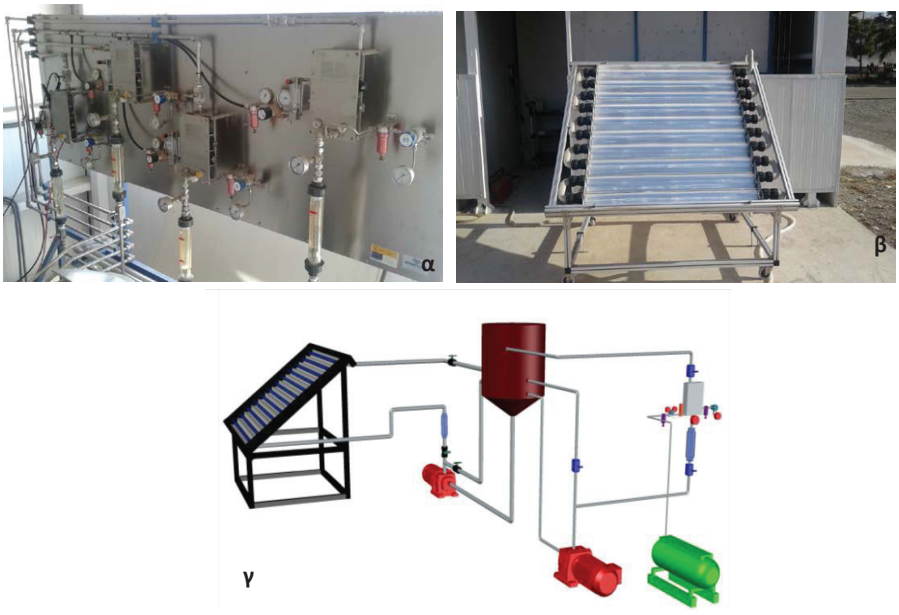
2.1. Υλικά και μέθοδοι

Όλες οι δοκιμές υλοποιήθηκαν με συνθετικά διαλύματα άνυδρου θειικού νατρίου (Fluka) συγκέντρωσης 0,05 M σε απιονισμένο νερό. Το απιονισμένο νερό παράγεται στις εγκαταστάσεις της PSA/CIEMAT από νερό γεώτρησης μετά από επεξεργασία σε μονάδα αντίστροφης ώσμωσης (*reverse osmosis, RO*) πέντε σταδίων (επεξεργασία σε μονάδα RO διπλού περάσματος μετά από προ-επεξεργασία με φίλτρο πολυπροπυλένιου, ονομαστικού μεγέθους πόρων 5μm, αμμόφιλτρο Silex και φίλτρο ενεργού άνθρακα). Η συγκέντρωση του παραγόμενου H_2O_2 μετρήθηκε φασματοφωτομετρικά στα 410nm με την προσθήκη οξυθειικού τιτανίου (IV), σύμφωνα με τη μέθοδο DIN 38409 H15. Η αποτίμηση της οξείδωσης μη βιοδιασπώμενων οργανικών ρύπων του νερού στη μονάδα SPEF διερευνήθηκε με την επεξεργασία μιγμάτων οξικού οξέος (J.T. Baker), προπιονικού οξέος (Merck) και βουτυρικού οξέος (Sigma-Aldrich), καθώς και μιγμάτων δύο φυτοφαρμάκων, του μυκητοκτόνου pyrimethanil (IQV, Agro España S.L.) και του καρβαμιδικού εντομοκτόνου methomyl (Du Pont®). Οι δοκιμές έλαβαν χώρα για σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις των παραπάνω οργανικών ουσιών (περίπου 30 mg/L οργανικού άνθρακα το καθ' ένα) οι οποίες προσομοιώνουν αρκετά επιβαρυμένα απόβλητα, όπως στραγγίσματα χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων [10] και απόβλητα βιομηχανικής παραγωγής φυτοφαρμάκων [11]. Η μέτρηση του ολικού οργανικού άνθρακα (TOC) γίνεται με τη βοήθεια αναλυτή TOC του οίκου Shimadzu, ενώ ο ποσοτικός προσδιορισμός των δύο φυτοφαρμάκων πραγματοποιείται με τη βοήθεια συστήματος υγρής χρωματογραφίας υψηλής απόδοσης (UPLC/UV Agilent Technologies Series 1200) στο οποίο προσαρμόζεται στήλη C-18 ZORBEX XDB C-18. Η μέτρηση των οργανικών οξέων γίνεται με ιοντικό χρωματογράφο (Dionex™ DX-600) με τη βοήθεια στήλης Dionex Ionpac AS11-HC. Πριν την ανάλυση όλα τα δείγματα διηθούνται διαμέσου Nylon μεμβρανών 0.22 μm. Ως πηγή δισθενών ιόντων σιδήρου χρησιμοποιείται $FeSO_4 7H_2O$ (Sigma-Aldrich), ενώ η μέτρηση της συγκέντρωσης του ολικού σιδήρου στα δείγματα γίνεται φασματο-φωτομετρικά με την προσθήκη 1,10-phenanthroline (Sigma-Aldrich) σύμφωνα με το ISO 6332. Η ρύθμιση pH των διαλυμάτων τροφοδοσίας στις επιθυμητές τιμές γίνεται με προσθήκη μικρών ποσοτήτων πυκνού

θειικού οξέος (J.T. Baker) απευθείας στη δεξαμενή τροφοδοσίας της πιλοτικής διάταξης, ενώ το pH μετρείται με εργαστηριακό πεχάμετρο (CRISON 25 pHmeter).

2.2. Πιλοτική διάταξη SPEF

Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται η πιλοτική διάταξη SPEF που βρίσκεται εγκατεστημένη στο χώρο πειραματικών εγκαταστάσεων της PSA/CIEMAT. Η μονάδα αποτελείται από τέσσερα εμπορικά ηλεκτροχημικά κελιά τύπου πλάκας-πλαισίου (EC Electro MP-Cell) και από ένα ηλιακό συλλέκτη με παραβολικό ανακλαστήρα (CPC), συνολικής επιφάνειας 2 m^2 και όγκου νερού 23,85 L. Κάθε κελί είναι εφοδιασμένο με δύο ηλεκτρόδια ανόδου/καθόδου τύπου αδάμαντα εμπλουτισμένο με κράμα βορίου-νιοβίου (Nb-BDD) και άνθρακα-PTFE (ηλεκτρόδιο διάχυσης αερίου, GDE), αντίστοιχα, ενεργής επιφάνειας το καθένα 100 cm^2 (μία πλευρά). Η μονάδα είναι εφοδιασμένη με δύο αντλίες μαγνητικής ζεύξεως (PAN World, 0,75 kW), μία για τη μεταφορά του υγρού από τη δεξαμενή τροφοδοσίας (συνολικού όγκου 200 L) στα τέσσερα ηλεκτροχημικά κελιά και μία για την ανακυκλοφορία του υγρού μεταξύ της δεξαμενής και του CPC. Η τροφοδοσία πεπιεσμένου αέρα στο ηλεκτρόδιο GDE της καθόδου επιτυγχάνεται με τη βοήθεια αεροσυμπιεστή (ABAC Air Compressor, 1,5 kW). Η τροφοδοσία ηλεκτρικού ρεύματος στα ηλεκτρόδια του κελιού πραγματοποιείται με τη βοήθεια πηγής ρεύματος του οίκου Delta Electronika (limits 70V, 22A). Τέλος, η διάταξη είναι εξοπλισμένη με ροόμετρα για τη μέτρηση της παροχής του νερού και του αέρα στα κελιά, όπως επίσης με μανόμετρα, βάνες και κατάλληλες βαλβίδες εκτόνωσης, για τη ρύθμιση και παρακολούθηση των ροών και πιέσεων στη μονάδα. Σημειώνεται ότι όλες οι ηλεκτρολύσεις έλαβαν χώρα με αρχικό όγκο διαλύματος τροφοδοσίας 25-30 L, με εξαίρεση τις δοκιμές ηλιακής αναγέννησης των δισθενών ιόντων σιδήρου (συνδυασμένη χρήση του CPC), κατά τις οποίες ο όγκος αυξήθηκε στα 75-80 L.



Εικόνα 1: Εμπρόσθια όψη α) των τεσσάρων ηλεκτροχημικών κελιών της μονάδας, και β) του ηλιακού αντιδραστήρα CPC. γ) Σχηματική αναπαράσταση της πιλοτικής διάταξης.

2.3. Σχεδιασμός πειραμάτων

Αρχικά σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν δοκιμές βελτιστοποίησης της ηλεκτροσύνθεσης H_2O_2 με τη χρήση ενός από τα τέσσερα πανομοιότυπα ηλεκτροχημικά κελιά της πιλοτικής διάταξης. Ο σχεδιασμός των πειραμάτων βασίστηκε στον εδροκεντρωμένο κεντρικό σύνθετο σχεδιασμό (Face-centered Central Composite Design, FCC) με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου Design Expert® v.7.0.0 για τις δύο κύριες παραμέτρους παραγωγής H_2O_2 (Εξίσωση 2, e^-: πυκνότητα ηλεκτρικού

ρεύματος στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων του κελιού, *j*, H^+: pH διαλύματος τροφοδοσίας) σε τρία επίπεδα. Το χαμηλό, κεντρικό και υψηλό επίπεδο τιμών κάθε παραμέτρου ορίζεται ως -1, 0, +1, και αντιστοιχεί στις τιμές που συνοψίζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Τιμές των παραμέτρων (επίπεδα) που μελετήθηκαν.

Παράμετρος	Σύμβολο	Μονάδες	Επίπεδα Τιμών		
			Χαμηλό (-1)	Κεντρικό (0)	Υψηλό (+1)
pH	A	-	3	5	7
j	B	mA/cm^2	30	65	100

Βάσει του πειραματικού σχεδιασμού πραγματοποιήθηκαν συνολικά 19 πιλοτικές δοκιμές (με δύο επαναλήψεις για κάθε ζεύγος τιμών παραμέτρων) κατά τις οποίες ηλεκτρολυτικό διάλυμα Na_2SO_4 0,05 Μ ανακυκλοφορούσε μεταξύ της δεξαμενής τροφοδοσίας και του ηλεκτροχημικού κελιού με παροχή περίπου 4,4 L/min για σύνολο 30 min (χρόνος που ισοδυναμεί με 5,7 διελεύσεις του αρχικού όγκου τροφοδοσίας των 25 L στο κελί). Η στατιστική ανάλυση διασποράς (*analysis of variance, ANOVA*) των αποτελεσμάτων οδήγησε σε χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με την επίδραση κάθε παραμέτρου ξεχωριστά, αλλά και σε συνδυασμό, στις μεταβλητές ενδιαφέροντος, δηλαδή την παραγόμενη συγκέντρωση H_2O_2 και την απόδοση ρεύματος (*current efficiency, CE%*), όπως αυτή υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (5), όπου *n* ο στοιχειομετρικός αριθμός των e^- που μετέχουν στην εξίσωση αντίδρασης (2), *F* η σταθερά του Faraday (96487 C/mol), $c_{(H2O2)}$ η συγκέντρωση του συσσωρευμένου στο κελί H_2O_2 (mg/L), *V* ο όγκος του επεξεργασμένου διαλύματος (L), ο αριθμός 1000 αντιστοιχεί σε μετατροπή μονάδων, $M_{(H2O2)}$ το μοριακό βάρος του H_2O_2 (34 g/mol), και *Q* το καταναλισκόμενο κατά την ηλεκτρόλυση φορτίο (C).

$$CE = \frac{nFc_{(H_2O_2)}V}{1000M_{(H_2O_2)}Q} x100 \qquad (5)$$

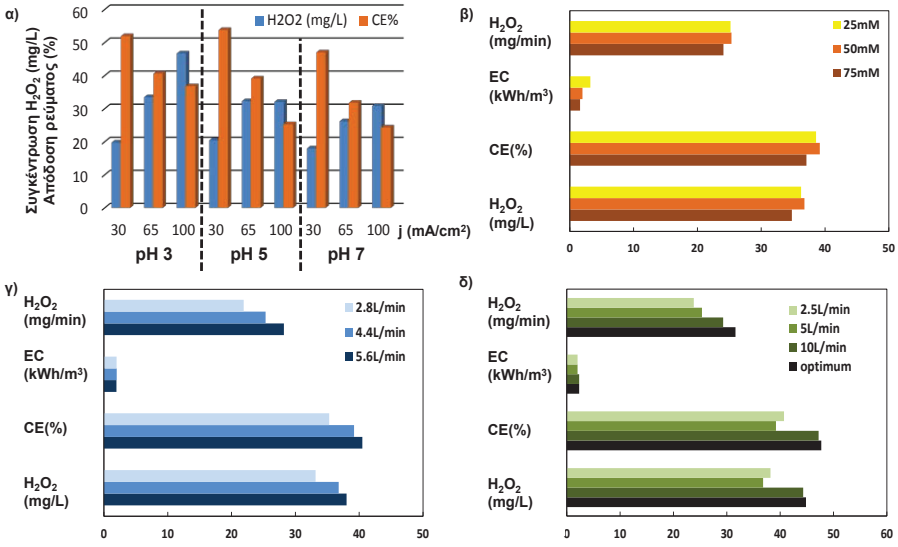
Με τη βοήθεια της μεθοδολογίας των επιφανειών απόκρισης (*Response Surface Methodology, RSM*) προσδιορίστηκαν οι βέλτιστες τιμές των δύο παραμέτρων (*pH, j*), θέτοντας ως κριτήριο την επίτευξη μέγιστων τιμών παραγωγής H_2O_2 και απόδοσης ρεύματος. Οι βέλτιστες τιμές *pH* (3,0) και *j* (74 mA/cm^2) υιοθετήθηκαν στην πορεία σε δοκιμές ηλεκτροσύνθεσης H_2O_2 για διαφορετικές συγκεντρώσεις ηλεκτρολύτη (25; 50; 75 mM Na_2SO_4), παροχής νερού τροφοδοσίας στο κελί (2,8; 4,4; 5,6 L/min), και παροχής πεπιεσμένου αέρα στο ηλεκτρόδιο καθόδου του κελιού (2,5; 5,0; 10,0 L/min). Από την ανάλυση των νέων πιλοτικών δοκιμών προέκυψαν οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας του ηλεκτροχημικού κελιού οι οποίες και εφαρμόστηκαν, τέλος, σε δοκιμές οξείδωσης μιγμάτων οργανικών οξέων και φυτοφαρμάκων.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Βελτιστοποίηση επιτόπιας ηλεκτροπαραγωγής H_2O_2

Στην Εικόνα 2α συνοψίζονται οι μέσες τιμές της επιτόπιας παραγωγής H_2O_2 και απόδοσης ρεύματος κατά την υλοποίηση των 19 πιλοτικών δοκιμών ηλεκτρόλυσης με το ένα από τα τέσσερα ηλεκτροχημικά κελιά της μονάδας. Οι τιμές αντιστοιχούν σε χρόνο ηλεκτρόλυσης περίπου 6 λεπτά, κατά τη διάρκεια του οποίου ο συνολικός όγκος του νερού τροφοδοσίας (~25 L) κυκλοφόρησε στο κελί μία φορά. Για μεγαλύτερους χρόνους ηλεκτρόλυσης ο ρυθμός ηλεκτροσύνθεσης του H_2O_2 μειώνεται σταδιακά, γεγονός που αποδίδεται στην ηλεκτροχημική αναγωγή του συσσωρευμένου H_2O_2 στο ηλεκτρόδιο της καθόδου (Εξίσωση 6). Κατά την επεξεργασία, ωστόσο, ενός αποβλήτου, οι παρασιτικές αντιδράσεις αποσύνθεσης του H_2O_2 είναι περιορισμένες, δεδομένου ότι το παραγόμενο H_2O_2 καταναλώνεται κυρίως σε αντιδράσεις οξείδωσης των διαλυμένων οργανικών ρύπων τόσο στο κελί όσο και στη δεξαμενή ανακυκλοφορίας του αποβλήτου.

$$H_2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow 2H_2O \qquad (6)$$



Εικόνα 2: Αποτελέσματα επιτόπου ηλεκτροπαραγωγής H_2O_2, απόδοσης ρεύματος (CE) και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας (EC) α) για διαφορετικές τιμές pH και πυκνότητας ρεύματος (Na_2SO_4 50 mM, παροχή νερού 4,4 L/min, παροχή αέρα 5 L/min), β) συγκέντρωσης ηλεκτρολύτη (pH 3, 74 mA/cm^2, παροχή νερού 4,4 L/min, παροχή αέρα 5 L/min), γ) παροχής νερού (Na_2SO_4 50 mM, pH 3, 74 mA/cm^2, παροχή αέρα 5 L/min), δ) παροχής αέρα στο ηλεκτρόδιο της καθόδου (Na_2SO_4 50 mM, pH 3, 74 mA/cm^2, παροχή νερού 4,4 L/min).

Με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου Design Expert® βρέθηκε ότι τα μοντέλα παραβολικής παλινδρόμησης 2^{ης} τάξης (*regression quadratic model*) (Εξίσωση 7) και αλληλεπίδρασης δύο παραγόντων (*two-factor interaction model, 2FI*) (Εξίσωση 8) περιγράφουν με μεγάλη ακρίβεια την παραγωγή H_2O_2 και την απόδοση ρεύματος, αντίστοιχα, ως συνάρτηση των παραμέτρων pH και j.

$$H_2O_2 = 2.19283 - 0.30546*pH + 0.81065*j - 0.050161*pH*j + 0.14905*pH^2 - 2.42351x10^{-3}*j^2 \quad (7)$$

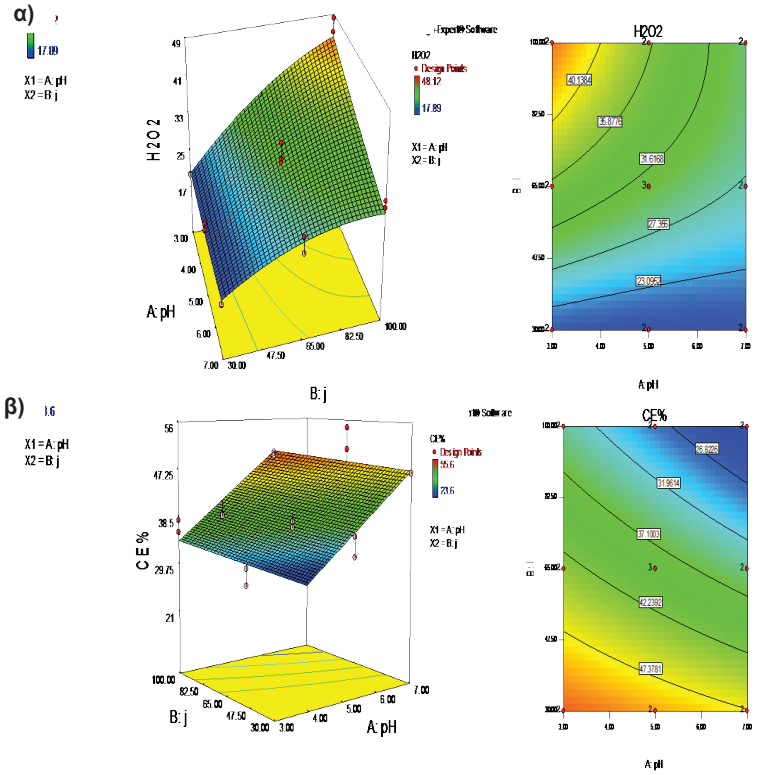
$$CE\% = 61.68262 - 0.43438*pH - 0.18146*j - 0.026875*pH*j \quad (8)$$

Συγκεκριμένα, κατά την ανάλυση ANOVA των δύο μοντέλων προσδιορίστηκαν υψηλές τιμές της συνάρτησης ελέγχου F (ακριβής έλεγχος του Fisher) (30,44 και 60,89) και μικρές τιμές πιθανότητας (p-value <0,0001), οι οποίες επιβεβαιώνουν τη στατιστική σημαντικότητα των δύο μοντέλων. Μεταξύ των δύο ανεξάρτητων μεταβλητών (A-pH, B-j), η πυκνότητα ρεύματος είχε τη μεγαλύτερη επίδραση στις αποκρίσεις των δύο μοντέλων, ενώ η αλληλεπίδραση των δύο μεταβλητών (AB) ήταν μικρή (p value >0,1). Σύμφωνα με τα δύο μοντέλα, οι βέλτιστες τιμές pH και j για τις οποίες τόσο η παραγωγή H_2O_2 όσο και η απόδοση ρεύματος παίρνουν τις μέγιστες τιμές είναι ίσες με 3 και 74 mA/cm^2, αντίστοιχα. Πιλοτικές δοκιμές με τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας του κελιού (Πίνακας 2) επιβεβαιώνουν την επαναληψιμότητα των τιμών απόκρισης και τη σταθερή ηλεκτρική απόδοση της μονάδας καθώς επίσης, και τη σημαντικότητα των δύο μοντέλων, όπως φαίνεται και από το μικρό σχετικό σφάλμα μεταξύ των πειραματικών τιμών και των τιμών που προβλέπονται από τα δύο μοντέλα (<5%).

Πίνακας 2: Επικύρωση μοντέλων ηλεκτροπαραγωγής H_2O_2 και απόδοσης ρεύματος. Πειραματικές τιμές μετά από 30 min συνεχούς ανακυκλοφορίας διαλύματος Na_2SO_4 50 mM, pH 3, με παροχή 4,4 L/min, 74 mA/cm^2, και παροχή αέρα στο ηλεκτρόδιο της καθόδου 5 L/min.

	Πιλοτική Δοκιμή		Μέσες πειραματικές τιμές	Προβλεπόμενες από μοντέλο τιμές	Σχετικό σφάλμα (%)
	α	β			
H_2O_2 (mg/L)	35.51	38.07	36.79	38.20	3.69
CE (%)	37.80	40.60	39.20	40.99	4.38

Στην Εικόνα 3 περιγράφονται οι επιφάνειες απόκρισης και οι αντίστοιχες ισομετρικές απεικονίσεις σε τρισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων, οι οποίες αποτελούνται από το σύνολο των σημείων που συνδέουν τις δύο επιλεγμένες παραμέτρους (pH, j) με τις δύο αποκρίσεις (συγκέντρωση H_2O_2, CE%). Τα διαγράμματα της Εικόνας 3 επιτρέπουν την πρόβλεψη των τιμών των δύο αποκρίσεων καθώς και τον εντοπισμό της βέλτιστης περιοχής κάθε απόκρισης. Όπως ήταν αναμενόμενο, όξινες τιμές pH ευνοούν και τις δύο αποκρίσεις. Στην περίπτωση, ωστόσο, της παροχής ρεύματος, μεγάλες τιμές j ενώ αυξάνουν τη συγκέντρωση του παραγόμενου H_2O_2, τείνουν να μειώνουν την απόδοση του ρεύματος, ανεξάρτητα από το αρχικό pH του ηλεκτρολυτικού διαλύματος. Προφανώς, για μια διεργασία διαλείποντος έργου (batch), η αυξημένη κατανάλωση ρεύματος δεν οδηγεί απαραίτητα σε γραμμική αύξηση του παραγόμενου H_2O_2 (λόγω π.χ. της αποσύνθεσης του H_2O_2 σε H_2O ή/και O_2 στα ηλεκτρόδια καθόδου και ανόδου, αντίστοιχα).



Εικόνα 3: 3D επιφάνειες απόκρισης και ισομετρικές απεικονίσεις α) της συγκέντρωσης του παραγόμενου H_2O_2 και β) της απόδοσης ρεύματος (CE%) ως συνάρτηση του αρχικού pH του νερού τροφοδοσίας και της πυκνότητας ρεύματος. Πειραματικά δεδομένα για συνεχή ανακυκλοφορία διαλύματος Na_2SO_4 50 mM, με παροχή 4.4 L/min και παροχή αέρα στο ηλεκτρόδιο της καθόδου 5 L/min.

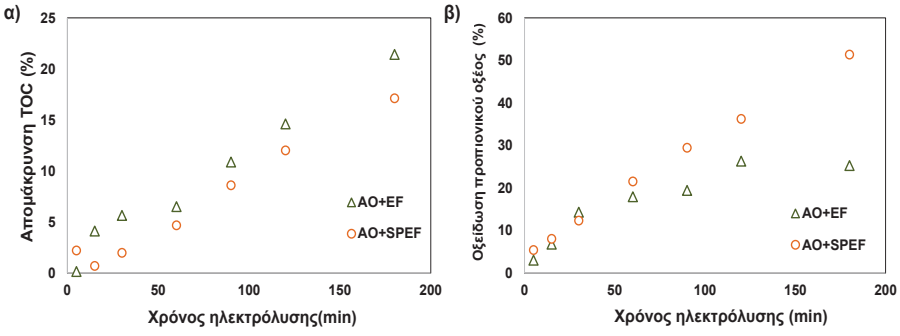
Μετά τον καθορισμό των βέλτιστων τιμών pH (3) και ηλεκτρικού ρεύματος (74 mA/cm^2 ή 7,4 A για 100 cm^2 ενεργή επιφάνεια ηλεκτροδίου), διενεργήθηκε σειρά πιλοτικών δοκιμών με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης α) της αγωγιμότητας του ηλεκτρολυτικού διαλύματος (διαφορετικές συγκεντρώσεις ηλεκτρολύτη), β) της παροχής του νερού τροφοδοσίας και γ) της παροχής του πεπιεσμένου αέρα, στην απόδοση επιτόπιας ηλεκτροπαραγωγής H_2O_2. Τα αποτελέσματα των εν λόγω δοκιμών παρουσιάζονται στα ιστογράμματα της Εικόνας 2β), 2γ) και 2δ), αντίστοιχα. Σύμφωνα με την Εικόνα 2β), η αγωγιμότητα του διαλύματος τροφοδοσίας δεν επηρεάζει απαραίτητα το ρυθμό ηλεκτροσύνθεσης H_2O_2 στο κελί, ωστόσο, έχει σημαντική επίπτωση στην ενεργειακή κατανάλωση. Συγκεκριμένα, αύξηση της συγκέντρωσης του ηλεκτρολύτη από τα 25 mM (4,59 mS/cm) στα 75 mM

(12,27 mS/cm) οδήγησε σε παραπλήσια ηλεκτροσύνθεση H_2O_2 (25,2 mg/min και 24,1 mg/min, αντίστοιχα) με τη μισή, ωστόσο κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Προφανώς, αύξηση της αγωγιμότητας ισοδυναμεί με μειωμένη ωμική αντίσταση του διαλύματος μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων του κελιού, και επομένως με ευχερέστερη μεταφορά ηλεκτρονίων. Η αύξηση, επίσης, της παροχής του νερού στο κελί επηρεάζει θετικά την παραγωγή H_2O_2 (Εικόνα 2γ), γεγονός που οφείλεται πιθανότατα στον περιορισμό των παρασιτικών αντιδράσεων αποσύνθεσης του παραγόμενου H_2O_2 στα δύο ηλεκτρόδια (μείωση χρόνου επαφής του οξειδωτικού στα ηλεκτρόδια). Τέλος, η παραγωγή H_2O_2 βελτιώνεται σημαντικά με την παροχή πεπιεσμένου αέρα στο ηλεκτρόδιο GDE της καθόδου (π.χ. από 25,3 σε 29,3 mg/min για διπλάσια παροχή αέρα) χωρίς απαραίτητα να αυξάνεται η κατανάλωση φορτίου στο κελί ως αποτέλεσμα της αυξημένης αέριας φάσης στη διεπιφάνεια του ηλεκτροδίου της καθόδου (Σχήμα 2δ).

Στην Εικόνα 2δ) σημειώνονται οι μέσες τιμές των δύο πιλοτικών δοκιμών που διενεργήθηκαν με διαλύματα Na_2SO_4 50 mM με τις πρακτικά βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας (optimum) της πιλοτικής μονάδας, όπως αυτές προσδιορίσθηκαν παραπάνω (pH 3, 7.4 A, παροχή νερού 5,3 L/min, παροχή αέρα 10 L/min). Πραγματικά, οι βέλτιστες συνθήκες οδήγησαν στις υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής απόδοσης (47,7%) και παραγωγής H_2O_2 (31,6 mg/min) στο κελί μετά από 30 min συνεχούς ανακυκλοφορίας του ηλεκτρολυτικού διαλύματος. Στην περίπτωση ενός κύκλου ανακυκλοφορίας του ηλεκτρολυτικού διαλύματος, ήτοι 6 min ηλεκτρόλυσης, οι τιμές φτάνουν τα 89,3% και 64,9 mg/min, αντίστοιχα, οι οποίες και χαρακτηρίζουν την πραγματική απόδοση της μονάδας για συνεχή παροχή νερού στο κελί. Η κατανάλωση ενέργειας στις δεδομένες συνθήκες είναι ίση με 0.4 kWh/m^3.

3.2. Οξείδωση οξέων μικρού μοριακού βάρους

Στην Εικόνα 4 περιγράφονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας μίγματος οξέων μικρού μοριακού βάρους με δύο υβριδικές οξειδωτικές τεχνικές. Η πρώτη αφορά στην ανοδική οξείδωση (AO) στο ηλεκτρόδιο Nb-BDD του ηλεκτροχημικού κελιού σε συνδυασμό με την οξείδωση Fenton (Εξίσωση 3) κατά την αντίδραση του ηλεκτρικά παραγόμενου H_2O_2 με διαλυμένα ιόντα δισθενούς σιδήρου. Η δεύτερη διεργασία είναι αντίστοιχη με την πρώτη με τη διαφορά ότι το επεξεργασμένο διάλυμα ανακυκλοφορεί ταυτόχρονα στον ηλιακό CPC αντιδραστήρα, με σκοπό την επιτόπια αναγέννηση των δισθενών ιόντων σιδήρου με βάση την Εξίσωση 4. Σύμφωνα με την Εικόνα 4α) και οι δύο τεχνικές είναι ικανές να οξειδώσουν τα τρία επιλεγμένα οξέα (οξικό, προπιονικό, βουτυρικό) προς CO_2 και H_2O, παρουσιάζοντας μικρή διαφορά στην αντίστοιχη κινητική ανοργανοποίησης. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικό επειδή η χημική δομή των εν λόγω οξέων τα καθιστά ιδιαίτερα ανθεκτικά απέναντι σε συμβατικές και προηγμένες οξειδωτικές τεχνικές. Μεταξύ των τριών οξέων, το προπιονικό (CH_3CH_2COOH) (Εικόνα 4β) και το βουτυρικό οξύ ($CH_3CH_2CH_2COOH$ εμφάνισαν μεγαλύτερη οξειδωσιμότητα, σε σχέση με το οξικό οξύ, η συγκέντρωση του οποίου μάλιστα αυξήθηκε κατά τη διάρκεια των τριών ωρών υλοποίησης των πιλοτικών δοκιμών. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται προφανώς στη μερική οξείδωση των βαρύτερων οξέων (C_3-, C_4-) προς οξικό οξύ (C_2-), το οποίο και εμφανίζει υψηλή ανθεκτικότητα απέναντι στις δύο εφαρμοζόμενες τεχνικές οξείδωσης.

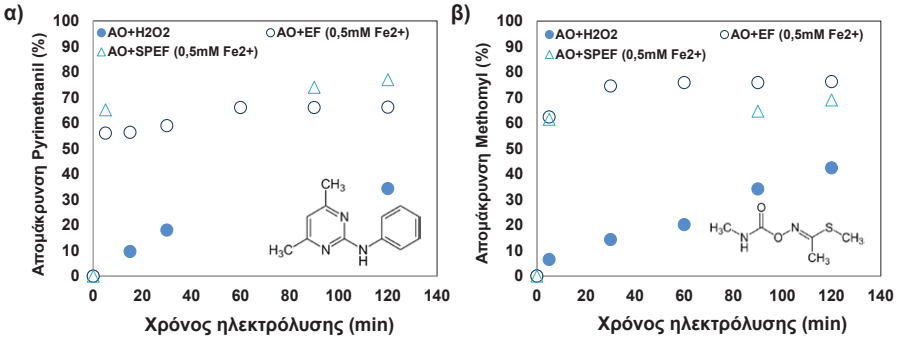


Εικόνα 4: Απομάκρυνση α) ολικού οργανικού άνθρακα και β) προπιονικού οξέος, κατά την επεξεργασία μίγματος οξέων στην πιλοτική διάταξη SPEF (AO+EF: ανοδική οξείδωση σε συνδυασμό με οξείδωση electro-Fenton, AO+SPEF: ανοδική οξείδωση σε συνδυασμό με οξείδωση solar photo-electro-Fenton). Πειραματικά δεδομένα για συνεχή ανακυκλοφορία διαλύματος Na_2SO_4 50 mM, 100 mgTOC/L (AO+EF), 40 mgTOC/L (AO+SPEF), Fe^{2+} 0,2 mM, pH 3, παροχή 5.3 L/min, παροχή αέρα 10 L/min, 74 mA/cm^2, ανακυκλοφορία διαλύματος στο CPC 25 L/min).

Η έκθεση του επεξεργασμένου αποβλήτου στην ηλιακή ακτινοβολία (SPEF) επηρέασε θετικά την απόδοση οξείδωσης της διεργασίας, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην περίπτωση του προπιονικού οξεός (Εικόνα 4β). Η βελτίωση αυτή συνδέεται προφανώς με τη μερική αναγέννηση των δισθενών ιόντων σιδήρου (Εξίσωση 4), η συγκέντρωση των οποίων μειώθηκε στα πρώτα 60 min κατά 95% (από 3,37 mg/L σε 0,17 mg/L) αλλά στη συνέχεια αυξήθηκε παίρνοντας τιμές μεταξύ 0,36 mg/L και 0,57 mg/L. Η ενίσχυση της συγκέντρωσης των Fe^{2+} συνοδεύεται από νέες αντιδράσεις Fenton και κατ' επέκταση από την παραγωγή νέων ριζών υδροξυλίου για την οξείδωση των οργανικών. Η διαπίστωση αυτή είναι έκδηλη μετά τα πρώτα 60 min επεξεργασίας (Εικόνα 4β), όπου η γραμμική απομάκρυνση του προπιονικού οξέος συνεχίστηκε στην περίπτωση της διεργασίας AO+SPEF, σε αντίθεση με τη διεργασία AO+EF, όπου η απόδοση απομάκρυνσης σταθεροποιήθηκε.

3.3. Οξείδωση φυτοφαρμάκων

Τα αποτελέσματα των πιλοτικών δοκιμών οξείδωσης των φυτοφαρμάκων pyrimethanil και methomyl συνοψίζονται στην Εικόνα 5. Από τη σύγκριση των δύο διαγραμμάτων γίνεται αντιληπτό ότι τα μόρια των δύο οργανικών ουσιών παρουσιάζουν παραπλήσια απομάκρυνση ως αποτέλεσμα της οξειδωτικής λύσης των διπλών δεσμών του αρωματικού και διαζωνικού δακτυλίου του pyrimethanil και της λύσης των απλών δεσμών μεθυλίου στο μόριο του methomyl προς μικρότερα μόρια. Οι καλύτερες αποδόσεις παρατηρούνται στην περίπτωση των δύο διεργασιών Fenton (EF, SPEF) σε συνδυασμό με την ανοδική οξείδωση στο ηλεκτρόδιο Nb-BDD. Η ανακυκλοφορία του διαλύματος στο ηλιακό CPC δεν βελτίωσε αισθητά την απόδοση της διεργασίας. Ωστόσο, ο σχετικά μικρός χρόνος υλοποίησης της εν λόγω δοκιμής (120 min), ίσως να δικαιολογεί την απόδοση αυτή, μιας και η αντίδραση αναγωγής των δισθενών κατιόντων σιδήρου (Εξίσωση 4), φαίνεται να ενεργοποιείται σε μεγαλύτερους χρόνους επεξεργασίας, όπως φάνηκε και στην περίπτωση της επεξεργασίας των τριών οξέων (Εικόνα 4β). Σημειώνεται ότι οι μικροί χρόνοι επεξεργασίας στις εν λόγω δοκιμές οφείλονται στην ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στην διάταξη, ως αποτέλεσμα της ισχυρής ηλιοφάνειας κατά τις ημέρες υλοποίησής τους. Νέες δοκιμές βρίσκονται, ωστόσο, σε εξέλιξη, με σκοπό τη βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας της πιλοτικής διάταξης και τη διερεύνηση της σκοπιμότητας της συνδυασμένης ηλιακής επεξεργασίας στην απόδοση της υβριδικής διεργασίας.



Εικόνα 5: Απομάκρυνση των α) pyrimethanil (PYR) και β) methomyl (MET), κατά την επεξεργασία μίγματος των δύο φυτοφαρμάκων στην πιλοτική διάταξη SPEF (AO+H_2O_2: ανοδική οξείδωση σε συνδυασμό με επιτόπια ηλεκτροπαραγωγή H_2O_2 απουσία σιδήρου, AO+EF: ανοδική οξείδωση σε συνδυασμό με οξείδωση electro-Fenton, AO+SPEF: ανοδική οξείδωση σε συνδυασμό με οξείδωση solar photo-electro-Fenton). Πειραματικά δεδομένα για συνεχή ανακυκλοφορία διαλύματος Na_2SO_4 50 mM, PYR 46,4 mg/L, MET 90,7 mg/L, pH 3, παροχή 5.3 L/min, παροχή αέρα 10 L/min, 74 mA/cm^2, ανακυκλοφορία διαλύματος στο CPC 25 L/min).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία περιγράφονται τα αποτελέσματα της δοκιμαστικής λειτουργίας μιας καινοτόμου πιλοτικής διάταξης ηλιακής φωτοηλεκτροχημικής οξείδωσης Fenton ως προς την απορρύπανση νερών από ανθεκτικές συνθετικές οργανικές ουσίες. Αρχικά εξετάστηκε η επίδραση διάφορων παραμέτρων σε διεργασία διαλείποντος έργου, σχετικά με την επιτόπια ηλεκτροπαραγωγή

H_2O_2 κατά την ηλεκτρόλυση συνθετικών διαλυμάτων Na_2SO_4 50 mM σε ηλεκτροχημικό κελί τύπου πλάκας-πλαισίου αποτελούμενο από ηλεκτρόδια ανόδου/καθόδου από Nb-BDD/άνθρακα-PTFE ενεργής επιφάνειας 100 cm^2. Η ηλεκτρόλυση στις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας της διάταξης (pH 3, 7.4 A, παροχή νερού 5.3 L/min, παροχή αέρα 10 L/min) οδήγησε στην παραγωγή H_2O_2 με ρυθμό 64,9 mg/min και ηλεκτρική απόδοση 89,3%, με μικρή κατανάλωση ενέργειας για τον σκοπό αυτό (0,4 kWh/m^3). Οι τιμές αυτές είναι απ' τις μεγαλύτερες που έχουν καταγραφεί στη σχετική βιβλιογραφία και ίσως οι υψηλότερες σε δοκιμές πιλοτικής κλίμακας με μεγάλους όγκους επεξεργασίας (5.3(L/min)x60(min)=318 L/h).

Πιλοτικές δοκιμές με ανθεκτικά στην οξείδωση οξέα μικρού μοριακού βάρους και φυτοφάρμακα ανέδειξαν το δυναμικό των υβριδικών διεργασιών AO+EF και AO+SPEF ως προς την οξείδωση και ανοργανοποίηση των οργανικών ουσιών. Οι δοκιμές ανέδειξαν τη σπουδαιότητα της δομής των οργανικών μορίων στην αποτελεσματική οξείδωσή τους (βουτυρικό>προπιονικό>οξικό; methomyl>pyrimethanil), με την οξείδωση να είναι μεγαλύτερη για ουσίες πλούσιες σε ηλεκτρόνια, και μικρότερη για ουσίες αντίστοιχα φτωχές σε ηλεκτρόνια, όπως το οξικό οξύ, όπως επίσης, και τον ανταγωνισμό για οξειδωτικά αντιδραστήρια με άλλα οργανικά συστατικά που μπορούν να συνυπάρχουν στο διάλυμα τροφοδοσίας (όπως στην περίπτωση των οργανικών διαλυτών που περιέχονται στα εμπορικά σκευάσματα των φυτοφαρμάκων που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες των δοκιμών). Η αναγέννηση των δισθενών ιόντων σιδήρου στον ηλιακό CPC αντιδραστήρα ήταν εφικτή αλλά σχετικά περιορισμένη (10-15% μετά από δύο ώρες επεξεργασίας). Νέες δοκιμές βρίσκονται σε εξέλιξη με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης ηλιακής αναγέννησης των δισθενών ιόντων σιδήρου, εξετάζοντας για το σκοπό αυτό διαφορετικούς ρυθμούς παροχής του νερού στον CPC αντιδραστήρα, διαφορετικές αρχικές συγκεντρώσεις σιδήρου καθώς και σύμπλοκα σιδήρου με άλατα άμινο πολυκαρβοξυλικού οξέος (π.χ. (S,S)-Ethylened iamine-N,N-disuccinic acid trisodium, EDDS) τα οποία έχουν χρησιμοποιηθεί από την ερευνητική ομάδα σε προηγούμενες επιτυχείς δοκιμές solar photo-Fenton [12].

Η καινοτόμος πιλοτική μονάδα SPEF μπορεί να βρει πολλές πρακτικές εφαρμογές στον τομέα της επεξεργασίας πόσιμου νερού αλλά και της τριτοβάθμιας επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, επειδή εμφανίζει μια σειρά από σημαντικά πλεονεκτήματα. Σημαντικότερα από αυτά είναι η σχεδόν μηδενική απόρριψη νερού ή άλλων ουσιών στο περιβάλλον, λόγω απουσίας κάποιου απορρεύματος (wastewater ή reject stream), η μηδενική προσθήκη δαπανηρών και επικίνδυνων χημικών ή άλλων οξειδωτικών ουσιών, όπως Cl_2, O_3, ή H_2O_2 για την απομάκρυνση οργανικών ρύπων του νερού, και η περιορισμένη ενεργειακή κατανάλωση, γεγονός που την καθιστά οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον τεχνολογία. Αν και τα μέχρι τώρα προκαταρτικά αποτελέσματα θεωρούνται αρκετά ενθαρρυντικά, κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω έρευνα κυρίως σε δύο κατευθύνσεις. Η πρώτη αφορά στις πειραματικές μελέτες που προσομοιάζουν καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες και τις συστάσεις στα τυπικά επιφανειακά νερά, ενώ η δεύτερη σχετίζεται με την ανάπτυξη αλλά και τη βελτιστοποίηση της μονάδας για εφαρμογές ακόμα μεγαλύτερης κλίμακας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Εκφράζονται ευχαριστίες στο προσωπικό της Plataforma Solar de Almeria, CIEMAT, για την αγαστή συνεργασία και φιλοξενία του Δρ. Πλάκα στις εγκαταστάσεις της πλατφόρμας, όπως επίσης και στην Ευρωπαϊκή Ένωση για τη χρηματοδότηση του συνεργατικού έργου "Decontamination of waters containing synthetic organic micropollutants by a solar-light driven photoelectro-Fenton oxidation system (SOLEFOS)" στα πλαίσια του $7^{ου}$ Προγράμματος Πλαίσιο: Financial support by the Access to Research Infrastructures activity in the 7^{th} Framework Programme of the EU - SFERA Grant Agreement n. 228296.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Loos, R., Gawlik, B.M., Locoro, G., Rimaviciute, E., Contini S., and Bidoglio, G., 2009, "EU-wide survey of polar organic persistent pollutants in European river waters", Env. Pollut., 157, pp. 561–568.

[2] NORMAN Network, 2017, http://www.norman-network.net/?q=Home, last accessed October 2017.

[3] Jiang, J.-Q., Zhou, Z., and Sharma, V.K. 2013, “Occurrence, transportation, monitoring and treatment of emerging micro-pollutants in waste water — A review from global views”, Microchem. J., 110, pp. 292-300.

[4] Petrie, B., Barden, R., and Kasprzyk-Hordern, B. 2015, “A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: Current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring”, Wat. Res., 72, pp. 3-27.

[5] Comninellis, C., Kapalka,A., Malato, S., Parsons, S.A., Poulios, I., and Mantzavinos, D., 2008, “Perspective Advanced oxidation processes for water treatment: advances and trends for R&D”, J. Chem. Technol. Biotechnol., 83, pp. 769–776.

[6] Oller, I., Malato, S., and Sánchez-Pérez, J.A., 2011, “Combination of Advanced Oxidation Processes and biological treatments for wastewater decontamination—A review”, Sci. Total Env., 409, pp. 4141-4166.

[7] Brillas, E., Sirés, I., and Oturan, M.A., 2009, “Electro-Fenton process and related electrochemical technologies based on Fenton’s reaction chemistry”, Chem. Rev., 109, pp. 6570–6631.

[8] Liu, S., Zhao, X-R., Sun, H-Y., Li, R-P., Fang, Y-F., and Y-P. Huang, 2013, “The degradation of tetracycline in a photo-electro-Fenton system”, Chem. Eng. J., 231, pp. 441-448.

[9] Garza-Campos, B.R., Guzmán-Mar, J.L., Reyes, L.H., Brillas, E., Hernández-Ramírez, A., and Ruiz-Ruiz, E.J., 2014, “Coupling of solar photoelectro-Fenton with a BDD anode and solar heterogeneous photocatalysis for the mineralization of the herbicide atrazine”, Chemosphere, 97, pp. 26-33.

[10] Van Gulck, J.F., Rowe, R.K., 2004, “Evolution of clog formation with time in columns permeated with synthetic landfill leachate” J. Contam. Hydrol., 75(1), pp. 115-139.

[11] Chiron, S., Fernandez-Alba, A., Rodriguez, A., Garcia-Calvo, E. 2000, “Pesticide chemical oxidation: state-of-the-art”, Water Res. 34, pp. 366–377.

[12] Miralles-Cuevas, S., Oller, I., Agüera, A., Sánchez Pérez, J.A., Malato, S. 2017, “Strategies for reducing cost by using solar photo-Fenton treatment combined with nanofiltration to remove microcontaminants in real municipal effluents: Toxicity and economic assessment”, Chem. Eng. J., 318, pp. 161-170.

ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗ ΑΝΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΟΝΟΛΥΣΗ ΤΗΣ ΓΛΥΚΕΡΟΛΗΣ ΣΕ ΥΓΡΗ ΦΑΣΗ ΚΑΙ ΣΕ ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑ ΜΗ-ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΡΟΗΣ

Α.Σερέτης, Ν.Μαλαμάς, Σ.Κατσαρός, Α. Μπρούζγου, Π.Τσιακάρας*

Εργαστήριο Εναλλακτικών Συστημάτων Μετατροπής Ενέργειας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Πεδίον Άρεως 38334, Βόλος, e-mail: tsiak@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετώνται οι αντιδράσεις της αναμόρφωσης και της υδρογονόλυσης της γλυκερόλης σε υδατική φάση, σε αντιδραστήρα μη-συνεχούς λειτουργίας. Χρησιμοποιείται ως καταλύτης 65% Ni πάνω σε φορέα SiO_2-Al_2O_3. Πιο συγκεκριμένα διερευνώνται η εξάρτηση: α) της αέριας και υγρής περιεκτικότητας των προϊόντων και β) της μετατροπής της γλυκερόλης, από: 1) τον χρόνο αντίδρασης (30-240 min), 2) τη θερμοκρασία λειτουργίας (200°-240°C, 3) τη συγκέντρωση της γλυκερόλης (1-10 wt%) , 4) το βάρος του καταλύτη (0.5-10 γραμμάρια), 5) το λόγο όγκου αέριας προς την υγρή φάση.

Με βάση την ανάλυση τα κύρια αέρια προϊόντα ήταν: H_2, CH_4, CO_2, ενώ τα κύρια υγρά προϊόντα ήταν : προπυλενογλυκόλη (PG), αιθυλενογλυκόλη (EG), αιθανόλη και ακετόλη (acetol). Ο βαθμός μετατροπής της γλυκερόλης αυξάνεται με την εξέλιξη της αντίδρασης και με την αύξηση της θερμοκρασίας, φτάνοντας σε πλατό. Επιπλέον αποδεικνύεται ότι η απόδοση παραγωγής υδρογόνου μεγιστοποιείται για μικρούς χρόνους αντίδρασης, χαμηλές συγκεντρώσεις γλυκερόλης και αυξημένους λόγους όγκου αέριας προς την υγρή φάση, φτάνοντας μέχρι το 23.5%. Αντίθετα, η απόδοση παραγωγής προπυλενογλυκόλης μεγιστοποιείται σε μεγάλους χρόνους αντίδρασης, φτάνοντας μέχρι 22%.

Η υψηλότερη τιμή της μετατροπής σε αέρια προϊόντα βρέθηκε περίπου 73.6%, ενώ η υψηλότερη τιμή της μετατροπής σε υγρά προϊόντα υπολογίστηκε 35.6%. Συμπερασματικά, η αυξημένη συγκέντρωση του καταλύτη ενισχύει τη διάσπαση των δεσμών C-C και το σχηματισμό αιθυλενογλυκόλης, αιθανόλης και μεθανίου.

Λέξεις Κλειδιά: *γλυκερόλη, υδρογόνο, αναμόρφωση υδατικής φάσης, υδρογονόλυση, νικέλιο, προπυλενογλυκόλη*

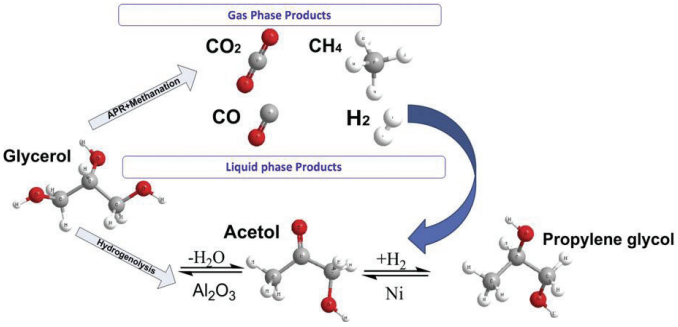
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μόλυνση του περιβάλλοντος καθώς και οι εξάντληση των φυσικών πόρων του πετρελαίου καθιστούν επιτακτική την ανάγκη χρήσης ανανεώσιμων πόρων όπως το βιοντίζελ. Το βιοντίζελ παρασκευάζεται από φυτικά έλαια και ζωικά λίπη. Η παρασκευή του καθώς και η συνολική καύση του θεωρείται ανεξάρτητη του άνθρακα [1-3]. Το κυριότερο παραπροϊόν της επεξεργασίας του (10 wt% παραγόμενου βιοντίζελ) είναι η γλυκερόλη [4] καθιστώντας απαραίτητο την εύρεση αποτελεσματικής και οικονομικά συμφέρουσα χρήσης αυτής. Επιπλέον σήμερα η γλυκερόλη αποτελεί βασικό συστατικό για την παραγωγή διαφόρων ωφέλιμων χημικών ουσιών (ολεφίνων) και καυσίμων όπως το υδρογόνο (H_2), [5-11]. Η προπυλενογλυκόλη (PG), αποτελεί ένα προϊόν υψηλής αξίας το οποίο μπορεί να παραχθεί από τη γλυκερόλη, με εφαρμογές στη φαρμακοβιομηχανία, στην αυτοκινητοβιομηχανία και στη βιομηχανία τροφίμων [12].

Η πλέον μελετημένη μέθοδος για τη μετατροπή της γλυκερόλης σε διάφορα προϊόντα, είναι η αναμόρφωση με ατμό [13, 14]. Ωστόσο, μία από τις πιο αναπτυσσόμενες καταλυτικές αντιδράσεις μετατροπής της γλυκερόλης είναι η αναμόρφωση υδατικής φάσης (Aqueous Phase Reforming, APR) η οποία παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 2002 [15]. Η APR αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη μέθοδο καθώς: 1) μπορεί να πραγματοποιηθεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με τη διεργασία αναμόρφωσης με ατμό, 2) δεν είναι απαραίτητη η εξάτμιση του νερού και της γλυκερόλης και 3) ελαχιστοποιεί τις ανεπιθύμητες αντιδράσεις αποσύνθεσης. Μεταξύ των διαφόρων καταλυτικών συστημάτων, αυτά που ερευνούνται εκτενέστερα για την αναμόρφωση υδατικής φάσης με σκοπό την παραγωγή H_2 σε αντιδραστήρα μη-συνεχούς ροής είναι καταλύτες με βάση την πλατίνα (Pt)[16-20] και το νικέλιο (Ni) [20-22]. Στο παρελθόν έχει μελετηθεί η αναμόρφωση υδατικής φάσης της γλυκερόλης σε αντιδραστήρα μη-συνεχούς ροής (V=100 ml) σε 3 διαφορετικούς καταλύτες (5% Pt/Al_2O_3, 5% Pt/C και Ni 2400). Το μεγαλύτερο ποσοστό H_2 παράχθηκε με καταλύτες με βάση την Pt [20].

Η καταλυτική υδρογονόλυση σε υδατική φάση αποτελεί μια από τις πιο ενδιαφέρουσες διεργασίες για την παραγωγή προπυλενογλυκόλης [23-37]. Η υδρογονόλυση της γλυκερόλης απαιτεί ως αντιδρών H_2 . Μια ενδιαφέρουσα εναλλακτική για την αποφυγή της χρήσης H_2 είναι η επιτόπου παραγωγή H_2 κατά τη διάρκεια της αντίδρασης. Με τον τρόπο αυτό, η υψηλού κόστους παροχή εξωτερικού H_2 καθίσταται μη αναγκαία. Αρκετές έρευνες έχουν μελετήσει την δυνατότητα συνδυασμού τον δύο μεθόδων (αναμόρφωση υδατικής φάσης της γλυκερόλης και υδρογονόλυσης) με χρήση κυρίως καταλυτών Pt [38-42], Pd/Fe [43].

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η εύρεση των κατάλληλων συνθηκών αντίδρασης που να ευνοούν: 1) την αναμόρφωση της γλυκερόλης σε υδατική φάση για την παραγωγή H_2, 2) την υδρογονόλυση της γλυκερόλης σε υδατική φάση με επιτόπου παραγωγή H_2 για την παραγωγή προπυλενογλυκόλης χρησιμοποιώντας για πρώτη φορά καταλύτη νικελίου σε φορέα πυριτίας-αλουμίνας. Η όλη διαδικασία παρουσιάζεται σχηματικά στην *Εικόνα 1*.



Εικόνα 1: Υδρογονόλυση της γλυκερόλης με επιτόπου παραγωγή H_2 (από APR) για παραγωγή προπυλενογλυκόλης.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Υλικά

Η γλυκερόλη (≥99.5%, Sigma-Aldrich) χρησιμοποιήθηκε χωρίς περαιτέρω επεξεργασία. Ο καταλύτης νικελίου (65wt%)σε πυρίτια/αλούμινα με καταλυτική επιφάνεια 190 m^2g^{-1} σταθεροποιήθηκε με τη διαδικασία της αναγωγής και χρησιμοποιήθηκε σε μορφή σκόνης.

2.2. Χαρακτηρισμός Καταλυτών

Ο φυσικοχημικός χαρακτηρισμός των καταλυτών πραγματοποιήθηκε με την τεχνική περίθλασης ακτίνων X (XRD) με τη βοήθεια ενός D/Max-IIIA (Rigaku Co., Japan) που χρησιμοποιεί Cu Ka (λ = 0.15406 nm) ως πηγή ακτινοβολίας. Τα δείγματα σαρώθηκαν σε εύρος $10 \leq 2\theta \leq 75°$.

2.3. Δοκιμές Καταλυτών

Τα πειράματα APR πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακό αντιδραστήρα όγκου 600 ml μη-συνεχούς ροής υπό υψηλή πίεση (Parr Instrument Company-Model 4563). . Το επιλεγμένο εύρος των παραμέτρων αντίδρασης επιλέχτηκε με βάση την αναφορά [44] και από δικές προκαταρκτικές πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Εναλλακτικών Συστημάτων Μετατροπής Ενέργειας. Το αντιδρών μείγμα(100 ml) παρασκευάστηκε με υδατικό διάλυμα 110wt% γλυκερόλης με 0.,5, 1,0, 2.5, 10,0g καταλύτη $Ni(65wt\%)/SiO_2$-Al_2O_3.Αρχικά εισάγεται το προαναφερθέν μείγμα στον αντιδραστήρα και στη συνέχεια τροφοδοτείται αέριο N_2 (1 bar). Έπειτα αυξάνεται η πίεση του αντιδραστήρα στην επιθυμητή πίεση έναρξης της αντίδρασης. Οι πειραματικές δοκιμές διεξήχθησαν στους 200, 220 και 240 °C, που είχαν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία αυτογενών πιέσεων της τάξεως των 16,0, 23,5 και 33,5 bar, αντίστοιχα. Ο ρυθμός ανάδευσης ρυθμίστηκε στις 300 rpm. Δείγματα αερίων και υγρών προϊόντων λήφθηκαν σε τέσσερις διαφορετικούς χρόνους αντίδρασης (30 λεπτά, 60 λεπτά, 120 λεπτά και 240 λεπτά). Τα δείγματα υγρών απομακρύνονταν περιοδικά από τον αντιδραστήρα στους προαναφερθέντες χρόνους αντίδρασης. Ειδικά, το αέριο εκροής ψύχθηκε σε συμπυκνωτή για να υγροποιήσει τους συμπυκνωμένους ατμούς και έπειτα ένα δείγμα αερίου ελήφθη με τη βοήθεια σύριγγας αερίου όγκου 5 ml.

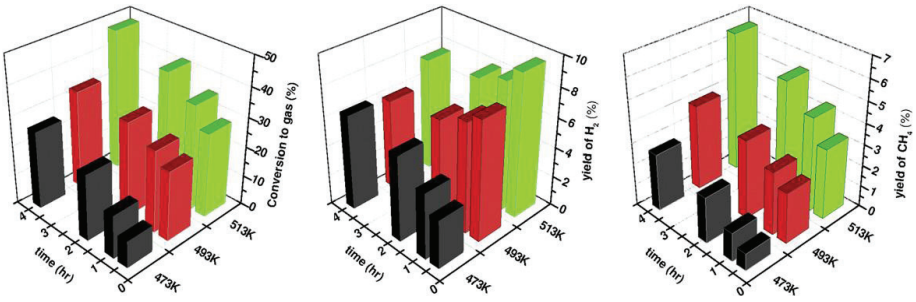
2.4. Ανάλυση Προϊόντων

Η ανάλυση των αερίων προϊόντων διεξήχθη με τη βοήθεια αέριου χρωματογράφου (Shimadzu GC-14B) εξοπλισμένου με ανιχνευτές θερμικής αγωγιμότητας και ιονισμού φλόγας .Η στήλη 60/80 Carboxen-1000 χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση των προϊόντων. Τα κυριότερα αέρια προϊόντα που ανιχνεύθηκαν ήταν H_2, CO, CH_4 και CO_2. Οι μοριακές συνθέσεις των αέριων προϊόντων υπολογίστηκαν χωρίς να ληφθεί υπόψη το ποσό του ατμού και του αρχικά χρησιμοποιούμενου αζώτου. Η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της ανάλυσης προγραμματίστηκε ως εξής: 10 λεπτά στους 36 °C και στη συνέχεια αύξηση της θερμοκρασίας στους 140 °C με ρυθμό θέρμανσης $10°Cmin^{-1}$, διατηρώντας αυτή την τιμή θερμοκρασίας μέχρι το τέλος της ανάλυσης. Σημειώνεται ότι πριν από την έναρξη των πειραματικών μετρήσεων πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση του αέριου χρωματογράφου χρησιμοποιώντας πρότυπα μίγματα αερίων. Η ανάλυση των υγρών προϊόντων πραγματοποιήθηκε σε αέριο χρωματογράφο (Agilent 7890A) εξοπλισμένο με στήλη DB-WAX (30 m×0,53 mm×1,0 μm) και ανιχνευτή ιονισμού φλόγας (FID). Τα υγρά προϊόντα εγχύθηκαν στον αέριο χρωματογράφο με μικρο-σύριγγα των 10 ml. Τα υγρά προϊόντα που ανιχνεύθηκαν ήταν ακεταλδεϋδη, ακετόνη, μεθανόλη, αιθανόλη, 1-προπανόλη, ακετόλη, γαλακτικό οξύ, προπυλενογλυκόλη, αιθυλένιο γλυκόλη και γλυκερόλη. Η θερμοκρασία της στήλης κατά τη διάρκεια της ανάλυσης προγραμματίστηκε ως εξής: 7 λεπτά στους 35 °C, στη συνέχεια αύξηση της θερμοκρασίας στους 215 °C με ρυθμό θέρμανσης 5 $°Cmin^{-1}$ και διατήρηση αυτής της θερμοκρασίας μέχρι το τέλος της ανάλυσης. Για την ανάλυση στον αέριο χρωματογράφο χρησιμοποιήθηκε το ακετονιτρίλιο ως διαλύτης. Η μέθοδος εσωτερικού προτύπου πολλαπλού σημείου χρησιμοποιήθηκε για την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων. Η ακρίβεια των υπολογισμένων τιμών ήταν εντός ±5% και τα πειράματα θα μπορούσαν να αναπαραχθούν με σχετικό σφάλμα ±10%.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

3.1. Επίδραση του χρόνου αντίδρασης και της θερμοκρασίας

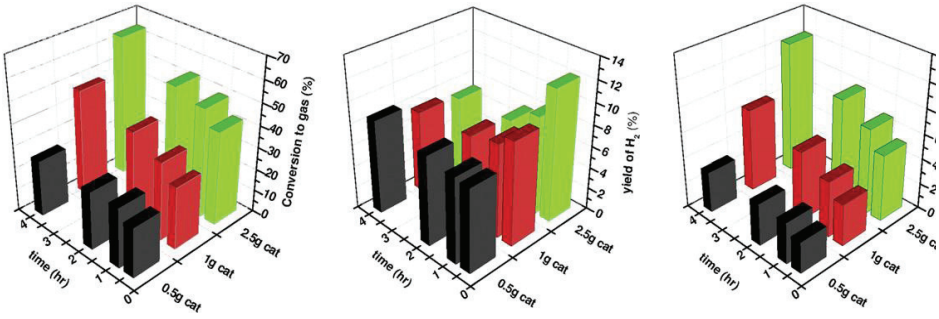
Η μετατροπή της γλυκερόλης σε αέρια προϊόντα, η απόδοση παραγωγής υδρογόνου καθώς και μεθανίου ως συνάρτηση του χρόνου αντίδρασης και της θερμοκρασίας απεικονίζονται σχηματικά στην *Εικόνα 2*. Αξίζει να σημειωθεί πως η μέγιστη τιμή της μετατροπής της γλυκερόλης σε αέρια προϊόντα φτάνει περίπου το 48% στους 240 ºC για 4 ώρες αντίδρασης, ενώ στις ίδιες συνθήκες η παραγωγή μεθανίου κυμαίνεται στο 6,6%. Τέλος, η υψηλότερη τιμή παραγωγής υδρογόνου, 9,5%, εμφανίζεται στους 240 ºC για 30 λεπτά αντίδρασης.



Εικόνα 2: Μετατροπή σε αέρια προϊόντα, παραγωγή υδρογόνου και παραγωγή μεθανίου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας και του χρόνου αντίδρασης κατά την αναμόρφωση υγρού διαλύματος (1% κ.β.) γλυκερόλης σε νερό σε 1 gr καταλύτη 65% Ni/ SiO_2-Al_2O_3.

3.2. Επίδραση της συγκέντρωσης του καταλύτη

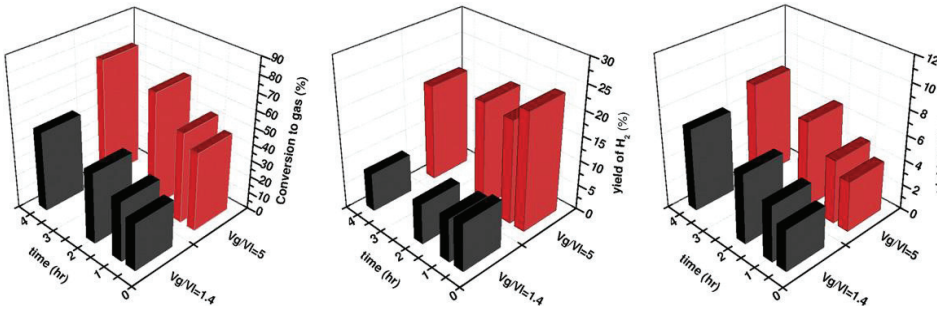
Στην *Εικόνα 3* παρατηρείται ότι με την αύξηση της συγκέντρωσης του καταλύτη από 0.5 σε 1 g και από 1 σε 2.5 g ,η μετατροπή της γλυκερόλης σε αέρια προϊόντα αυξήθηκε σημαντικά από 25.3 σε 48% και από 48 σε 64.2%, αντίστοιχα. Ο Yadav και οι συνεργάτες [33] του μελέτησαν και έβγαλαν χρήσιμα συμπεράσματα για την επίδραση της αύξησης της ποσότητας του καταλύτη (για εύρος 0,2-0,65 g). Επιπλέον, η μέγιστη παραγωγή του μεθανίου εντοπίζεται μετά από 4 ώρες αντίδρασης για 2.5 g καταλύτη και είναι 10,4%, ενώ η υψηλότερη τιμή του υδρογόνου είναι 12,18% για 2,5 g καταλύτη αλλά σε 30 λεπτά αντίδρασης.



Εικόνα 3: Μετατροπή σε αέρια προϊόντα, παραγωγή υδρογόνου και παραγωγή μεθανίου ως συνάρτηση 3 διαφορετικών συγκεντρώσεων καταλύτη (0.5-1-2.5 g καταλύτη 65% Ni/ SiO_2-Al_2O_3) και του χρόνου αντίδρασης κατά την αναμόρφωση υγρού διαλύματος (1wt%) γλυκερόλης σε νερό στους 240 ºC.

3.3. Επίδραση του λόγου όγκου αέριας προς υγρή φάση

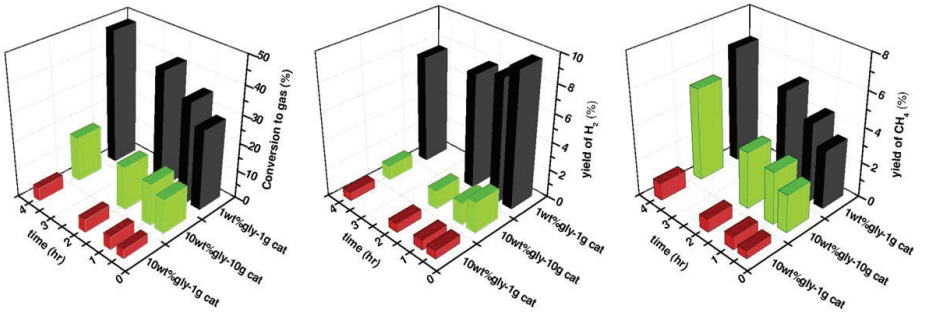
Η μετατροπή σε αέρια προϊόντα, η παραγωγή υδρογόνου και η παραγωγή μεθανίου ως συνάρτηση του χρόνου αντίδρασης για 2 διαφορετικούς λόγους όγκου αέριας προς την υγρή φάση παρουσιάζονται στην *Εικόνα 4*. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μετατροπή της γλυκερόλης σε αέρια προϊόντα αυξάνεται με την αύξηση του όγκου αέριας φάσης (V_g) και την εξέλιξη της αντίδρασης, φτάνοντας στη μέγιστη τιμή της (πλατό) 73,6% στους 240 ºC και για 4 ώρες αντίδρασης. Καθώς αυξάνεται ο λόγος V_g/V_l (από 1.4 σε 5), η τελική αυτογενής πίεση του συστήματος μειώνεται (από 40 στα 37 bar), ενισχύοντας έτσι τον σχηματισμό των τελικών αέριων προϊόντων. Αυτή η τιμή είναι η υψηλότερη συγκριτικά με προηγούμενες μελέτες [20-22]. Τέλος, όσον αφορά στην παραγωγή υδρογόνου, παρατηρείται διακύμανση από 9,5 έως 23,5% για 30 λεπτά της αντίδρασης (T=240 °C), ενώ αντίστοιχα για την παραγωγή μεθανίου, από 6,6 έως 7,8% για 4 ώρες αντίδρασης (T=240 ºC).



Εικόνα 4: Μετατροπή σε αέρια προϊόντα, παραγωγή υδρογόνου και παραγωγή μεθανίου ως συνάρτηση του χρόνου αντίδρασης για 2 διαφορετικούς λόγους V_g/V_l (1,4, 5) σε υγρό διάλυμα (1wt%) γλυκερόλης σε νερό (με λόγο καταλύτη προς γλυκερόλη 0.25), στους 240 °C.

3.4. Επίδραση της συγκέντρωσης της γλυκερόλης

Η μετατροπή σε αέρια προϊόντα, η απόδοση παραγωγής υδρογόνου και η απόδοση παραγωγής μεθανίου ως συνάρτηση του χρόνου αντίδρασης για τρείς διαφορετικούς λόγους, wt%γλυκερόλη/g καταλύτη, 1/1, 10/10 και 10/1 στους 240 ºC απεικονίζονται στην *Εικόνα 5*. Γίνεται κατανοητό πως η αύξηση της συγκέντρωσης της γλυκερόλης (για σταθερή ποσότητα καταλύτη- $2^η$ περίπτωση) μειώνει σημαντικά τη μετατροπή της γλυκερόλης σε αέρια προϊόντα, ενώ περιορίζει και την παραγωγή υδρογόνου και μεθανίου. Αυτό το γεγονός οφείλεται κυρίως στη μείωση του λόγου καταλύτη/γλυκερόλη (από 0,25 σε 0,025). Στην $3^η$ περίπτωση, το βάρος του καταλύτη αυξάνεται έτσι ώστε να είναι ίδιος ο λόγος καταλύτη/γλυκερόλη (=0,25). Έτσι, συγκριτικά με τη $2^η$ περίπτωση, η μετατροπή σε αέρια προϊόντα, καθώς και η παραγωγή υδρογόνου και μεθανίου είναι υψηλότερες. Παρ' όλα αυτά, με εξαίρεση την παραγωγή μεθανίου, η μετατροπή σε αέρια προϊόντα και η παραγωγή υδρογόνου είναι πολύ κατώτερες συγκριτικά με την $1^η$ περίπτωση.



Εικόνα 5: Μετατροπή σε αέρια προϊόντα, παραγωγή υδρογόνου και παραγωγή μεθανίου ως συνάρτηση του χρόνου αντίδρασης και 3 διαφορετικών λόγων wt%γλυκερόλη/g καταλύτη στους 240 °C.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο καταλύτης 65% Ni πάνω σε φορέα SiO_2 –Al_2O_3 βρέθηκε να είναι αποτελεσματικός τόσο για την αναμόρφωση, όσο και για την υδρογονόλυση της γλυκερόλης σε υδατική φάση.

Η περιεκτικότητα και η παραγωγή προϊόντων καθώς και η μετατροπή της γλυκερόλης επηρεάζονται σημαντικά από τις συνθήκες λειτουργίας. Ειδικότερα, η αυξημένη συγκέντρωση του καταλύτη ενισχύει τη διάσπαση των δεσμών C-C και το σχηματισμό αιθυλενογλυκόλης, αιθανόλης και μεθανίου. Επιπλέον, ο αυξημένος λόγος όγκου αέριας προς υγρή φάση (το οποίο δείχνει χαμηλότερη αυτογενή πίεση) ευνοεί την παραγωγή υδρογόνου. Τέλος, η μετατροπή σε υγρά προϊόντα καθώς και η περιεκτικότητα σε προπυλενογλυκόλη αυξάνονται σημαντικά με την αύξηση της συγκέντρωσης της γλυκερόλης, υπό σταθερό λόγο καταλύτη προς γλυκερόλη.

Συνοψίζοντας, η μετατροπή της γλυκερόλης σε υδατική φάση είναι μια άκρως ελεγχόμενη διαδικασία και ανάλογα με τις συνθήκες της αντίδρασης, η αέρια ή υγρή φάση μπορούν να ευνοήσουν την παραγωγή χρήσιμων αερίων (H_2, CH_4) ή υγρών προϊόντων (PG, EG).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα αυτή συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο-ΕΚΤ) και τα Ελληνικά εθνικά κονδύλια, μέσω του επιχειρησιακού προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) – Πρόγραμμα Χρηματοδότησης της Έρευνας: ΘΑΛΗΣ : Επένδυση στην κοινωνία της γνώσης μέσω του Ευρωπαϊκού Κοινωνικού Ταμείου, αριθμός χορηγίας MIS 379333.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Bart, J. C., Palmeri, N., Cavallaro, S., 2010, "Biodiesel science and technology: from soil to oil," Elsevier, p.

[2] Ma, F., Hanna, M. A., 1999, "Biodiesel production: a review," Bioresource technology, 70(1), pp.1-15.

[3] Milazzo, M., Spina, F., Cavallaro, S., Bart, J., 2013, "Sustainable soy biodiesel," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 27(pp.806-852.

[4] Quispe, C. A., Coronado, C. J., Carvalho Jr, J. A., 2013, "Glycerol: production, consumption, prices, characterization and new trends in combustion," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 27(pp.475-493.

[5] Lin, Y.-C., 2013, "Catalytic valorization of glycerol to hydrogen and syngas," International Journal of Hydrogen Energy, 38(6), pp.2678-2700.

[6] Zhou, C. H., Zhao, H., Tong, D. S., Wu, L. M., Yu, W. H., 2013, "Recent advances in catalytic conversion of glycerol," Catalysis Reviews, 55(4), pp.369-453.

[7] Vaidya, P. D., Rodrigues, A. E., 2009, "Glycerol reforming for hydrogen production: a review," Chemical engineering & technology, 32(10), pp.1463-1469.

[8] Adhikari, S., Fernando, S. D., Haryanto, A., 2009, "Hydrogen production from glycerol: An update," Energy Conversion and Management, 50(10), pp.2600-2604.

[9] Tran, N. H., Kannangara, G. K., 2013, "Conversion of glycerol to hydrogen rich gas," Chemical Society Reviews, 42(24), pp.9454-9479.

[10] El Doukkali, M., Iriondo, A., Cambra, J., Arias, P., 2014, "Recent improvement on H2 production by liquid phase reforming of glycerol: Catalytic properties and performance, and deactivation studies," Topics in Catalysis, 57(10-13), pp.1066-1077.

[11] Nahar, G., Dupont, V., 2014, "Hydrogen production from simple alkanes and oxygenated hydrocarbons over ceria–zirconia supported catalysts," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 32(pp.777-796.

[12] Martin, A., Armbruster, U., Gandarias, I., Arias, P. L., 2013, "Glycerol hydrogenolysis into propanediols using in situ generated hydrogen–A critical review," European journal of lipid science and technology, 115(1), pp.9-27.

[13] Silva, J. M., Soria, M., Madeira, L. M., 2015, "Challenges and strategies for optimization of glycerol steam reforming process," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42(pp.1187-1213.

[14] Dou, B., Song, Y., Wang, C., Chen, H., Xu, Y., 2014, "Hydrogen production from catalytic steam reforming of biodiesel byproduct glycerol: issues and challenges," Renewable and Sustainable Energy Reviews, 30(pp.950-960.

[15] Cortright, R. D., Davda, R., Dumesic, J. A., 2002, "Hydrogen from catalytic reforming of biomass-derived hydrocarbons in liquid water," Nature, 418(6901), pp.964-967.

[16] Özgür, D. Ö., Uysal, B. Z., 2011, "Hydrogen production by aqueous phase catalytic reforming of glycerine," Biomass and Bioenergy, 35(2), pp.822-826.

[17] Barbelli, M. L., Pompeo, F., Santori, G. F., Nichio, N. N., 2013, "Pt catalyst supported on α-Al 2 O 3 modified with CeO 2 and ZrO 2 for aqueous-phase-reforming of glycerol," Catalysis Today, 213(pp.58-64.

[18] Menezes, A. O., Rodrigues, M. T., Zimmaro, A., Borges, L. E., Fraga, M. A., 2011, "Production of renewable hydrogen from aqueous-phase reforming of glycerol over Pt catalysts supported on different oxides," Renewable Energy, 36(2), pp.595-599.

[19] Ciftci, A., Ligthart, D. M., Sen, A. O., van Hoof, A. J., Friedrich, H., Hensen, E. J., 2014, "Pt-Re synergy in aqueous-phase reforming of glycerol and the water–gas shift reaction," Journal of Catalysis, 311(pp.88-101.

[20] Meryemoglu, B., Kaya, B., Irmak, S., Hesenov, A., Erbatur, O., 2012, "Comparison of batch aqueous-phase reforming of glycerol and lignocellulosic biomass hydrolysate," Fuel, 97(pp.241-244.

[21] Manfro, R. L., Da Costa, A. F., Ribeiro, N. F., Souza, M. M., 2011, "Hydrogen production by aqueous-phase reforming of glycerol over nickel catalysts supported on CeO 2," Fuel Processing Technology, 92(3), pp.330-335.

[22] Tuza, P. V., Manfro, R. L., Ribeiro, N. F., Souza, M. M., 2013, "Production of renewable hydrogen by aqueous-phase reforming of glycerol over Ni–Cu catalysts derived from hydrotalcite precursors," Renewable Energy, 50(pp.408-414.

[23] Feng, J., Xu, B., 2014, "Reaction mechanisms for the heterogeneous hydrogenolysis of biomass-derived glycerol to propanediols," Progress in Reaction Kinetics and Mechanism, 39(1), pp.1-15.

[24] Nakagawa, Y., Tomishige, K., 2011, "Catalyst development for the hydrogenolysis of biomass-derived chemicals to value-added ones," Catalysis Surveys from Asia, 15(2), pp.111-116.

[25] Ten Dam, J., Hanefeld, U., 2011, "Renewable chemicals: dehydroxylation of glycerol and polyols," ChemSusChem, 4(8), pp.1017-1034.

[26] Dasari, M. A., Kiatsimkul, P.-P., Sutterlin, W. R., Suppes, G. J., 2005, "Low-pressure hydrogenolysis of glycerol to propylene glycol," Applied Catalysis A: General, 281(1), pp.225-231.

[27] Xia, S., Yuan, Z., Wang, L., Chen, P., Hou, Z., 2011, "Hydrogenolysis of glycerol on bimetallic Pd-Cu/solid-base catalysts prepared via layered double hydroxides precursors," Applied Catalysis A: General, 403(1), pp.173-182.

[28] Vasiliadou, E., Lemonidou, A., 2011, "Investigating the performance and deactivation behaviour of silica-supported copper catalysts in glycerol hydrogenolysis," Applied Catalysis A: General, 396(1), pp.177-185.

[29] Vasiliadou, E., Heracleous, E., Vasalos, I., Lemonidou, A., 2009, "Ru-based catalysts for glycerol hydrogenolysis—Effect of support and metal precursor," Applied Catalysis B: Environmental, 92(1), pp.90-99.

[30] Gong, L., Lu, Y., Ding, Y., Lin, R., Li, J., Dong, W., Wang, T., Chen, W., 2010, "Selective hydrogenolysis of glycerol to 1, 3-propanediol over a Pt/WO 3/TiO 2/SiO 2 catalyst in aqueous media," Applied Catalysis A: General, 390(1), pp.119-126.

[31] Jiménez-Morales, I., Vila, F., Mariscal, R., Jiménez-López, A., 2012, "Hydrogenolysis of glycerol to obtain 1, 2-propanediol on Ce-promoted Ni/SBA-15 catalysts," Applied Catalysis B: Environmental, 117(pp.253-259.

[32] Perosa, A., Tundo, P., 2005, "Selective hydrogenolysis of glycerol with raney nickel," Industrial & engineering chemistry research, 44(23), pp.8535-8537.

[33] Yadav, G. D., Chandan, P. A., Tekale, D. P., 2011, "Hydrogenolysis of glycerol to 1, 2-propanediol over nano-fibrous Ag-OMS-2 catalysts," Industrial & engineering chemistry research, 51(4), pp.1549-1562.

[34] Amada, Y., Shinmi, Y., Koso, S., Kubota, T., Nakagawa, Y., Tomishige, K., 2011, "Reaction mechanism of the glycerol hydrogenolysis to 1, 3-propanediol over Ir–ReO x/SiO 2 catalyst," Applied Catalysis B: Environmental, 105(1), pp.117-127.

[35] Mane, R., Ghalwadkar, A., Hengne, A., Suryawanshi, Y., Rode, C., 2011, "Role of promoters in copper chromite catalysts for hydrogenolysis of glycerol," Catalysis Today, 164(1), pp.447-450.

[36] Shinmi, Y., Koso, S., Kubota, T., Nakagawa, Y., Tomishige, K., 2010, "Modification of Rh/SiO 2 catalyst for the hydrogenolysis of glycerol in water," Applied Catalysis B: Environmental, 94(3), pp.318-326.

[37] Maris, E. P., Davis, R. J., 2007, "Hydrogenolysis of glycerol over carbon-supported Ru and Pt catalysts," Journal of Catalysis, 249(2), pp.328-337.

[38] Roy, D., Subramaniam, B., Chaudhari, R. V., 2010, "Aqueous phase hydrogenolysis of glycerol to 1, 2-propanediol without external hydrogen addition," Catalysis Today, 156(1), pp.31-37.

[39] Gandarias, I., Arias, P., Requies, J., Güemez, M., Fierro, J., 2010, "Hydrogenolysis of glycerol to propanediols over a Pt/ASA catalyst: The role of acid and metal sites on product selectivity and the reaction mechanism," Applied Catalysis B: Environmental, 97(1), pp.248-256.

[40] Barbelli, M. L., Santori, G. F., Nichio, N. N., 2012, "Aqueous phase hydrogenolysis of glycerol to bio-propylene glycol over Pt–Sn catalysts," Bioresource technology, 111(pp.500-503.

[41] Delgado, S. N., Yap, D., Vivier, L., Especel, C., 2013, "Influence of the nature of the support on the catalytic properties of Pt-based catalysts for hydrogenolysis of glycerol," Journal of Molecular Catalysis A: Chemical, 367(pp.89-98.

[42] Seretis, A., Tsiakaras, P., 2016, "Aqueous phase reforming (APR) of glycerol over platinum supported on Al 2 O 3 catalyst," Renewable Energy, 85(pp.1116-1126.

[43] Mauriello, F., Vinci, A., Espro, C., Gumina, B., Musolino, M. G., Pietropaolo, R., 2015, "Hydrogenolysis vs. aqueous phase reforming (APR) of glycerol promoted by a heterogeneous Pd/Fe catalyst," Catalysis Science & Technology, 5(9), pp.4466-4473.

[44] Seretis, A., Tsiakaras, P., 2015, "A thermodynamic analysis of hydrogen production via aqueous phase reforming of glycerol," Fuel Processing Technology, 134(pp.107-115.

ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΛΛΕΤΩΝ ΑΠΟ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΑ ΥΛΟΤΟΜΙΩΝ ΔΡΥΟΣ, ΠΕΥΚΗΣ ΚΑΙ ΛΕΥΚΗΣ

***Βασίλειος Φιλίππου[1], Σωτήριος Καραστεργίου[2], Ιωάννης Φιλίππου[3] και Κωνσταντίνος Τσιώτας[4]**

[1]Υποψήφιος Διδάκτωρ, Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, ΑΠΘ.
[2]Καθηγητής, Τμήμα Σχεδιασμού και Τεχνολογίας Ξύλου και Επίπλου, ΤΕΙ Λάρισας, Καρδίτσα.
[3]Ομότιμος καθηγητής, Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, ΑΠΘ.
[4]Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας, (Κ.Α.Π.Ε.) Πικέρμι Αττικής.

*e-mail: vafilpo@teilar.gr , vafilpo@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα υπολείμματα υλοτομιών τα οποία παραμένουν αναξιοποίητα στο δάσος έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον για παραγωγή ενέργειας. Οι ξύλινες πελλέτες (wood pellets) είναι ένα αναβαθμισμένο στερεό βιοκαύσιμο και η παραγωγή και κατανάλωση του έχουν παρουσιάσει παγκοσμίως μια θεαματική αύξηση τη τελευταία 10ετία. Στη παρούσα μελέτη, τα υπολείμματα υλοτομιών (κλάδοι με διάμετρο >5cm, 2-5cm και κλαδίσκοι με διάμετρο <2cm +φύλλωμα) τριών δασικών ειδών: δρυός *(Quercus frainetto)*, πεύκης *(Pinus nigra)* και λεύκης *(Populus alba)* αξιολογηθήκαν ως πρώτη ύλη παραγωγής πελλετών. Για το σκοπό αυτό κατασκευάσθηκαν πελλέτες με τα παραπάνω υλικά και μελετήθηκαν: η θερμαντική αξία, οι φυσικές και χημικές ιδιότητές τους και έγινε σύγκριση αυτών και η κατάταξή τους με βάση το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN ISO 17225-2. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι: 1) όλες οι ιδιότητες (υγρασία, διαστάσεις, χωρική πυκνότητα, μηχανική αντοχή, ποσοστό τέφρας και θερμαντική αξία) των πελλετών από χονδρά και λεπτά κλαδιά πεύκης και λεύκης εμπίπτουν στις απαιτήσεις του προτύπου, 2) οι πελλέτες από όλα τα υπολείμματα υλοτομιών της δρυός και οι πελλέτες κλαδίσκων της πεύκης παρουσίασαν ποσοστά τέφρας και αζώτου μεγαλύτερα από τα επιτρεπτά όρια του προτύπου και 3) Η θερμαντική αξία των πελλετών της πεύκης κυμάνθηκε από 20,80 έως 20,95 MJ/kg, της λεύκης από 18,26 και 18,27 MJ/kg και της δρυός από 19,26 έως 19,31 MJ/kg.

***Λέξεις κλειδιά**: υπολείμματα υλοτομιών, pellet, δασική βιομάζα, δρυς, πεύκη, λεύκη*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα συμπυκνώματα ξύλου (πελλέτες, wood pellets) είναι σχετικά μια νέα και αναβαθμισμένη μορφή στερεού καυσίμου (επίσημα ονομάζονται ως εξευγενισμένα στερεά καύσιμα βιομάζας). Χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο τόσο σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις παραγωγής θερμότητας, ηλεκτρικής ενέργειας και αεριοποίησης όσο και για οικιακή θέρμανση [1,2,3]. Έχουν μικρό ποσοστό υγρασίας (5-10%), σχετικά μεγάλο ειδικό βάρος (600-800 Kg/m^3), μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα σε σχέση με τα άλλα στερεά καύσιμα και μικρό μέγεθος (διάμετρος 6mm, μήκος 3,15-40mm). Οι ιδιότητες αυτές καθιστούν εύκολη τη συσκευασία, τη μεταφορά, την διακίνηση, την εμπορία, την αποθήκευση και την αυτόματη τροφοδοσία τους σε ενεργειακά τζάκια, σόμπες, λέβητες κεντρικής θέρμανσης και βιομηχανικά συστήματα παραγωγής ενέργειας (συμπαραγωγή θέρμανσης και ηλεκτρισμού). Η καύση των πελλετών γίνεται σε σύγχρονες εγκαταστάσεις στις οποίες γίνεται σχεδόν πλήρης καύση (απόδοση έως 90%) και δεν μολύνουν το περιβάλλον με άκαυστα μικροτεμαχίδια [4,5,6,7].

Η παγκόσμια παραγωγή και κατανάλωση των πελλετών έχει μια πολύ μεγάλη αύξηση τα τελευταία 20 χρόνια και αγγίζει το έτος 2014 τους 25,5 δισεκατομμύρια τόνους. Μελέτες [7,8] προβλέπουν αύξηση της παγκόσμιας παραγωγής το έτος 2020 στα 45-80 δισεκατομμύρια τόνους. Η Ευρωπαϊκή Ένωση παράγει το 50% και καταναλώνει το 70% της παγκόσμιας παραγωγής [9]. Η υιοθέτηση των πελλετών βιομάζας ως καύσιμο, καθοδηγείται από πολιτικές και οικονομικά κίνητρα σε ένα ευρύ κομμάτι του πλανήτη, ιδίως την Ευρώπη, με στόχο την μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [10,11]. Στην Ελλάδα η παραγωγή και κατανάλωση των πελλετών άργησε να ξεκινήσει, και αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να βρίσκονται σε χαμηλά επίπεδα, αλλά παρουσιάζουν συνεχή αύξηση με ρυθμούς ανάλογους της ΕΕ [12]. Στην Ελλάδα λειτουργούν 12 μονάδες παραγωγής συνολικής δυναμικότητας 160.000 τόνων αλλά η ετήσια παραγωγή δεν ξεπερνά τις 50.000 τόνους. Η μικρή παραγωγή σε σχέση με την εγκατεστημένη ισχύ οφείλεται στη χαμηλή ακόμη εγχώρια ζήτηση, αλλά και στην έλλειψη πρώτων υλών.

Οι πελλέτες ξύλου (wood pellets) παράγονται κυρίως από υπολείμματα κατεργασίας (πριονίδι, εξακρίδια, ξύλο θρυμματισμού και καυσόξυλα). Η αυξανόμενη ζήτηση παραγωγής πελλετών φαίνεται να περιορίζεται από τις διαθέσιμες ποσότητες πρώτων υλών και οι βιομηχανίες παραγωγής αναζητούν εναλλακτικές πρώτες ύλες. Τα δασικά και γεωργικά υπολείμματα, οι ενεργειακές καλλιέργειες και τα υπολείμματα τα οποία παράγονται από τις βιομηχανίες τροφίμων γίνονται όλο και πιο ελκυστικά [13,14,15,16,17,18,19]. Ωστόσο ιδιαίτερο ενδιαφέρον δίνεται στη αξιοποίηση της δασικής βιομάζας και των υπολειμμάτων υλοτομίας σε σχέση με τα άλλα υπολείμματα, λόγω κυρίως της χαμηλής περιεκτικότητας τους σε τέφρα και άζωτο [17].

Οι φυσικές, χημικές και θερμικές ιδιότητες της βιομάζας διαφέρουν στα διάφορα δασοπονικά είδη και επηρεάζουν τις φυσικές, χημικές και θερμικές ιδιότητες των πελλετών [20,21,22,23,24]. Η διαφοροποίηση των διαφόρων τύπων βιομάζας διαφορετικής προελεύσεως και διαφορετικών χαρακτηριστικών στην διακύμανση των ιδιοτήτων των πελλετών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη και υιοθέτηση προτύπων. Σήμερα, υφίστανται 2 διεθνή πρότυπα, ένα για τις πελλέτες δασικής προελεύσεως (EN ISO 17225-2:2015) [25] και ένα για πελλέτες μη δασικής προελεύσεως (EN ISO 17225-6:2014) [26].

Η χρήση των υπολειμμάτων τα οποία παραμένουν στο δάσος μετά την υλοτομία έχει προσελκύσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ως πρώτη ύλη για την παραγωγή πελλετών [13,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36]. Η βιομάζα προερχόμενη από υπολείμματα υλοτομιών, αποτελείται από κορυφές, κλαδίσκους με φύλλα ή βελόνες, φλοιό και πρέμνα. Ως υπολείμματα ορίζονται ακόμα και τα μικρά δέντρα τα οποία καταστράφηκαν κατά τη διάρκεια της υλοτομίας, νεκρά δένδρα, δένδρα χαμηλής εμπορικής αξίας ή μη εμπορεύσιμη ξυλεία [36]. Η αξιοποίηση των υπολειμμάτων υλοτομίας για παραγωγή ενέργειας μπορεί να δημιουργήσει θέσεις εργασίας και να τονώσει την οικονομική ανάπτυξη κυρίως της υπαίθρου [37,38].

Συγκρινόμενα με το σύνηθες ξύλο κορμού, τα υπολείμματα υλοτομίας έχουν μεγάλη διαφοροποίηση στη σύνθεση των συστατικών τους, όπως κυτταρίνη, ημικυτταρίνες, λιγνίνη, εκχυλίσματα, αλλά και στα στοιχεία που σχηματίζουν τη τέφρα [13,39,40,41,42,43]. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της ως άνω μεταβλητότητας στα χαρακτηριστικά της βιομάζας είναι η παρουσία φλοιού, ο οποίος παρουσιάζει σημαντικές διαφορές στις φυσικές και ενεργειακές ιδιότητες του ξύλου και κυρίως μεγάλα ποσοστά τέφρας [13,39,41,42,44,45,46]. Χαρακτηριστικό επίσης παράδειγμα είναι η παρουσία ανώριμου ή άτυπου ξύλου στις κορυφές και τα κλαδιά με διαφορετικές ιδιότητες [43]. Με βάση τα παραπάνω, διαφορά στη χημική σύσταση υπάρχει τόσο στα διάφορα υπολείμματα-μέρη του ίδιου του δένδρου όσο και στα διάφορα δασικά είδη. Η διαφορετική σύνθεση των υλικών εκτός από τις θερμικές ιδιότητες επηρεάζει επίσης τη κατεργασιμότητα και γενικότερα τις ιδιότητες των πελλετών [13,20,47,48,49].

Αρκετοί ερευνητές [13,15,16,20,50,51] έχουν μελετήσει τις ιδιότητες των πελλετών από υπολείμματα δασικής βιομάζας διαφόρων δασικών ειδών.

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η αξιολόγηση της καταλληλότητας των υπολειμμάτων υλοτομίας (λεπτοί και χονδροί κλάδοι, κλαδίσκοι με φύλλωμα) των δασοπονικών ειδών δρυός *(Quercus frainetto),* λεύκης, *(Populus alba) και πεύκης (Pinus nigra)* ως πρώτη ύλη για παραγωγή πελλετών. Η εργασία αποτελεί μέρος ενός ευρύτερου προγράμματος που χρηματοδοτήθηκε από το Πράσινο Ταμείο και αποβλέπει στη μελέτη των δυνατοτήτων αξιοποίησης υπολειμμάτων υλοτομιών για παραγωγή στερεών βιοκαυσίμων [52]. Στα πλαίσια του προγράμματος αυτού έχουν δημοσιευθεί 4 εργασίες [34,53,54,55,56].

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Αντιπροσωπευτικά δείγματα δρυός *(Quercus frainetto),* λεύκης *(Populus alba) και πεύκης (Pinus nigra)* πάρθηκαν κατά τη διάρκεια υλοτομίας σε δάσος της βορειοδυτικής Ελλάδας. Τα υπολείμματα κατηγοριοποιήθηκαν στις παρακάτω κλάσεις υπολειμμάτων: χονδροί κλάδοι (διάμετρος > 5cm), λεπτοί κλάδοι (διάμετρος 2-5cm), κλαδίσκοι με φύλλωμα (διάμετρος < 2cm). Τα παραπάνω υλικά πάρθηκαν κατά τη διάρκεια παράλληλων εργασιών [34,53]. Τα υλικά μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Ξύλου του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης όπου και έγινε τεμαχισμός τους με τη χρήση μετακινούμενου θρυμματιστή με δίσκο (disk chipper) σε ξυλοτεμαχίδια (chips) μήκους από 20 - 50mm. Τα ξυλοτεμαχίδια υπέστησαν φυσική ξήρανση έως ότου η υγρασία τους φτάσει στο 15% και έπειτα έγινε τεχνητή ξήρανση, έως ότου η υγρασία τους φτάσει 11-12%. Κατόπιν, πραγματοποιήθηκε ο επαναθρυμματισμός των ξυλοτεμαχιδίων σε μικρότερες διαστάσεις 3,5mm, με χρήση σφυρόμυλου (hammer mill). Το τελικό υλικό πελλετοποιήθηκε χωριστά ανάλογα με την κλάση υπολειμμάτων. Οι πελλέτες κατασκευάστηκαν με πελλετομηχανή εργαστηριακής κλίμακας με διάμετρο οπών (5mm) σε σταθερή μήτρα και περιστρεφόμενους κυλίνδρους (Εικόνα 1). Για τον προσδιορισμό των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων, πάρθηκαν 20 τυχαία δείγματα (πελλέτες) από όλες τις κλάσεις των υπολειμμάτων. Ακολούθησε κονιοποίηση των επιλεγμένων δειγμάτων σε μύλο τύπου Willey (Willey mill) και πάρθηκαν 3 δείγματα από τη κάθε κλάση για τις μετρήσεις των αναλύσεων.

Στις παραπάνω πελλέτες έγινε προσεγγιστική ανάλυση (ποσοστό υγρασίας, τέφρας, πτητικών συστατικών, μόνιμου άνθρακα) και στοιχειακή ανάλυση (ποσοστό άνθρακα, υδρογόνου, αζώτου και οξυγόνου). Το περιεχόμενο της τέφρας και των πτητικών συστατικών (ποσοστό ξηρού βάρους) προσδιορίστηκε σύμφωνα με τα πρότυπα CEN 14775 και CEN 15148 [57,58], αντίστοιχα. Το περιεχόμενο του μόνιμου άνθρακα προέκυψε από την εκατοστιαία διαφορά του αθροίσματος της υγρασίας, της τέφρας και των πτητικών συστατικών. Το περιεχόμενο του C, H, και N προσδιορίστηκε σύμφωνα με το πρότυπο CEN 15104 [59]. Το περιεχόμενο του οξυγόνου προέκυψε από την εκατοστιαία διαφορά του αθροίσματος του C, H και N.

Το θερμιδικό περιεχόμενο (HHV) προσδιορίστηκε σύμφωνα με το πρότυπο CEN/TS 14918 [60] σε MJ/Kg. Το θερμιδικό περιεχόμενο ελεύθερης τέφρας (HHVf) προσδιορίστηκε αναφορικά με το βάρος των υλικών χωρίς το περιεχόμενο της τέφρας.

Για τον προσδιορισμό των φυσικών ιδιοτήτων μετρήθηκαν οι διαστάσεις (διάμετρος και μήκος mm), η χωρική πυκνότητα και η μηχανική αντοχή. Η μέση διάμετρος και το μέσο μήκος μετρήθηκαν από 20 τυχαία δείγματα (πελλέτες). Η χωρική πυκνότητα μετρήθηκε χρησιμοποιώντας το βάρος και τον όγκο των πελλετών σε βαθμονομημένο κύλινδρο 1 λίτρου. Τέλος η μηχανική αντοχή σύμφωνα με το πρότυπο CEN 15210-2 [61].



Εικόνα 1. Πρέσσα παραγωγής πελλετών τύπου NG 300 - 20 SD.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Κοκκομετρική ανάλυση

Το μέγεθος των ξυλοτεμαχιδίων επηρεάζει την παραγωγή και τις ιδιότητες των πελλετών [62]. Το λεπτόκοκκο υλικό συμβάλει στη καλύτερη συμπύκνωση των πελλετών, στη μεγαλύτερη χωρική πυκνότητα και μηχανική αντοχή. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται η κοκκομετρική σύσταση των ξυλοτεμαχιδίων από τις διάφορες κλάσεις υπολειμμάτων των δασικών ειδών δρυός, λεύκης και πεύκης. Στη δρυ και λεύκη οι λεπτοί κλάδοι είχαν μεγαλύτερο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού από ότι οι χονδροί κλάδοι και οι κλαδίσκοι. Στη δρυ οι λεπτοί κλάδοι έδωσαν το μεγαλύτερο ποσοστό λεπτού υλικού και οι χονδροί κλάδοι το μικρότερο. Στη Πεύκη οι χονδροί κλάδοι (d> 5cm) είχαν το μεγαλύτερο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού.

Πίνακας 1. Κοκκομετρική ανάλυση δρυός, λεύκης και πεύκης

Μέγεθος κόκκων (μm)	Χονδροί κλάδοι (d >5cm)	Λεπτοί κλάδοι (d 2-5cm)	Κλαδίσκοι με φύλλωμα
	Δρυς		
>500	78,3	68,8	77,05
500≥250	11,82	13,09	11,82
<250	9,88	18,11	11,13
	Λεύκη		
>500	68,49	71,4	-
500≥250	20,52	15,7	-
<250	10,99	12,9	-
	Πεύκη		
>500	71,46	73,39	69,67
500≥250	11,92	11,22	14,13
<250	16,62	15,39	16,2

Χημική ανάλυση

Στους Πίνακες 2 και 3 παρουσιάζεται η προσεγγιστική και στοιχειακή ανάλυση των πελλετών της δρυός, λεύκης και πεύκης, αντίστοιχα.

Πίνακας 2. Προσεγγιστική ανάλυση πελλετών δρυός,λεύκης και πεύκης

Συστατικά (%)	Χονδροί κλάδοι (d >5cm)	Λεπτοί κλάδοι (d 2-5cm)	Κλαδίσκοι με φύλλωμα
	Δρυς		
Τέφρα	2,53 ±0,045	3,81 ±0,645	4,14 ±0,690
Πτητικά συστατικά	79,96 ±0,187	78,84 ±0,386	76,95 ±0,501
Μόνιμος άνθρακας	17,51 ±0,310	17,35 ±0,455	18,20 ±0,503
	Λεύκη		
Τέφρα	1,12 ±0,004	1,58 ±0,042	-
Πτητικά συστατικά	81,78 ±0,570	80,89 ±0,412	-
Μόνιμος άνθρακας	17,10 ±0,391	17,43 ±0,156	-
	Πεύκη		
Τέφρα	0,79 ±0,01	1,16 ±0,04	2,27 ±0,06
Πτητικά συστατικά	77,42 ±0,332	77,92 ±0,630	76,79 ±0,191
Μόνιμος άνθρακας	21,78 ±0,280	20,92 ±0,387	20,92 ±0,211

± Τυπική απόκλιση

3.2. Προσεγγιστική ανάλυση

3.2.1 Περιεχόμενο τέφρας

Το περιεχόμενο της τέφρας, αποτελεί μια σημαντική ιδιότητα η οποία καθορίζει τη τελική ποιότητα των πελλετών. Τα συστατικά της τέφρας επηρεάζουν τη σωστή λειτουργία των καυστήρων. Στις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά τη καύση τήκονται και προσκολλούνται στις επιφάνειες των καυστήρων προκαλώντας διάβρωση και κατ επέκταση τη δυσλειτουργία τους [63]. Το υψηλό περιεχόμενο σε τέφρα επηρεάζει αρνητικά και το θερμιδικό περιεχόμενο των πελλετών [30]. Λόγω της μεγάλης σημασίας που έχει η τέφρα στην τελική ποιότητα των πελλετών, το περιεχόμενο της τέφρας είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους στην κατηγοριοποίηση των πελλετών σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 17225-2 [25]. Στις πελλέτες από δρυ, το περιεχόμενο της τέφρας κυμάνθηκε από 2,53% στις πελλέτες οι οποίες κατασκευάστηκαν από χονδρούς κλάδους έως 4,14% στις πελλέτες οι οποίες κατασκευάστηκαν από κλαδίσκους, ενώ οι πελλέτες οι οποίες κατασκευάστηκαν από λεπτούς κλάδους παρουσίασαν ενδιάμεσες τιμές 3,81%. Στις πελλέτες από λεύκη, το περιεχόμενο της τέφρας ήταν 1,12% στις πελλέτες χονδρών κλάδων και 1,58% στις πελλέτες λεπτών κλάδων. Στις πελλέτες από πεύκη, το περιεχόμενο της τέφρας κυμάνθηκε από 0,79% στις πελλέτες χονδρών κλάδων έως 2,27% στις πελλέτες κλαδίσκων ενώ οι πελλέτες λεπτών κλάδων παρουσίασαν ενδιάμεσες τιμές 1,16%. Σε έρευνες [42,46] παρατηρήθηκαν παρόμοιες διαφορές στο ποσοστό της τέφρας μεταξύ των δειγμάτων από διάφορα μέρη του δένδρου στα δασικά είδη πεύκης, ερυθρελάτης και λεύκης. Σε παράλληλη έρευνα [54] βρέθηκε πως το περιεχόμενο της τέφρας στα υπολείμματα υλοτομίας των δασικών ειδών ελάτης, πεύκης, οξιάς, δρυός και λεύκης αυξάνεται με την ταυτόχρονη μείωση της διαμέτρου των κλαδιών, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του ποσοστού του φλοιού. Σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 17225-2 [25], όλες οι πελλέτες δρυός αλλά και οι πελλέτες από κλαδίσκους της πεύκης, δεν εμπίπτουν στις απαιτήσεις του προτύπου αφού το ποσοστό της τέφρας ξεπερνάει το ανώτερο επιτρεπτό όριο 2%. Όλες οι πελλέτες της λεύκης αλλά και οι πελλέτες από τα κλαδιά της πεύκης εμπίπτουν στις απαιτήσεις του παραπάνω προτύπου. Κατά φθίνουσα σειρά το περιεχόμενο της τέφρας κυμάνθηκε στα δασικά είδη ως εξής: δρυς>λεύκη>πεύκη.

3.2.2. Πτητικά συστατικά – Μόνιμος άνθρακας

Το ποσοστό των πτητικών συστατικών (VC) κυμάνθηκε στη δρυ από 76,95% στις πελλέτες των κλαδίσκων έως 79,96% στις πελλέτες χονδρών κλάδων, ενώ οι πελλέτες λεπτών κλάδων παρουσίασαν ενδιάμεσες τιμές 78,84%. Το ποσοστό των πτητικών συστατικών στη λεύκη ήταν 80,89% στις πελλέτες λεπτών κλάδων και 81,78% στις πελλέτες χονδρών κλάδων. Στη πεύκη το ποσοστό των πτητικών συστατικών κυμάνθηκε από 76,79% στις πελλέτες των κλαδίσκων έως 77,92% στις πελλέτες λεπτών κλάδων, ενώ οι πελλέτες χονδρών κλάδων παρουσίασαν ενδιάμεσες τιμές 77,42%. Το ποσοστό πτητικών συστατικών ήταν μεγαλύτερο στη λεύκη από ότι ήταν στη δρυ και στη πεύκη. Κατά φθίνουσα σειρά το περιεχόμενο των πτητικών συστατικών κυμάνθηκε στα δασικά είδη ως εξής: λεύκης>δρυς>πεύκη.

Το ποσοστό του μόνιμου άνθρακα (FC) κυμάνθηκε στη δρυ από 17,35% στις πελλέτες λεπτών κλάδων έως 18,20% στις πελλέτες των κλαδίσκων, ενώ οι πελλέτες χονδρών κλάδων παρουσίασαν ενδιάμεσες τιμές 17,51%. Το ποσοστό του μόνιμου άνθρακα στη λεύκη ήταν 17,10% στις πελλέτες χονδρών κλάδων και 17,43% στις πελλέτες λεπτών κλάδων. Το ποσοστό του μόνιμου άνθρακα κυμάνθηκε στη πεύκη από 20,92% στις πελλέτες λεπτών κλάδων και κλαδίσκων έως 21,78% στις πελλέτες χονδρών κλάδων. Το ποσοστό του μόνιμου άνθρακα ήταν μεγαλύτερο στη πεύκη από ότι ήταν στη δρυ και στη λεύκη.

3.3. Στοιχειακή ανάλυση

Είναι πολύ σημαντική η κατανόηση της χημικής σύστασης των καυσίμων καθώς υπάρχει μεγάλη συσχέτιση μεταξύ θερμιδικού περιεχομένου και των ποσοστών άνθρακα, υδρογόνου και οξυγόνου και συμπεριφοράς κατά τη καύση του καυσίμου [64.65]. Το ποσοστό του αζώτου (N) είναι υπεύθυνο για τον σχηματισμό των οξειδίων του αζώτου (NOx) τα οποία έχουν δυσμενές περιβαλλοντικό αντίκτυπο [49,66].

Πίνακας 3. Στοιχειακή ανάλυση πελλετών δρυός, λεύκης και πεύκης

Στοιχεία (%)	Χονδροί κλάδοι (d >5cm)	Λεπτοί κλάδοι (d 2-5cm)	Κλαδίσκοι με φύλλωμα
	Δρυς		
Άνθρακας	46,23 ±0,519	46,90 ±0,577	48,85 ±0,238
Υδρογόνο	6,06 ±0,102	6,09 ±0,015	6,22 ±0,040
Οξυγόνο	47,71	47	45
Άζωτο	0,29 ±0,020	0,312 ±0,040	1,173 ±0,060
	Λεύκη		
Άνθρακας	45,01 ±0,095	45,13 ±0,230	-

Υδρογόνο	6,15 ±0,121	5,96 ±0,075	-
Οξυγόνο	48,8	48,9	-
Άζωτο	0,105 ±0,005	0,207 ±0,007	-
	Πεύκη		
Άνθρακας	50,62 ±0,325	49,94 ±0,272	50,00 ±0,48
Υδρογόνο	6,29 ±0,075	6,54 ±0,144	6,58 ±0,04
Οξυγόνο	43,1	43,5	43,41
Άζωτο	0,13 ±0,011	0,2 ±0,020	0,76 ±0,02

± Τυπική απόκλιση

Το περιεχόμενο του άνθρακα (C) στη δρυ κυμάνθηκε από 46,23% στις πελλέτες χονδρών κλάδων έως 48,85% στις πελλέτες των κλαδίσκων, ενώ οι πελλέτες λεπτών κλάδων παρουσίασαν ενδιάμεσες τιμές 46,90%. Το περιεχόμενο του άνθρακα στη λεύκη ήταν 45,01% στις πελλέτες χονδρών κλάδων και 45,13% στις πελλέτες λεπτών κλάδων. Το περιεχόμενο του άνθρακα στη πεύκη κυμάνθηκε από 49,94% στις πελλέτες λεπτών κλάδων έως 50,62% στις πελλέτες χονδρών κλάδων, ενώ οι πελλέτες των κλαδίσκων παρουσίασαν ενδιάμεσες τιμές 50,00%. Το ποσοστό του άνθρακα ήταν μεγαλύτερο στις πελλέτες της πεύκης από ότι είναι στις πελλέτες δρυός και λεύκης. Κατά φθίνουσα σειρά το περιεχόμενο του άνθρακα κυμάνθηκε στα δασικά είδη ως εξής: πεύκη>δρυς>λεύκη.

Το περιεχόμενο του υδρογόνου (H) στη δρυ κυμάνθηκε από 6,06% στις πελλέτες χονδρών κλάδων έως 6,22% στις πελλέτες των κλαδίσκων, ενώ οι πελλέτες λεπτών κλάδων παρουσίασαν ενδιάμεσες τιμές 6,09%. Το περιεχόμενο του υδρογόνου στη λεύκη ήταν 5,96% στις πελλέτες λεπτών κλάδων και 6,15% στις πελλέτες χονδρών κλάδων. Το περιεχόμενο του υδρογόνου στη πεύκη κυμάνθηκε από 6,29% στις πελλέτες χονδρών κλάδων έως 6,58% στις πελλέτες κλαδίσκων, ενώ οι πελλέτες λεπτών κλάδων παρουσίασαν ενδιάμεσες τιμές 6,54%. Το περιεχόμενο του αζώτου (N) στη δρυ κυμάνθηκε από 0,29% στις πελλέτες χονδρών κλάδων έως 1,173% στις πελλέτες των κλαδίσκων, ενώ οι πελλέτες λεπτών κλάδων παρουσίασαν ενδιάμεσες τιμές 0,312%. Το περιεχόμενο του αζώτου στη λεύκη ήταν 0,105% στις πελλέτες χονδρών κλάδων και 0,207% στις πελλέτες λεπτών κλάδων. Το περιεχόμενο του αζώτου στη πεύκη κυμάνθηκε από 0,13% στις πελλέτες χονδρών κλάδων έως 0,76% στις πελλέτες των κλαδίσκων, ενώ οι πελλέτες λεπτών κλάδων παρουσίασαν ενδιάμεσες τιμές 0,2%. Κατά φθίνουσα σειρά το περιεχόμενο του αζώτου κυμάνθηκε στα δασικά είδη ως εξής: δρυς>πεύκη>λεύκη. Με εξαίρεση τις πελλέτες οι οποίες κατασκευάστηκαν από κλαδίσκους δρυός, όλες οι πελλέτες από τα άλλα είδη υπολειμμάτων, όσον αφορά το ποσοστό αζώτου, εμπίπτουν στις απαιτήσεις του παραπάνω προτύπου [25]. Λαμβανομένου όμως υπόψη και του ανώτερου επιτρεπτού ποσοστού τέφρας, όλες οι πελλέτες δρυός αλλά και οι πελλέτες από κλαδίσκους πεύκης δεν εμπίπτουν στις απαιτήσεις σύμφωνα με το παραπάνω πρότυπο [25].

3.4. Φυσικές Ιδιότητες

Στον Πίνακα 4 δίνονται οι φυσικές ιδιότητες των πελλετών της δρυός, λεύκης και πεύκης.

Πίνακας 4. Φυσικές ιδιότητες των πελλετών δρυός, λεύκης και πεύκης

		Χονδροί κλάδοι (d >5cm)	Λεπτοί κλάδοι (d 2-5cm)	Κλαδίσκοι με φύλλωμα
		Δρυς		
Υγρασία (%)		8,07	8,75	8,71
Διαστάσεις (mm)	Διάμετρος	6,08	6,1	5,95
	Μήκος	37,51	35,62	35,42
Χωρική πυκνότητα Kg/m^3		615,71	621,65	621,54
Μηχανική αντοχή (%)		99	98,6	97,2
		Λεύκη		
Υγρασία (%)		8,07	7,84	-
Διαστάσεις (mm)	Διάμετρος	5,96	6	-
	Μήκος	39,48	38,92	-
Χωρική πυκνότητα Kg/m^3		601,56	607,03	-
Μηχανική αντοχή (%)		99,3	99,2	-
		Πεύκη		
Υγρασία (%)		9,64	9,25	8,8

Διαστάσεις (mm)	Διάμετρος	6,06	6,03	6,01
	Μήκος	36,66	39,76	34,86
Χωρική πυκνότητα Kg/m^3		618,45	600,53	617,65
Μηχανική αντοχή (%)		98,7	99,3	96,5

± Τυπική απόκλιση

3.4.1. Περιεχόμενο υγρασίας

Το περιεχόμενο της υγρασίας είναι ένας καθοριστικός παράγοντας των πελλετών. Χαμηλό περιεχόμενο υγρασίας έχει σαν αποτέλεσμα χαμηλότερες θερμοκρασίες ανάφλεξης, γρήγορη και ολοκληρωμένη συμπύκνωση, ενώ η υψηλή υγρασία έχει σαν αποτέλεσμα την απώλεια θερμότητας λόγο της εξάτμισης των μορίων νερού από τα βιοκαύσιμα [48]. Οι πελλέτες από όλες τις κλάσεις υπολειμμάτων και των τριών δασικών ειδών είχαν περιεχόμενη υγρασία κάτω από 10% και εμπίπτουν στις απαιτήσεις του παραπάνω προτύπου [25]. Συγκεκριμένα, στη δρυ ο μέσος όρος της περιεχόμενης υγρασίας ήταν 8,51%, στη λεύκη 9,23% και στην πεύκη 7,95%.

3.4.2. Διαστάσεις

Οι διαστάσεις των πελλετών αποτελούν καθοριστικό παράγοντα που επηρεάζει την τελική τους χρήση. Πελλέτες με μικρές διαστάσεις έχουν μεγαλύτερη χωρική πυκνότητα, ευκολία στο πακετάρισμα, μικρότερες απώλειες κατά τη μεταφορά τους, καλύτερη τροφοδοσία στους καυστήρες αλλά και ομοιόμορφη καύση [2]. Ο μέσος όρος της διαμέτρου και του μήκους για τις πελλέτες της δρυός ήταν 6,04 mm και 38.79mm, αντίστοιχα. Η διάμετρος κυμάνθηκε από 5,95mm στις πελλέτες των κλαδίσκων έως 6,1mm στις πελλέτες λεπτών κλάδων, ενώ οι πελλέτες χονδρών κλάδων παρουσίασαν ενδιάμεσες τιμές 6,08mm. Το μήκος κυμάνθηκε από 35,42mm στις πελλέτες των κλαδίσκων έως 37,51mm στις πελλέτες χονδρών κλάδων, ενώ οι πελλέτες λεπτών κλάδων παρουσίασαν ενδιάμεσες τιμές 35,62mm. Ο μέσος όρος της διαμέτρου και του μήκους για τις πελλέτες της λεύκης ήταν 5,98 mm και 39,20mm, αντίστοιχα. Η διάμετρος κυμάνθηκε από 5,96mm στις πελλέτες χονδρών κλάδων έως 6 mm στις πελλέτες λεπτών κλλάδων και το μήκος κυμάνθηκε από 38,92mm στις πελλέτες λεπτών κλάδων έως 39,48mm στις πελλέτες χονδρών κλάδων. Ο μέσος όρος της διαμέτρου και του μήκους για τις πελλέτες της πεύκης ήταν 6,03 mm και 37,09mm, αντίστοιχα. Η διάμετρος κυμάνθηκε από 6,01mm στις πελλέτες των κλαδίσκων έως 6,06mm στις πελλέτες χονδρών κλάδων, ενώ οι πελλέτες λεπτών κλάδων παρουσίασαν ενδιάμεσες τιμές 6,03mm. Το μήκος κυμάνθηκε από 34,86mm στις πελλέτες των κλαδίσκων έως 39,76mm στις πελλέτες λεπτών κλάδων, ενώ οι πελλέτες χονδρών κλάδων παρουσίασαν ενδιάμεσες τιμές 36,66mm. Οι διαστάσεις όλων των πελλετών, που παρασκευάσθηκαν από τα διάφορα υπολείμματα και των τριών δασοπονικών ειδών πληρούν τις απαιτήσεις του παραπάνω προτύπου [25].

3.4.3. Χωρική πυκνότητα

Η χωρική πυκνότητα επηρεάζει τη μεταφορά και την αποθήκευση των πελλετών. Μεγάλη χωρική πυκνότητα οδηγεί σε ευκολία μεταφοράς και σε χαμηλές αποθηκευτικές απαιτήσεις. Η χωρική πυκνότητα ή χύδην πυκνότητα σχετίζεται άμεσα με την ενεργειακή πυκνότητα [2]. Για τις πελλέτες από δρυ η χωρική πυκνότητα κυμάνθηκε από 615,71 Kg/m^3 έως 621,65 Kg/m^3 στις πελλέτες χονδρών και λεπτών κλάδων αντίστοιχα. Στη λεύκη η χωρική πυκνότητα κυμάνθηκε από 601,56 Kg/m^3 έως 607,03 Kg/m^3 στις πελλέτες χονδρών και λεπτών κλάδων αντίστοιχα. Στη πεύκη η χωρική πυκνότητα κυμάνθηκε από 600,53 Kg/m^3 στις πελλέτες λεπτών κλάδων έως 618,45 Kg/m^3 στις πελλέτες χονδρών κλάδων. Όλες οι πελλέτες από όλα τα δασικά είδη εμπίπτουν στις απαιτήσεις του παραπάνω προτύπου [25]. Η χωρική πυκνότητα είναι μια συσχέτιση των διαστάσεων των πελλετών, της κοκκομετρικής σύστασης και του ειδικού βάρους των υλικών από τα οποία προήλθαν [1]. Όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 4, οι πελλέτες με το μεγαλύτερο μήκος είχαν σε όλες τις περιπτώσεις μικρότερη χωρική πυκνότητα.

3.4.4. Μηχανική αντοχή

Μεγάλη μηχανική αντοχή των πελλετών αποτελεί πλεονέκτημα κατά την μεταφορά τους ή τη χρήση τους από τους τελικούς καταναλωτές. Μικρή μηχανική αντοχή προκαλεί την εμφάνιση σκόνης κατά τη μεταφορά τους [13] και μπορεί να προκαλέσει προβλήματα υγείας στους χρήστες που έρχονται σε επαφή με τις πελλέτες κατά τη διάρκεια τροφοδοσίας του καυστήρα. Η μηχανική αντοχή όλων πελλετών κυμάνθηκε από 96,5 % στις πελλέτες των κλαδίσκων της πεύκης έως 99,3 % στις πελλέτες λεπτών κλάδων της πεύκης αλλά και στις πελλέτες χονδρών κλάδων της λεύκης. Με εξαίρεση της πελλέτες από κλαδίσκους πεύκης και δρυός, όλες οι πελλέτες από άλλα είδη υπολειμμάτων πληρούν τις απαιτήσεις του παραπάνω προτύπου [25].

3.5. Θερμαντική αξία

Στον Πίνακα 5 παρουσιάζεται η υψηλότερη θερμαντική αξία (HHV) αλλά και η υψηλότερη θερμαντική αξία ελεύθερης τέφρας (HHVf) των πελλετών που παρασκευάσθηκαν από τα υπολείμματα δρυός, λεύκης και πεύκης.

Πίνακας 5. Θερμαντική αξία πελλετών δρυός, λεύκης και πεύκης

Θερμαντική αξία (MJ/kg)	Χονδροί κλάδοι (d >5cm)	Λεπτοί κλάδοι (d 2-5cm)	Κλαδίσκοι με φύλλωμα
	Δρυς		
HHV	19,26 ±0,050	19,31 ±0,060	19,3 ±0,122
HHVf	19,76	20,07	20,13
	Λεύκη		
HHV	18,26 ±0,075	18,27 ±0,020	-
HHVf	18,47	18,68	-
	Πεύκη		
HHV	20,95 ±0,020	20,80 ±0,045	20,95 ±0,015
HHVf	21,20	20,94	21,44

± Τυπική απόκλιση

Στη δρυ η θερμαντική αξία κυμάνθηκε από 19,26 MJ/kg στις πελλέτες χονδρών κλάδων έως 19,31 MJ/kg στις πελλέτες λεπτών κλάδων, ενώ οι πελλέτες κλαδίσκων παρουσίασαν ενδιάμεσες τιμές 19,3 MJ/kg. Στη λεύκη η θερμαντική αξία ήταν 18,26 MJ/kg στις πελλέτες χονδρών κλάδων και 18,27 MJ/kg στις πελλέτες λεπτών κλάδων. Στη πεύκη η θερμαντική αξία κυμάνθηκε από 20,80 MJ/kg στις πελλέτες λεπτών κλάδων έως 20,95 MJ/kg στις πελλέτες χονδρών κλάδων αλλά και στις πελλέτες κλαδίσκων. Η θερμαντική αξία ήταν μεγαλύτερη στις πελλέτες από πεύκη, μικρότερη στις πελλέτες από λεύκη ενώ οι πελλέτες δρυός παρουσίασαν ενδιάμεσες τιμές. Οι διαφορές στη θερμική αξία έγιναν περισσότερο εμφανείς όταν υπολογίσθηκαν σε θερμαντική αξία ελεύθερης τέφρας (HHVf Σε παρόμοια μελέτη [64] βρέθηκε πως οι πελλέτες από ξύλο πεύκης είχαν θερμαντική αξία 20,24 MJ/kg.

4. Συμπεράσματα

Τα κύρια συμπεράσματα της παρούσας μελέτης είναι:

- Οι κλάδοι των δένδρων από τα υπολείμματα υλοτομιών δρυός, λεύκης και πεύκης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή πελλετών. Οι πελλέτες χονδρών και λεπτών κλαδιών λεύκης και πεύκης μπορούν να χρησιμοποιηθούν αμιγώς σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προτύπου EN ISO 17225-2:2015.
- Το περιεχόμενο της τέφρας και του αζώτου παίζουν καθοριστικό παράγοντα αξιολόγησης των πελλετών. Οι πελλέτες δρυός αλλά και οι πελλέτες των κλαδίσκων της πεύκης παρουσίασαν υψηλό περιεχόμενο σε τέφρα και άζωτο και δεν πληρούν τις απαιτήσεις του παραπάνω προτύπου.
- Με εξαίρεση τις πελλέτες από κλαδίσκους πεύκης και δρυός, οι πελλέτες από άλλα είδη υπολειμμάτων πληρούν τις απαιτήσεις του παραπάνω προτύπου ως προς τις φυσικές ιδιότητές τους.
- Υπήρξαν σημαντικές διαφορές στη χημική σύσταση και στη θερμαντική αξία μεταξύ των διαφόρων κλάσεων υπολειμμάτων από τα οποία κατασκευάστηκαν οι πελλέτες.
- Κατά φθίνουσα σειρά η θερμαντική αξία των πελλετών κυμάνθηκε στα τρία δασοπονικά είδη ως εξής: πεύκη>δρυς>λεύκη.

Acknowledgment

Η παρούσα εργασία χρηματοδοτήθηκε εν μέρει από το Πράσινο ταμείο του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Thek, G., and Obernberger, I., 2010, “The Pellet Handbook: The Production and Thermal Utilization of Biomass Pellets”, ISBN 978-1-84407-631-4, USA.

[2] Döring, S., 2013, "Power from Pellets; Technology and Applications". Springer Verlag ISBN 978-3-642-19961-5, Germany.

[3] Duca, D., Riva, G., Pedretti, E. F., and Toscano, G., 2014, "Wood pellet quality with respect to EN 14961-2 standard and certifications", *Fuel*, *135*, pp. 9-14.

[4] Φιλίππου, Ι., 2014α, "Αξιοποίηση δασικής βιομάζας για παραγωγή ενέργειας. Περιβαλλοντική και αναπτυξιακή συμβολή", Πρακτικά 10ου Εθνικού Συνεδρίου για Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Θεσσαλονίκη, Νοεμ. 26-28 , σελ. 273-286.

[5] Wolf, A.,Vidlund, A., and Andersson, E., 2006, "Energy-efficient pellet production in the forest industry - A study of obstacles and success factors", Biomass and Bioenergy, 30(1), pp. 38-45.

[6] Goetzl, A., 2015, "Developments in the global trade of wood pellets", Working paper-Office of Industries, U.S. *International Trade Commission*, ID-039.

[7] Dalheim, R., 2016, ''Wood pellet heat may reduce carbon emissions by more than half, says study'', Woodworking network.

[8] Huang, J., 2015, ''Wood Pellet Global Market Report 2014''. Gemco energy, http://www.biofuelmachines.com/wood-pellet-global-market-report-2014.html.

[9] Sikkema, R., Steiner, M., Junginger, M, Hiegl, W., Hansen, M.T., and Faaij, A., 2011, ''The European wood pellet markets: current status and prospects for 2020'', *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(3), pp. 250-278.

[10] Goh, C.S., Junginger, M., Cocchi, M., Marchal, D., Thrän, D., Hennig, C., Heinimo, J., Nikolaisen L., Schouwenberg, P., Bradley, D., Hess, R., Jacobson, J., Ovard, L., and Deutmeyer, M., 2013, ''Wood pellet market and trade: a global perspective'', *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 7(1), pp. 24-42.

[11] EU – European Union, 2014, ''Climate and Energy Goals for a Competitive, Secure and Low-Carbon EU Economy'', *European Commission*, IP/14/54, 22.

[12] Ελευθεριάδης, Ι., 2015, ''Παραγωγή και εισαγωγές pellets στην Ελλάδα'', Ημερίδα ΚΑΠΕ, «Αξιοποίηση βιομάζας υπολειμμάτων δασικών υλοτομιών για παραγωγή πελλετών (wood pellets)», Θεσσαλονίκη, Δεκ. 17.

[13] Lehtikangas, P., 2001, ''Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark'', *Biomass and Bioenergy*, 20(5), pp. 351-360.

[14] Nilsson, D., Bernesson, S., Hansson, P.A., and 2011, ''Pellet production from agricultural raw materials – A systems study'', *Biomass and Bioenergy*, 35(1), pp. 679–689.

[15] Zamorano, M., Popov, V., Rodríguez, M.L., and García-Maraver, A., 2011, ''A comparative study of quality properties of pelletized agricultural and forestry lopping residues'', *Renewable Energy*, 36(11), pp. 3133–3140.

[16] Liu, Z., Quek, A., and Balasubramanian, R., 2014, ''Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars'', *Applied Energy*, 113, pp. 1315–1322.

[17] Miranda, T., Montero, I., Sepúlveda, F.J., Arranz, J.I., Rojas C.V., and Nogales, S., 2015, ''A review of pellets from different sources. Material'', 8(4), pp. 1413-1427.

[18] Gündüz, G., Saraçoğlu, N., and Aydemir, D., 2016, ''Characterization and elemental analysis of wood pellets obtained from low-valued types of wood'', *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(15), pp. 2211-2216.

[19] Νταλός, Γ., και Σιδεράς, Α., 2015. ''Αξιοποίηση αγροτικών και δασικών υπολειμμάτων για παραγωγή πελλετών (wood pellets)'', Ημερίδα ΚΑΠΕ, «Αξιοποίηση βιομάζας υπολειμμάτων δασικών υλοτομιών για παραγωγή πελλετών (wood pellets)», Θεσσαλονίκη, Δεκ. 17.

[20] Rhen, C., Ohman, M., Gref. R., and Wasterlund, I., 2007, ''Effect of raw material composition in woody biomass pellets on combustion characteristics'', *Biomass and Bioenergy*, 31(1), pp. 66-72.

[21] Kaliyan, N., and Morey, R.V., 2009, ''Factors affecting strength and durability of densified biomass products'', *Biomass and Bioenergy*, 33(3), pp. 337-359.

[22] Nielsen, N.P.K., Gardner, D.J., Poulsen, T., and Felby, C., 2009, ''Importance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets'', *Wood and Fiber Science*, 41(4), pp. 414-425.

[23] Samuelsson, R., Thyrel, M., Sjostrom, M., and Lestander, T.A., 2009, ''Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality'', *Fuel Processing Technology*, 90(9), pp. 1129-1134.

[24] Jezerska, L., Zajonc, O., Vyletelek, V., and Zegzulka, J., 2016, ''Mechanical material properties effect on pelletization'', *Wood Research*, 61(2), pp. 307-320.

[25] EN ISO 17225-2, 2015, ''Solid biofuels - Fuel specifications and classes. Part 2: Graded wood pellets'', European Committee for Standardisation.

[26] EN ISO 17225-6, 2014, ''Solid biofuels -Fuel specifications and classes. Part 2: Graded non-woody pellets'', European Committee for Standardisation.

[27] Nurmi, J., 2007, ''Recovery of logging residues for energy from spruce (*Picea abies*) dominated stands'', *Biomass and Bioenergy*, 31(6), pp. 375–380.

[28] Hu, G., and Heitman, J.A., 2008, ''Feedstock pretreatment strategies for producing ethanol from wood, bark and forest residues'', *BioResources*, 3(1), pp. 270-294.

[29] Malinen, J., Pesonen, M., Maatta, T., and Kajanus, M., 2010, ''Potential harvest for wood fuels (energy wood) form logging residues and first thinnings in Southern Finland'', *Biomass and Bioenergy*, 20(3), pp. 189-196.

[30] Filbakk, T., Jirjis, R., Nurmi, J., and Hoibo, O., 2011, ''The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris L.*) pellets'', *Biomass Bioenergy*, 35(8), pp. 3342–3349.

[31] Haughlin, M., Gobakken, T., Lien, V., Bollandsas, O.M., and Noesset, E., 2012, ''Estimating potential logging residues in a boreal forest by airborne laser scanning'', *Biomass and Bioenergy*, 36, pp. 356-365.

[32] Bouriaud, O., Stefan, G., and Flocea, M., 2013, ''Predictive models of forest logging residues in Romanian spruce and beech forests'', *Biomass and Bioenergy*, 54, pp. 59-66.

[33] Jarvinen, J., and Agar, D., 2014, ''Experimentally determined storage and handling properties of fuel pellets made from torrefied whole-tree pine chips, logging residues and beech stem wood'', *Fuel*, 129, pp. 330–339.

[34] Filippou, V., Tsanaxidou, Z., Sideras, A., and Philippou, I., 2015, ''Weight characteristics of logging residues of fir and beech as an energy source'', *Pro Ligno*, 11(4), pp. 663-672.

[35] Giuntoli, J., Caserini, S., Marelli, L., Baxter, D., and Agostini, A., 2015, ''Domestic heating from forest logging residues: environmental risks and benefits'', *Journal of Cleaner Production*, 99, pp. 206-216.

[36] Mate, R., 2016, ''Potentials and wood fuel quality of logging residues from indigenous and planted forests in Mozambique''. PhD thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden.

[37] Eker, M., Çoban, H.O., and Acar, H.H., 2009, ''The procurement problem of logging residues in Turkish forestry'', Proceedings in FORMEC, June 21-24, Prague, pp. 115-124.

[38] Aguilar, F.X., 2014, ''Wood Energy in Developing Economies. Resource, management, economics'', Routledge, USA, ISBN: 987-0-415-71169-2.

[39] Φιλίππου, Ι. 1982, ''Θερμαντική αξία διαφόρων μορφών δασικής βιομάζας. Πρακτικά 1ου Συνεδρίου Ήπιων Μορφών Ενέργειας. 20-22 Οκτωβρίου, 1982, Θεσσαλονίκη, σελ Βιο23-30.

[40] Nordin, A.,1994, ''Chemical elemental characteristics of biomass fuels'', *Biomass and Bioenergy*, 6(5), pp. 339–347.

[41] Wang, L., and Dibdiakova, J., 2014, ''Characterization of ashes from different wood parts of Norway spruce tree'', *Chemical Engineering Transactions*, 37, pp. 37-42.

[42] Zeng, W., Tang, S., and Xiao Q. H., 2014, ''Calorific values and ash contents of different parts of Masson pine trees in southern China'', *Journal of Forestry Research*, 25(4), pp. 779−786.

[43] Φιλίππου, Ι., 2014β, ''Χημεία και Χημική Τεχνολογία Ξύλου'', κεφ.11., Εκδόσεις Γιαχούδη, Θεσσαλονίκη.

[44] Vassilev, S., Baxter, D., Andersen, L., and Vassileva, C., 2010, ''An overview of the chemical composition of biomass'', *Fuel*, 89(5), pp. 913–933.

[45] Μπαρμπούτης, Ι., και Λυκίδης, Χ., 2014, ''Χαρακτηριστικά καύσης δασικών ειδών που χρησιμοποιούνται ως καύσιμα και επίδραση φλοιού'', Πρακτικά 10ου Εθνικού Συνεδρίου για Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Θεσσαλονίκη, Νοεμ. 26-28, σελ. 263-271.

[46] Werkelin, J., Skrifvars, B., and Hupa, M., 2007, ‘‘Ash-forming elements in four Scandinavian wood species. Part 1: Summer harvest’’, *Biomass and Bioenergy*, 29(6), PP. 451-466.

[47] Jirjis, R., Őhman, M., and Vinterbäck, J., 2006, ‘‘Pellets quality- effect of raw material properties and manufacturing process parameters’’. Bioenergi/Department of Bioenergy, 14.

[48] Obernberger, I., and Thek, G., 2004, ‘‘Physical characterization and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behavior’’, *Biomass and Bioenergy*, 27(6), pp. 653–669.

[49] Obernberger, I., Brunner, T., and Barnthaler, G., 2006, ‘‘Chemical properties of solid biofuels - significance and impact’’, *Biomass and Bioenergy*, 30(11), pp. 973-982.

[50] Miranda, M.T., Arranz, J.I., Rojas, S., and Montero, I., 2009, ‘‘Energetic characterization of densified residues from Pyrenean oak forest’’, *Fuel*, 88(11), pp. 2106–2112.

[51] Acda, M.N., and Devera, E. E., 2014, ‘‘Physico-chemical properties of wood pellets from forest residues’’, *Journal of Tropical Forest Science*, 26(4): 589-595.

[52] Φιλίππου, Ι., 2014γ, ‘‘Αξιοποίηση δασικής βιομάζας (υπολείμματα υλοτομιών) για παραγωγή-τυποποίηση εξευγενισμένων στερεών καυσίμων βιομάζας’’, Επιπτώσεις στο περιβάλλον. Ερευνητικό πρόγραμμα. Χρηματοδότης ΠΡΑΣΙΝΟ ΤΑΜΕΙΟ.

[53] Φιλίππου, Β., και Φιλίππου, Ι., 2014, ‘‘Μέθοδοι συγκομιδής υπολειμμάτων υλοτομίας’’, Πρακτικά 10ου Εθνικού Συνεδρίου για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας, Νοεμ. 26-28, 2014, σελ. 287-297.

[54] Φιλίππου, Β., Φιλίππου, Ι., και Σιδεράς, Α., 2015, ‘‘Αξιοποίηση υπολειμμάτων υλοτομίας για παραγωγή βοκαυσίμων Ι. Ποσοστό φλοιού και τέφρας κλαδιών ελάτης, πεύκης, οξιάς, λεύκης και δρυός’’, Πρακτικά 17ου Πανελλήνιου Δασολογικού Συνεδρίου, Οκτ. 7-8, σελ. 809-819.

[55] Filippou V., Philippou, I., Eleftheriadis, I., and Tsiotas, K., 2017, ‘‘Energy and other properties of fir and beech logging residues’’, Proceedings of 18th Panhellenic Forestry Congress and International Workshop, 8-11 October 2017, Edessa, pp.1340 -1348.

[56] Filippou V., Philippou I., Eleftheriadis I., Tsiotas K., ‘‘Fuel properties of oak, poplar and pine logging residues’’, (2017) Proligno. 13(4), pp. 570-578.

[57] CEN/TS 14775, 2005a, ‘‘Solid Biofuels – Method for the Determination of Ash’’

[58] CEN/TS 15148, 2005b, ‘‘Solid Biofuels – Method for the Determination of the Content of Volatile Matter’’

[59] CEN/TS 15104, 2005c, ‘‘Solid Biofuels – Determination of Total Content of Carbon, Hydrogen and Nitrogen’’

[60] CEN/TS 14918, 2005d, ‘‘Solid Biofuels – Method for the Determination of Calorific Value’’

[61] CEN/TS 15210-2, 2005e, ‘‘Solid Biofuels–Method for the Determination of Durability’’

[62] Serrano, C., Monedero, E., Lapuerta, M., and Portero, H., 2011, ‘‘Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets’’. *Fuel Processing Technology*, 92(3):699–706.

[63] Liorente, M.F., and Garcia, J.C., 2005, ‘‘Comparing methods for predicting sintering of biomass ash in combustion’’, *Fuel*, 84(14): 1893–1900.

[64] Telmo, C., Lousada, J., and Moreira, N., 2010, ‘‘Proximate analysis, backwards stepwise regression between gross calorific value, ultimate and chemical analysis of wood’’, *Bioresource Technology*, 101(11) 3808-3815.

[65] Singh, M., Singh, R., and Gill, G., 2015, ‘‘Estimating the correlation between the caloric value and elemental components of biomass using regression analysis’’, International Journal of Industrial Electronics and Electrical Engineering, 3(9), pp. 18-23.

[66] Biswas, A. K., Rudolgsson, M., Broström, M., and Umeki, K., 2014, ‘‘Effect of pelletizing conditions on combustion behaviour of single wood pellet’’, *Applied Energy*, 119, pp. 79–84.

Γεωθερμία

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΑΕΡΑ

Κ.Τ. Παπακώστας[1*], Α. Τσαμήτρος[1], Γ. Μαρτινόπουλος[2]

[1]*Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ,
e-mail: dinpap@eng.auth.gr
[2] Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος, Σχολή Επιστημών και Τεχνολογίας
570 01 Θέρμη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ενσωμάτωση συστημάτων εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε συστήματα κλιματισμού-αερισμού μπορεί να μειώσει την εγκατεστημένη ισχύ των συσκευών θέρμανσης και ψύξης και να συμβάλει στην εξοικονόμηση ενέργειας. Το έδαφος είναι μία αποτελεσματική πηγή, αποδέκτης και αποθήκη θερμότητας σε εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης, ενώ η αβαθής γεωθερμία αποτελεί μία από τις πιο ελκυστικές επιλογές ανάμεσα στις ανανεώσιμες και καθαρές μορφές ενέργειας. Οι εναλλάκτες θερμότητας εδάφους-αέρα είναι μία από τις εφαρμογές αξιοποίησης της θερμοχωρητικότητας του εδάφους που χρησιμοποιούνται τις τελευταίες δεκαετίες. Η θερμοκρασία κάτω από την επιφάνεια του είναι χαμηλότερη από την εξωτερική το καλοκαίρι και υψηλότερη το χειμώνα, και ο αέρας μέσα στον εναλλάκτη εδάφους-αέρα μπορεί αντίστοιχα να προψυχθεί ή να προθερμανθεί, πριν χρησιμοποιηθεί για αερισμό.

Το δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας των εναλλακτών θερμότητας εδάφους-αέρα έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον των επιστημόνων ήδη από τη δεκαετία του 1980 ενώ οι κύριες προσπάθειες έχουν επικεντρωθεί στην ανάπτυξη μεθόδων προσομοίωσης της θερμικής τους συμπεριφοράς, προκειμένου αυτοί να ενσωματωθούν στο συνολικό σχεδιασμό των συστημάτων αερισμού-κλιματισμού. Η τυπική διαδικασία αποσκοπεί στη διαστασιολόγηση του εναλλάκτη, στον υπολογισμό της εναλλασσόμενης θερμότητας μεταξύ του αέρα και του εδάφους, στον υπολογισμό της μεταβολής της θερμοκρασίας του αέρα από την είσοδο έως την έξοδο από τους σωλήνες και στον υπολογισμό της πτώσης πίεσης του αέρα μέσα στους σωλήνες, με σκοπό την αύξηση της αποδοτικότητας και της ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μία σύγκριση ανάμεσα σε δύο μονοδιάστατα μοντέλα υπολογισμού από τη διεθνή βιβλιογραφία. Το κριτήριο επιλογής τους ήταν η απλότητα των υπολογισμών και η εξαγωγή συμπερασμάτων χωρίς την εισαγωγή πολλών δεδομένων, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια γρήγορη διαστασιολόγηση ενός εναλλάκτη εδάφους-αέρα σε μία εφαρμογή. Εξετάζεται η επίδραση του μήκους, του βάθους τοποθέτησης, της διαμέτρου και του αριθμού αγωγών στη θερμοκρασία εξόδου του αέρα και στην εναλλαγή θερμότητας (W/m^2) καθώς και η επίδραση του μήκους και της διαμέτρου των αγωγών στην αποδοτικότητα του εναλλάκτη. Οι υπολογισμοί γίνονται για τα κλιματολογικά δεδομένα της Αθήνας και για τυπική χειμερινή και θερινή ημέρα. Τα αποτελέσματα τα οποία δίνουν τα δύο μοντέλα συγκρίνονται επίσης και με πραγματικές μετρήσεις σε θερινή και χειμερινή λειτουργία, προκειμένου να ελεγχθεί η αξιοπιστία τους.

Λέξεις Κλειδιά: εναλλάκτες θερμότητας εδάφους-αέρα, μοντέλα προσομοίωσης, παραμετρική ανάλυση

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μία από τις τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας στα συστήματα κλιματισμού-αερισμού είναι η εκμετάλλευση της αποθηκευμένης στο έδαφος θερμικής ενέργειας. Λόγω της υψηλής θερμικής αδράνειας του εδάφους, η θερμοκρασία του κάτω από ένα ορισμένο βάθος παραμένει σχετικά σταθερή και ανεξάρτητη από τις ημερήσιες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, ενώ επηρεάζεται περισσότερο από εποχιακές μεταβολές. Επίσης, ακόμη και σε μικρό βάθος η θερμοκρασία του εδάφους είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα το καλοκαίρι και υψηλότερη το χειμώνα. Οι σχετικά σταθερές θερμοκρασίες καθιστούν το έδαφος μία αποτελεσματική πηγή, αποδέκτη και αποθήκη θερμότητας σε εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης, και η αβαθής γεωθερμία αποτελεί μία από τις πιο ελκυστικές επιλογές ανάμεσα στις ανανεώσιμες και καθαρές μορφές ενέργειας.

Οι εναλλάκτες θερμότητας εδάφους-αέρα (earth-to-air heat exchangers - EAHE) είναι μία από τις εφαρμογές αξιοποίησης της θερμοχωρητικότητας του εδάφους που χρησιμοποιούνται τις τελευταίες δεκαετίες κυρίως σε κτίρια εμπορικά ή κατοικιών, αλλά και σε θερμοκήπια, αποθήκες και χώρους σταύλισης ζώων. Οι εναλλάκτες εδάφους-αέρα αποτελούνται από έναν ή περισσότερους αγωγούς/σωλήνες, κυρίως από PVC, μέταλλο ή σκυρόδεμα, οι οποίοι τοποθετούνται οριζόντια μέσα στο έδαφος, είτε παράλληλα είτε σε μορφή σερπαντίνας ή υπό μορφή δακτυλίου, συνήθως σε βάθος από 2 έως 4m. Εξωτερικός αέρας, ψυχρός το χειμώνα και θερμός το καλοκαίρι, διοχετεύεται στους σωλήνες και η διαφορά θερμοκρασίας εδάφους - αέρα οδηγεί στη θέρμανση ή την ψύξη του αέρα με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του αέρα στην έξοδο των αγωγών να είναι υψηλότερη ή χαμηλότερη από αυτή του περιβάλλοντος, αντίστοιχα για χειμώνα και καλοκαίρι.

Ο αέρας εξόδου από τους αγωγούς μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας για αερισμό χώρων ή να οδηγηθεί σε κεντρικές κλιματιστικές μονάδες συστημάτων κλιματισμού για επιπλέον θέρμανση ή ψύξη. Επίσης μπορεί να διοχετευτεί στην εξωτερική μονάδα μία αντλίας θερμότητας με πηγή τον αέρα για να της αυξήσει το βαθμό απόδοσης. Επειδή η κυκλοφορία του αέρα μέσα στους αγωγούς γίνεται κατά κανόνα με τη βοήθεια ανεμιστήρων, η διάμετρος των αγωγών και η ταχύτητα του αέρα επηρεάζουν σημαντικά την πτώση πίεσης του αέρα και επομένως και το λειτουργικό κόστος. Σε ορισμένες περιπτώσεις εγκαθίστανται αγωγοί με μεγάλη διατομή ώστε η κίνηση του αέρα να υποβοηθείται από φυσικές δυνάμεις όπως η ένταση του ανέμου ή η άνωση, οπότε το λειτουργικό κόστος μειώνεται σημαντικά.

Επειδή ακριβώς η προθέρμανση και η πρόψυξη του αέρα γίνεται όταν οι θερμοκρασίες του περιβάλλοντος δεν ευνοούν τον συντελεστή αποδοτικότητας των αντλιών θερμότητας με πηγή τον αέρα και αντίστοιχα των αερόψυκτων ψυκτικών μονάδων συμπίεσης ατμών, οι εναλλάκτες εδάφους αέρα έχουν κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με αυτές τις συσκευές. Τα πλεονεκτήματα αυτά είναι ο απλός σχεδιασμός, οι μικρές απαιτήσεις συντήρησης, η χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και η λειτουργία χωρίς ορυκτά καύσιμα και ψυκτικά ρευστά [1]. Τα κυριότερα μειονεκτήματά τους είναι το υψηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης, κυρίως λόγω των εκσκαφών, η απομάκρυνση των πιθανών συμπυκνωμάτων υγρασίας του αέρα από τους υπόγειους σωλήνες και η μείωση της ποιότητας του αέρα μετά από μακρόχρονη χρήση λόγω της ανάπτυξης μικροοργανισμών μέσα στους σωλήνες. Λόγω του τελευταίου, τα συστήματα κλειστού κυκλώματος με πλήρη ανακυκλοφορία του αέρα μεταξύ του κτιρίου και του εναλλάκτη εδάφους-αέρα χρησιμοποιούνται πολύ σπάνια, ενώ τα συστήματα ανοιχτού κυκλώματος με πλήρη ανανέωση του αέρα είναι συνήθως ο κανόνας.

Η ιδέα της χρήσης του εδάφους ως πηγή θερμότητας είναι γνωστή ήδη από τα αρχαία χρόνια. Η εγκατάσταση όμως εναλλακτών εδάφους-αέρα άρχισε να επεκτείνεται κατά τις τελευταίες τρεις δεκαετίες, κυρίως σε αναπτυγμένες χώρες, τόσο σε ψυχρά όσο και σε θερμά κλίματα. Ανασταλτικοί παράγοντες είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασης και η σχετική δυσκολία σχεδιασμού ενός επαρκούς συστήματος. Η διείσδυση στην αγορά είναι ακόμη μικρή αλλά είναι πιθανόν να αυξηθεί με βελτιώσεις στην τεχνολογία τους και με τις διαρκώς αυξημένες ανάγκες και απαιτήσεις από τη νομοθεσία για εξοικονόμηση ενέργειας.

Μέχρι στιγμής, έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες από διάφορους ερευνητές για το σχεδιασμό, τη μοντελοποίηση και την εφαρμογή συστημάτων εναλλάκτη θερμότητας εδάφους-αέρα. Βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις δίνονται στις [1-3]. Μοντέλα προσομοίωσης της θερμοφυσικής συμπεριφοράς των εναλλακτών θερμότητας εδάφους-αέρα παρουσιάζονται στις [4-10].Επίσης, σε διάφορες εργασίες έχουν μελετηθεί οι δυνατότητες των συστημάτων για θέρμανση και ψύξη, η οικονομικότητά τους καθώς και η επίδραση διαφόρων παραμέτρων, όπως η διάμετρος, το μήκος, το υλικό και το βάθος

τοποθέτησης των αγωγών, η ποιότητα του εδάφους και η ταχύτητα του αέρα στην αποδοτικότητά τους [8, 11-20].Το ενδιαφέρον και οι προσπάθειες των επιστημόνων επικεντρώνονται κυρίως στην ανάπτυξη μεθόδων προσομοίωσης της θερμικής τους συμπεριφοράς και στην πειραματική επιβεβαίωση της αξιοπιστίας τους, προκειμένου η ενσωμάτωσή τους στο συνολικό σχεδιασμό των συστημάτων αερισμού-κλιματισμού να γίνεται αποδοτικά και με ακρίβεια.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μία σύγκριση ανάμεσα σε δύο μονοδιάστατα μοντέλα υπολογισμού από τη διεθνή βιβλιογραφία. Το κριτήριο επιλογής τους ήταν η απλότητα των υπολογισμών και η εξαγωγή συμπερασμάτων χωρίς την εισαγωγή πολλών δεδομένων, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μια γρήγορη διαστασιολόγηση ενός εναλλάκτη εδάφους-αέρα σε μία εφαρμογή. Εξετάζεται η επίδραση του μήκους, του βάθους τοποθέτησης, της διαμέτρου και του αριθμού αγωγών στη θερμοκρασία εξόδου του αέρα καθώς και η επίδραση του μήκους και της διαμέτρου των αγωγών στην αποδοτικότητα του εναλλάκτη. Οι υπολογισμοί γίνονται για τα κλιματολογικά δεδομένα της Αθήνας και για τυπική χειμερινή και θερινή ημέρα. Τα αποτελέσματα τα οποία δίνουν τα δύο μοντέλα συγκρίνονται επίσης και με πραγματικές μετρήσεις σε θερινή και χειμερινή λειτουργία, προκειμένου να ελεγχθεί η αξιοπιστία τους.

2. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΩΝ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΕΔΑΦΟΥΣ-ΑΕΡΑ

Η διαδικασία υπολογισμών περιλαμβάνει εξισώσεις μετάδοσης θερμότητας και ρευστομηχανικής και αποσκοπεί στη διαστασιολόγηση του εναλλάκτη, στον υπολογισμό της εναλλασσόμενης θερμότητας ανάμεσα στον αέρα και το έδαφος, στον υπολογισμό της αύξησης/μείωσης της θερμοκρασίας του αέρα από την είσοδο έως την έξοδο από τους σωλήνες και στον υπολογισμό της πτώσης πίεσης του αέρα μέσα στους σωλήνες, με σκοπό πάντοτε την αύξηση της αποδοτικότητας και την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας.

Οι σημαντικότερες παράμετροι σχεδιασμού είναι: ο ρυθμός παροχής αέρα, η διάμετρος των αγωγών, το μήκος τους (συσχετίζεται με τον αριθμό των αγωγών), το βάθος τοποθέτησης και τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Η εναλλαγή θερμότητας και η πτώση πίεσης αυξάνεται με το μήκος των σωλήνων. Μικρότερες διάμετροι σωλήνων δίνουν καλύτερη θερμική απόδοση, αλλά και μεγαλύτερη πτώση πίεσης. Η πτώση πίεσης μπορεί να μειωθεί, και συγχρόνως να αυξηθεί η θερμική απόδοση, με την τοποθέτηση περισσότερων σωλήνων σε παράλληλη διάταξη.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν διάφορα μοντέλα υπολογισμού για την προσομοίωση της θερμοφυσικής συμπεριφοράς των εναλλακτών θερμότητας εδάφους-αέρα. Η ανάλυση των συστημάτων αυτών ξεκίνησε με την ανάπτυξη μοντέλων που εξετάζουν το φαινόμενο της μετάδοσης θερμότητας σε μία διάσταση [5-7]. Τα δισδιάστατα μοντέλα αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1990 και αντικαταστάθηκαν από τρισδιάστατα μοντέλα τα τελευταία χρόνια.

Τα προγράμματα λογισμικού που προσομοιώνουν την ενεργειακή συμπεριφορά συστημάτων και κτιρίων (EnergyPlus, TRNSYS κλπ.) έχουν υπορουτίνες για τον σχεδιασμό εναλλακτών εδάφους-αέρα. Τα προγράμματα όμως αυτά είναι κυρίως εργαλεία ανάλυσης και δεν χρησιμοποιούνται για έναν γρήγορο σχεδιασμό, γιατί απαιτούν πολύ μεγάλο χρόνο εκμάθησης και ορισμένα από αυτά δεν είναι δωρεάν διαθέσιμα. Επίσης η υπολογιστική ρευστοδυναμική (computational fluid dynamics - CFD) είναι πολύ δημοφιλής μεταξύ των ερευνητών για την μοντελοποίηση και ανάλυση των συστημάτων με εναλλάκτες εδάφους-αέρα, αλλά και αυτά τα προγράμματα δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για γρήγορο σχεδιασμό. Στη εργασία αυτή εξετάζονται δύο μονοδιάστατα μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται για εφαρμογές θέρμανσης/ψύξης κτιρίων, είναι απλά στην εφαρμογή και δίνουν γρήγορα αποτελέσματα.

2.1. Το μοντέλο υπολογισμού GAEA

Το μοντέλο GAEA (Graphische Auslegung von Erdwärme Austauschern) [5] υπολογίζει τη θερμοκρασία του αέρα κατά μήκος ενός σωλήνα μέσα στο έδαφος, ο οποίος αποτελεί τον εναλλάκτη εδάφους-αέρα. Το έδαφος γύρω από το σωλήνα θεωρείται ομοιογενές, οι ιδιότητές του σταθερές και η θερμοκρασία του εδάφους, η οποία μεταβάλλεται με το χρόνο και το βάθος κάτω από την επιφάνεια της γης, προσδιορίζεται από τη εξωτερική θερμοκρασία του αέρα και τις ιδιότητες του εδάφους [21, 22]. Κατά τον υπολογισμό περισσοτέρων του ενός σωλήνων (π.χ. παραλλήλων σωλήνων ή σε μορφή σερπαντίνας) θεωρείται ότι η αλληλεπίδραση στα θερμοκρασιακά προφίλ γύρω από τους σωλήνες είναι αμελητέα. Επίσης θεωρείται ότι δεν υπάρχει πάγος στο έδαφος ούτε συμβαίνει συμπύκνωση υγρασίας στο εσωτερικό του εναλλάκτη. Ο αέρας γενικά θεωρείται ότι είναι ιδανικό αέριο.

Η θερμοκρασία του εδάφους στο τοίχωμα του σωλήνα εξαρτάται καταρχάς από τη μεταφορά θερμότητας από την επιφάνεια της γης σε βαθύτερα στρώματα και δεύτερον από τη μεταφορά θερμότητας από τον αέρα που ρέει μέσα στο σωλήνα προς το τοίχωμα του σωλήνα. Στο μοντέλο ορίζεται μια παράμετρος U^*, η οποία εκφράζει την αναλογία αυτών των δύο ροών θερμότητας, και δίδεται από τη σχέση:

$$U^* = 2\pi \frac{\lambda}{U_L} \frac{1}{ln\left[\frac{S_0}{R_0} + \sqrt{\left(\frac{S_0}{R_0}\right)^2 - 1}\right]} \quad (1)$$

όπου, λ = η θερμική αγωγιμότητα του εδάφους [W/mK], U_L = ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας, μεταξύ του αέρα και του τοιχώματος, ανά μήκος τοιχώματος του αγωγού [W/mK], S_0 = το βάθος από την επιφάνεια του εδάφους στο κέντρο του αγωγού [m] και R_0 = η ακτίνα του αγωγού [m].

Η θερμοκρασία του εδάφους στο τοίχωμα του αγωγού $\theta_{E,W}$ ορίζεται ως:

$$\theta_{E,W} = \frac{U^*\theta_{E,0} + \theta_{A,P}}{U^* + 1} \quad (2)$$

όπου, $\theta_{E,0}$= η θερμοκρασία του εδάφους στο τοίχωμα του αγωγού(χωρίς επίδραση από τον αγωγό) [°C], και $\theta_{A,P}$ = η θερμοκρασία του αέρα μέσα στον αγωγό) [°C].

Δηλαδή, η θερμοκρασία $\theta_{E,W}$ είναι ο σταθμισμένος αριθμητικός μέσος ανάμεσα στη θερμοκρασία του ρεύματος αέρα μέσα στον αγωγό $\theta_{A,P}$ και στη θερμοκρασία του εδάφους στο τοίχωμα του αγωγού που δεν επηρεάζεται από τον αγωγό $\theta_{E,0}$, με την παράμετρο U^* ως συντελεστή στάθμισης. Γενικά θεωρείται ότι θερμοκρασία του εδάφους κοντά στον αγωγό δεν επηρεάζεται από τον αγωγό και έτσι η θερμοκρασία $\theta_{E,0}$είναι ομοιόμορφη σε όλο το μήκος του αγωγού.

Η ανεπηρέαστη θερμοκρασία του εδάφους $\theta_{z,t}$ σε βάθος z και χρόνο t υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\theta_{z,t} = \theta_m - A_s e^{\left(-z\left(\frac{\pi}{365 a_s}\right)^{1/2}\right)} \cos\left[\frac{2\pi}{365}(t - t_o - \frac{z}{2}\left(\frac{365}{\pi \alpha_s}\right)^{1/2}\right] \quad (3)$$

όπου

z = το βάθος μέσα στο έδαφος [m], θ_m = η μέση ετήσια τιμή της επιφανειακής θερμοκρασίας του εδάφους [°C], A_s = το πλάτος της ετήσιας διακύμανσης της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του εδάφους [°C], θ_{max} = η μέση μέγιστη τιμή της επιφανειακής θερμοκρασίας του εδάφους [°C], α_s = ο συντελεστής θερμικής διαχυτότητας του εδάφους [m^2/day],t = οι ημέρες από την αρχή του ημερολογιακού έτους [days]και t_0 = η ημέρα, από την αρχή του έτους, κατά την οποία η θερμοκρασία της επιφανείας του εδάφους λαμβάνει τη χαμηλότερη τιμή της [days].

Για τον υπολογισμό της εναλλαγής θερμότητας στον αγωγό, το ολικό μήκος του χωρίζεται σε 100 ίσα τμήματα στα οποία οι υπολογισμοί γίνονται βήμα-βήμα. Κάθε τμήμα θεωρείται ότι μεταφέρει αέρα σταθερής θερμοκρασίας, ώστε η εναλλαγή θερμότητας να οδηγεί σε ένα άλμα στη θερμοκρασία ανάμεσα στην αρχή και το τέλος του. Η εναλλαγή θερμότητας σε κάθε τμήμα υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\dot{Q} = \Delta z U_L (\theta_{E,W} - \theta_{A,P}) \quad (4)$$

όπου:

$\dot{Q}$ = η εναλλαγή θερμότητας μεταξύ του εδάφους και του αέρα στον αγωγό [W]

Δz = το μήκος κάθε τμήματος του αγωγού [m] και

U_L = ο συνολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μεταξύ του αέρα και του εδάφους [8] ανά m μήκους σωλήνα [W/mK].

Ο συντελεστής συναγωγής του αέρα στην εσωτερική επιφάνεια του αγωγού h_i υπολογίζεται ως:

$$h_i = \frac{\lambda_{A,P}\, Nu}{2R_0} \quad (5)$$

Η αποδοτικότητα ενός εναλλάκτη θερμότητας αέρα-εδάφους δίνεται από την εξίσωση:

$$\varepsilon = \frac{\theta_{air,out} - \theta_{air,in}}{\theta_{wall} - \theta_{air,in}} \quad (11)$$ ή χρησιμοποιώντας την εξίσωση (10),

$$\varepsilon = 1 - e^{-(U_T A/\dot{m}_{air}\, c_{p,air})} \quad (12)$$

3. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για τη σύγκριση των προαναφερόμενων μοντέλων, λαμβάνεται υπόψη ένα υποθετικό μικρό κτίριο γραφείων στην Αθήνα με σύστημα πλήρους κλιματισμού με αέρα, το οποίο αποτελείται από κεντρική κλιματιστική μονάδα, δίκτυο αεραγωγών και μία αντλία θερμότητας αέρα-νερού.

Το σύστημα κλιματισμού στο οποίο ενσωματώνεται ο εναλλάκτης εδάφους-αέρα είναι ένα σύστημα μονού αγωγού και σταθερής παροχής όγκου αέρα. Η προπαρασκευή του αέρα γίνεται μέσα στην Κεντρική Κλιματιστική Μονάδα (Κ.Κ.Μ) όπου και υπάρχουν όλες οι συσκευές για την επεξεργασία, θέρμανση και ψύξη του αέρα. Ο αέρας του αερισμού εισάγεται από το εξωτερικό περιβάλλον σε ένα εναλλάκτη θερμότητας εδάφους-αέρα, όπου προθερμαίνεται ή προψύχεται και στη συνέχεια περνάει μέσα από έναν εναλλάκτη αέρα-αέρα ανάκτησης θερμότητας, όπου θερμαίνεται ή ψύχεται εκ νέου ανάλογα με το αν το σύστημα βρίσκεται σε χειμερινή ή θερινή λειτουργία αντίστοιχα. Στη συνέχεια, εισέρχεται στο κιβώτιο μίξης όπου και αναμιγνύεται με τον αέρα ανακυκλοφορίας πριν περάσει από το στάδιο της θέρμανσης-ψύξης. Το θερμαντικό-ψυκτικό στοιχείο τροφοδοτείται με θερμό-ψυχρό νερό το οποίο παράγεται από μια αντλία θερμότητας αέρα-νερού. Στη θερινή λειτουργία στο στοιχείο αυτό γίνεται ψύξη και αφύγρανση του αέρα και στη χειμερινή μόνο θέρμανση. Σε περίπτωση που απαιτείται ύγρανση κατά τη χειμερινή λειτουργία τότε τοποθετείται ένας υγραντήρας, ο οποίος τροφοδοτεί το ρεύμα αέρα με ατμό και τοποθετείται μετά το θερμαντικό στοιχείο.

Όταν ο αέρας προσαγωγής αποκτήσει τις απαραίτητες ιδιότητες έτσι ώστε να μπορεί να παραλάβει τα φορτία του χώρου (αισθητά και λανθάνοντα) τότε, με τη βοήθεια του ανεμιστήρα προσαγωγής ο οποίος είναι ρυθμισμένος να παρέχει σταθερή ροή όγκου, εισέρχεται στο χώρο όπου και τον διατηρεί στις επιθυμητές συνθήκες. Αφού παραλάβει τα φορτία του χώρου, επιστρέφει στην Κ.Κ.Μ. Αφού καθαριστεί σε ένα προφίλτρο περνάει από τον ανεμιστήρα ανακυκλοφορίας και συνεχίζει στο κιβώτιο μίξης, όπου γίνεται ο διαχωρισμός του αέρα απόρριψης και του αέρα ανακυκλοφορίας. Το ρεύμα του αέρα απόρριψης συνεχίζει στον εναλλάκτη ανάκτησης πριν απορριφθεί στο περιβάλλον και ο αέρας ανακυκλοφορίας αναμιγνύεται στο κιβώτιο μίξης με το νωπό εξωτερικό αέρα. Οι παροχές του αέρα απόρριψης και του φρέσκου αέρα στο σύστημα είναι ίσες.

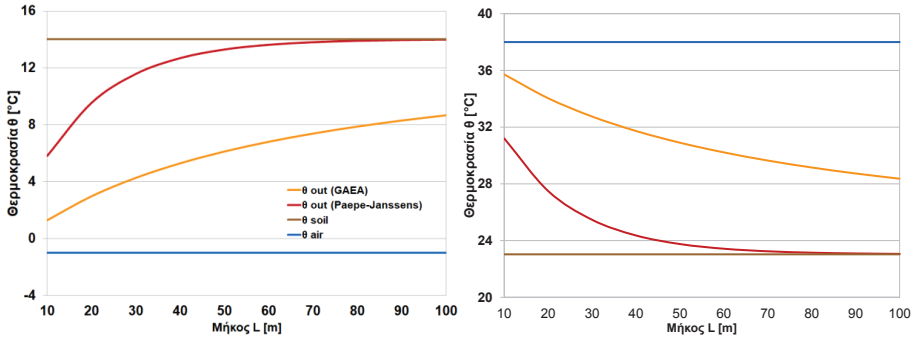
Για τη δεδομένη παροχή του αέρα αερισμού, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων (με εναλλάκτη εδάφους-αέρα) και με τα δύο μοντέλα και εξετάζεται η επίδραση του μήκους, του βάθους τοποθέτησης, της διαμέτρου και του αριθμού αγωγών στη θερμοκρασία εξόδου του αέρα καθώς και η επίδραση του μήκους και της διαμέτρου των αγωγών στην αποδοτικότητα του εναλλάκτη. Οι υπολογισμοί γίνονται για τα κλιματολογικά δεδομένα της Αθήνας για μια τυπική χειμερινή και θερινή ημέρα.

Και στα δύο μοντέλα χρησιμοποιούνται τα εξής δεδομένα:

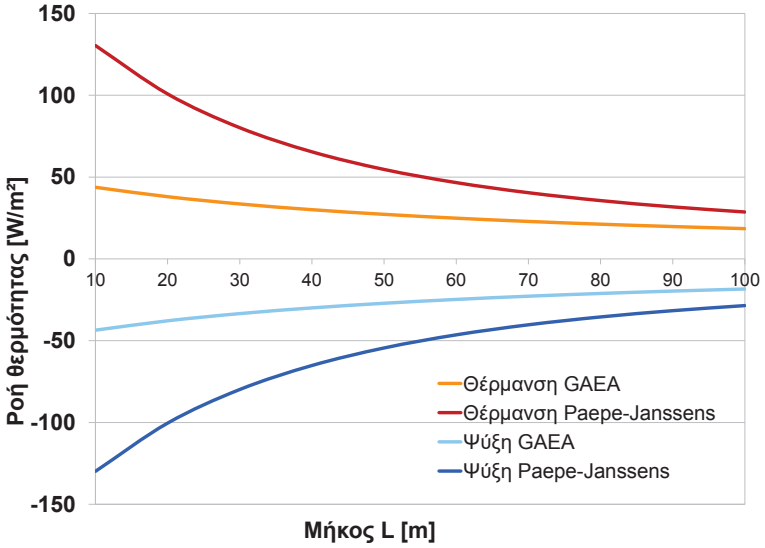
- μήκος Δz=50m,
- διάμετρος αγωγού=0.2m (ακτίνα r_1=0.1m),
- βάθος S_0=3m,
- παροχή αέρα $\dot{V}$ =360m^3/h

Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του αέρα, από την είσοδο έως την έξοδο του αγωγού, καθώς αυξάνεται το μήκος του. Τα αποτελέσματα δίνονται και για τα δύο μοντέλα για μια τυπική ημέρα του χειμώνα (31 Ιανουαρίου) και για μα τυπική ημέρα του καλοκαιριού (14 Ιουλίου).

Όπως είναι εμφανές, το μοντέλο Paepe-Janssens δίνει θερμοκρασίες εξόδου πολύ εγγύτερα στη θερμοκρασία του εδάφους σε σχέση με το μοντέλο GAEA, ειδικά για μεγάλα μήκη αγωγών, τόσο το χειμώνα όσο και το καλοκαίρι. Γενικά και για τα δύο μοντέλα, προκύπτει ότι η αύξηση του μήκους του αγωγού οδηγεί σε καλύτερα λειτουργικά αποτελέσματα.



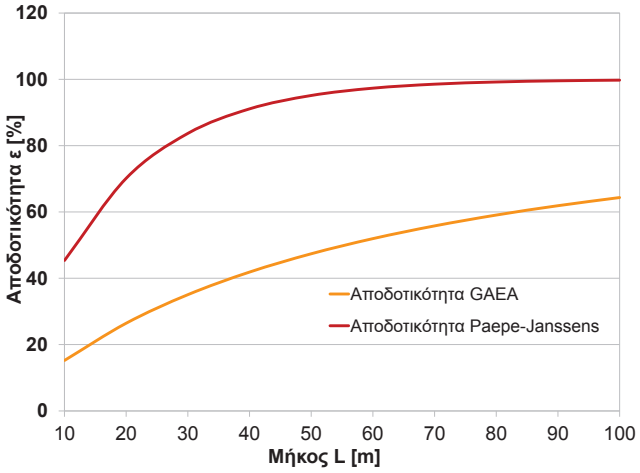
Εικόνα 1: Σύγκριση της μεταβολής της θερμοκρασίας εξόδου από τον αγωγό σε συνάρτηση με το μήκος για χειμώνα (αριστερά) και καλοκαίρι (δεξιά).



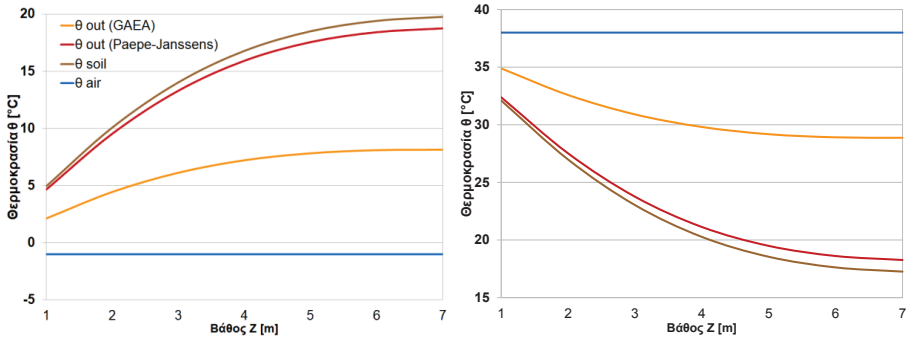
Εικόνα 2: Σύγκριση της μεταβολής της ροής θερμότητας κατά μήκος ενός αγωγού μήκους 100m για τα δύο μοντέλα

Από την εικόνα 2 μπορούμε να διακρίνουμε ότι κατά μήκος ενός αγωγού, στα πρώτα 10m η ροή της θερμότητας σε [W/m^2] είναι αυξημένη λόγω της μεγαλύτερης θερμοκρασιακής διαφοράς, ενώ στα 100m η ροή της θερμότητας ελαττώνεται σημαντικά καθώς ο αέρας μέσα στον αγωγό έχει πλησιάσει αρκετά στη θερμοκρασία του εδάφους. Από την κλίση των καμπύλων φαίνεται ότι το μοντέλο Paepe-Janssens τείνει προς την θερμοκρασία εδάφους πολύ πιο γρήγορα από ότι το μοντέλο GAEA.

Στην εικόνα 3 παρουσιάζεται η μεταβολή της αποδοτικότητας του εναλλάκτη (εξισ. 11) συναρτήσει του μήκους του. Όσο αυξάνεται το μήκος του υπόγειου αγωγού τόσο αυξάνεται και η απόδοση του συστήματος. Ένας μεγαλύτερου μήκους αγωγός παρέχει μεγαλύτερη διαδρομή στον αέρα, όπου η μετάδοση θερμότητας ανάμεσα στον αγωγό και στο έδαφος λαμβάνει χώρα με τον ίδιο συνολικό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας και για μεγαλύτερη χρονική διάρκεια. Και εδώ είναι εμφανής η απόκλιση των δύο μοντέλων, με το μοντέλο Paepe-Janssens να τείνει στο 100% ήδη από μήκη σωλήνων μεγαλύτερα των 45m.



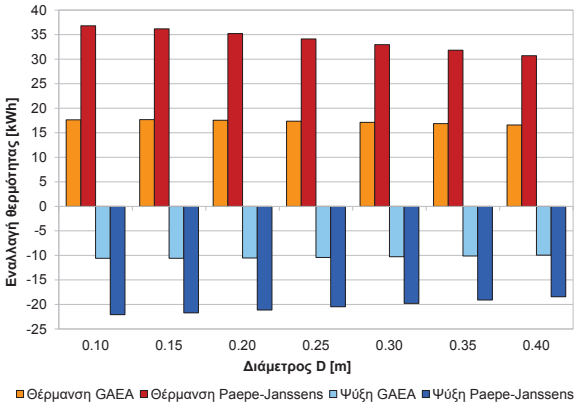
Εικόνα 3: Επίδραση του μήκους στην αποδοτικότητα του εναλλάκτη θερμότητας εδάφους-αέρα



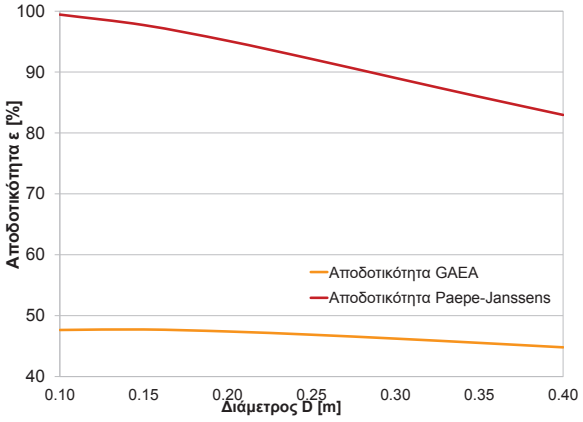
Εικόνα 4: Σύγκριση της μεταβολής της θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από τον αγωγό συναρτήσει του βάθους τοποθέτησης κατά τον χειμώνα (αριστερά) και το καλοκαίρι (δεξιά).

Στην εικόνα 4, η οποία δείχνει την μεταβολή της θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από τον αγωγό (μήκους 50m και διαμέτρου 0.2m) σε συνάρτηση με το βάθος τοποθέτησής του, φαίνεται ότι με την αύξηση του βάθους αυξάνει και η μεταβολή της θερμοκρασίας. Και εδώ, όπως με την περίπτωση της επίδρασης του μήκους, η θερμοκρασία εξόδου του αέρα που υπολογίζεται με το μοντέλο Paepe-Janssens, τείνει σχεδόν να πλησιάζει τη θερμοκρασία του εδάφους. Η μεταβολή της θερμοκρασίας και στα δύο μοντέλα σχεδόν μηδενίζεται για βάθη μεγαλύτερα των 6 m.

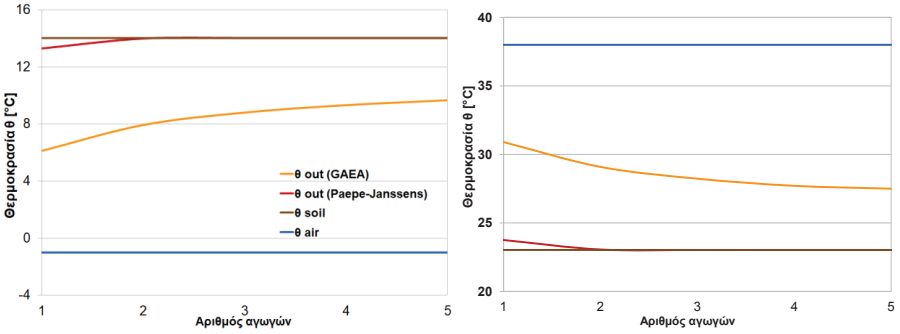
Στην εικόνα 5 παρουσιάζεται η εναλλαγή θερμότητας σε [kWh] μεταξύ αέρα και εδάφους συναρτήσει της διαμέτρου του αγωγού 50m (σε βάθος τοποθέτησης 3m), όπως υπολογίζεται και από τα 2 μοντέλα. Γενικά, η αύξηση της διαμέτρου οδηγεί σε μικρή (ελαφριά) μείωση της εναλλαγής θερμότητας και στις δύο περιπτώσεις. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διάμετρος είναι μέγεθος στο οποίο πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή, καθώς επηρεάζει τόσο την ταχύτητα του αέρα που πρέπει να επιλέγεται σύμφωνα με τις υποδείξεις σχεδιασμού, όσο και τη μεταβολή της ροής του αέρα μέσα στο αγωγό η οποία δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη με ακρίβεια σε ένα απλοποιημένο μοντέλο προσομοίωσης. Αντίστοιχα, στην εικόνα 6 παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής της διαμέτρου του αγωγού 50m στην αποδοτικότητα του εναλλάκτη. Κάθε αύξηση στη διάμετρο του αγωγού οδηγεί σε μείωση της αποδοτικότητας του συστήματος. Αυτό εξηγείται καθώς μεγαλύτερη διάμετρος συνεπάγεται μικρότερο συντελεστή συναγωγής στην εσωτερική επιφάνεια του αγωγού και φυσικά μικρότερο συνολικό συντελεστή μετάδοσης θερμότητας. Επομένως, για καλύτερη απόδοση του συστήματος συνιστάται η χρήση μικρών διαμέτρων.



Εικόνα 5: Επίδραση της μεταβολής διαμέτρου του αγωγού στην εναλλαγή θερμότητας μεταξύ αέρα και εδάφους σε kWh, για τα 2 μοντέλα.



Εικόνα 6: Επίδραση της μεταβολής διαμέτρου του αγωγού στην αποδοτικότητα του εναλλάκτη και για τα 2 μοντέλα.



Εικόνα 7: Σύγκριση της μεταβολής της θερμοκρασίας εξόδου του αγωγού συναρτήσει του αριθμού των αγωγών, τον χειμώνα (αριστερά) και το καλοκαίρι (δεξιά).

Τέλος, στην εικόνα 7 παρουσιάζεται η επίδραση της μεταβολής του αριθμού των αγωγών του εναλλάκτη στην θερμοκρασία εξόδου του αέρα. Περισσότεροι αγωγοί, οι οποίοι όμως μεταφέρουν την ίδια παροχή αέρα, τοποθετημένοι παράλληλα οδηγούν σε μεγαλύτερη θερμοκρασία αέρα στην έξοδο του εναλλάκτη το χειμώνα και αντίστοιχα σε μικρότερη θερμοκρασία αέρα στην έξοδο του εναλλάκτη το καλοκαίρι. Η αλλαγή του αριθμού των αγωγών επιφέρει την ίδια περίπου θερμοκρασιακή διαφορά από περίπου 2.3 °C με έναν αγωγό σε περίπου 4.3°C αυξάνοντας τον αριθμό των αγωγών σε πέντε, τόσο κατά τη χειμερινή όσο και κατά τη θερινή περίοδο.

4. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΤΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ

Για την επαλήθευση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων χρησιμοποιούνται τα πειραματικά αποτελέσματα σε ένα εναλλάκτη αέρα-εδάφους ο οποίος αποτελείται από δύο οριζόντιους σωλήνες συνολικού μήκους 23.42m, κατασκευασμένους από PVC και από χάλυβα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται στις δημοσιευμένες εργασίες [19, 20]. Οι σωλήνες είναι τοποθετημένοι σε βάθος 2.7μέσα στο έδαφος και είναι συνδεδεμένοι στην ίδια είσοδο και έξοδο αέρα. Η θερμοκρασία του αέρα μέσα στους σωλήνες μετράται σε έξι σημεία κατά μήκος τους, τα οποία απέχουν ίσες αποστάσεις μεταξύ τους. Στις ίδιες εργασίες, χρησιμοποιείται και μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής για την προσομοίωση του εναλλάκτη. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ένα τρισδιάστατο μοντέλο μεταβατικής τυρβώδους ροής (μοντέλο k-e) με μεταφορά θερμότητας, το οποίο επιλύθηκε στο υπολογιστικό πακέτο FLUENT.

Πίνακας 1: Σύγκριση θερμοκρασιών εξόδου κατά τη χειμερινή περίοδο μεταξύ μετρήσεων και μοντέλων προσομοίωσης για ταχύτητες αέρα 2 και 5m/sec

Θερμοστοιχείο	Ταχύτητα Αέρα 2m/s				Ταχύτητα Αέρα 5m/s			
	Μέτρηση	Μοντέλο CFD	Μοντέλο Paepe-Janssens	Μοντέλο GAEA	Μέτρηση	Μοντέλο CFD	Μοντέλο Paepe-Janssens	Μοντέλο GAEA
T_{inlet}	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6	20.6
T1	23.6	23.5	22.5	20.9	22.7	22.3	22.2	20.8
T2	24.2	24.1	23.9	21.2	23.3	23.0	23.4	20.9
T3	24.4	24.3	24.9	21.4	23.7	23.3	24.3	21.0
T4	24.7	24.6	25.6	21.6	24.1	23.6	25.0	21.1
T5	25.0	25.0	26.1	21.8	24.4	23.9	25.6	21.2
T6	25.3	25.2	26.5	22.0	24.7	24.3	26.0	21.3
T_{exit}	25.5	25.4	26.5	22.0	25.0	24.7	26.0	21.3

Οι μετρήσεις έγιναν την 12η και 21η Ιανουαρίου για τη θέρμανση και την 12η Μαρτίου και 8η Απριλίου για την περίοδο ψύξης στο Ajmer της Ινδίας(26.45°N 74.64°E). Για τις αντίστοιχες ημερομηνίες έγιναν και οι υπολογισμοί με τα δύο μοντέλα προσομοίωσης, με τα θερμοκρασιακά δεδομένα του Ajmer, ώστε να επαληθευθεί η ακρίβειά τους. Τα δύο μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από τον εναλλάκτη αέρα-εδάφους με τα χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν, και με ταχύτητα αέρα 2 και 5 m/sec, τόσο κατά την θέρμανση όσο και κατά την ψύξη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 1 και 2 ενδεικτικά για τον σωλήνα από χάλυβα, μαζί με τις μετρήσεις και τα αντίστοιχα αποτελέσματα του τρισδιάστατου μοντέλου υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Τα αποτελέσματα για τον σωλήνα από PVC είναι αντίστοιχα, με τον σωλήνα από χάλυβα να παρουσιάζει καλύτερη αποδοτικότητα σε σχέση με τον σωλήνα από PVC.

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 1,τα αποτελέσματα του μοντέλου Paepe-Janssen και για τις δύο ταχύτητες αέρα, παρουσιάζουν απόκλιση της τάξης του 1°Cστην έξοδο σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα. Το σφάλμα δηλαδή είναι της τάξης του 3.8%, ενώ φαίνεται ότι μετά τα 20 μέτρα αγωγού η θερμοκρασία μεταβάλλεται ελάχιστα. Αντίστοιχα το μοντέλο GAEA, παρουσιάζει απόκλιση της τάξης των 3.5°C, δηλαδή σφάλμα της τάξης του 14%. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το αντίστοιχο σφάλμα του σαφώς πιο πολύπλοκου μοντέλου υπολογιστικής ρευστοδυναμικής ανέρχεται σε 1.2%.

Πίνακας 2: Σύγκριση θερμοκρασιών εξόδου κατά τη καλοκαιρινή περίοδο μεταξύ μετρήσεων και μοντέλων προσομοίωσης για ταχύτητες αέρα 2 και 5m/sec

Θερμοστοιχείο	Ταχύτητα Αέρα 2m/s				Ταχύτητα Αέρα 5m/s			
	Μέτρηση	Μοντέλο CFD	Μοντέλο Paepe-Janssens	Μοντέλο GAEA	Μέτρηση	Μοντέλο CFD	Μοντέλο Paepe-Janssens	Μοντέλο GAEA
T_{inlet}	43.7	43.7	43.7	43.7	43.6	43.6	43.6	43.6
T1	36.2	35.0	38.8	42.7	38.8	37.4	39.6	43.1
T2	34.7	33.1	35.2	41.8	37.3	35.2	36.5	42.7
T3	33.6	32.0	32,7	41.0	36.5	34.1	34.1	42.3
T4	32.8	31.1	30.9	40.2	35.5	33.1	32.3	41.9
T5	32.0	30.4	29.6	39.5	34.6	32.1	30.9	41.5
T6	31.4	29.3	28.6	38.9	34.1	31.0	29.9	41.2
T_{exit}	31.0	28.6	28.6	38.9	33.7	30.2	29.9	41.2

Για την περίοδο ψύξης και για χαμηλές ταχύτητες αέρα, οι θερμοκρασίες εξόδου με το μοντέλο Paepe-Janssens παρουσιάζουν απόκλιση της τάξης των 2.5°C σε σχέση με τα πειραματικά αποτελέσματα (σφάλμα 7.7%), ενώ σχεδόν ταυτίζονται με τις θερμοκρασίες από την εφαρμογή του μοντέλου υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Σε μεγαλύτερες ταχύτητες, η απόκλιση είναι της τάξης του 10%.Γενικά και τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν αποδεκτή συμπεριφορά και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της θερμικής συμπεριφοράς εναλλακτών εδάφους αέρα.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, προκύπτει ότι τα μοντέλα δίνουν αποτελέσματα τα οποία δεν αποκλίνουν σημαντικά μεταξύ τους και επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ενεργειακή ανάλυση συστημάτων κλιματισμού-αερισμού. Τα μοντέλα τα οποία εξετάστηκαν, προσομοιώνουν τη λειτουργία εναλλακτών θερμότητας εδάφους-αέρα με αναλυτικές σχέσεις συγκρινόμενα με τα υπόλοιπα τα οποία υπάρχουν στη σχετική βιβλιογραφία. Από την παραμετρική ανάλυση προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

Το μοντέλο των Paepe-Janssens, αν και δεν λαμβάνει υπόψη τη θερμοκρασία του τοιχώματος του αγωγού προς το έδαφος, έχει πολύ καλύτερη θερμική συμπεριφορά, ενώ θεωρητικά το μοντέλο GAEA δείχνει να είναι πιο ακριβές καθώς περιλαμβάνει στις σχέσεις υπολογισμού τη θερμοκρασία αυτή.

Τα μοντέλα είναι επαρκή, αν και παρουσιάζουν ποσοτικές αποκλίσεις μεταξύ τους, όμως σε κάθε περίπτωση είναι κατάλληλα για γρήγορους υπολογισμούς και είναι ποιοτικά αντίστοιχα με αυτά άλλων επιστημονικών εργασιών.

Προφανώς η χρήση μοντέλων δυναμικής προσομοίωσης, τα οποία περιλαμβάνονται σε πακέτα λογισμικού όπως το TRNSYS, Energy Plus κλπ, μπορούν να δώσουν καλύτερα αποτελέσματα, λόγω της ποιο αναλυτικής μελέτης όλων των παραμέτρων σχεδιασμού, αλλά ταυτόχρονα απαιτούν πολύ περισσότερο χρόνο εκμάθησης αλλά και προετοιμασίας της προσομοίωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Ozgener, L., 2011, “A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, pp. 4483–4490.

[2] Peretti, C., Zarrella, A., DeCarli, and M.,Zecchin, R., 2013, “The design and environmental evaluation of earth-to-air heat exchangers (EAHE). A literature review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 28, pp. 107– 116.

[3] Bisoniya, T.S., Kumar, A., and Baredar, P., 2013, “Experimental and analytical studies of earth-air heat exchanger (EAHE) systems in India”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 19, pp. 238–246.

[4] Jacovides, C. P, and Mihalakakou, G., 1995,“An underground pipe system as an energy source for cooling/heating purposes”, Renewable Energy, 6(8), pp.893-900.

[5] Benkert, St., Heidt, F.D., and Scholer, D., 1997, “Calculation tool for earth heat exchangers GAEA”, Proc. of Building Simulation, Fifth International IBPSA Conference, Prague, Vol. 2, pp. 9-16.

[6] De Paepe, M., A. and Janssens, A., 2003, “Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers”, Energy and Buildings, 35, pp. 389–397.

[7] Badescu, V., 2007, “Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house”, Renewable Energy, 32(5), pp. 845–855.

[8] Lee, K.H., and Strand, R.K., 2008, “The cooling and heating potential of an earth tube system in buildings”, Energy and Buildings, 40, pp. 486–494.

[9] Do, S.L., Baltazar, C., and Haberl, J., 2015, “Potential cooling savings from a ground-coupled return-air duct system for residential buildings in a hot and humid climate”, Energy and Buildings, 103, pp. 206–215.

[10] Hollmuller, P., and Lachal, B.,“Buried pipe systems with sensible and latent heat exchange: Validation of numerical simulation against analytical solution and long-term monitoring”,Proc. 9th Conference of International Building Performance Simulation Association, EcolePolytechnique de Montréal, August 15-18, pp. 411–418.

[11] Benhammou, M., and Draoui, B., 2015, “Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 44, pp. 348–355.

[12] Tudor, A., and Badescu, V., 2013, “The influence of several parameters on the performance of earth to air heat exchangers in South-Eastern European climates”, U.P.B. Scientific Bulletin, Series D., Vol. 75, Iss. 3, pp. 85–96.

[13] Mihalakakou, G., Santamouris, M., and Asimakopoulos, D., 1994, “On the cooling potential of earth to air heat exchangers”, Energy Conversion and Management, 35(5), pp.395–402.

[14] Mihalakakou, G., Lewis J. O., and Santamouris, M., 1996, “On the cooling potential of buried pipes techniques - application in Ireland”,Energy and Buildings, 24, pp.19–25.

[15] Ascione, F., Bellia, L., and Minichiello, F., 2011, “Earth-to-air heat exchangers for Italian climates”, Renewable Energy, 36, pp.2177–2188

[16] Bansal, V., Misra, R., Agrawal, G. D., and MathurJ., 2012, “Performance evaluation and economic analysis of integrated earth–air–tunnel heat exchanger–evaporative cooling system” Energy and Buildings 55, pp.102–108.

[17] Stecher, D., and Klingenberg K., 2008, “Design and performance of the Smith House, a passive house”, ASHRAE Transactions, 114(1), pp.209–217.

[18] NiuF., Yu Y., Yu D., and Li H., 2015,“Investigation on soil thermal saturation and recovery of an earth to airheat exchanger under different operation strategies”, Applied Thermal Engineering, 77, pp. 90–100.

[19] Bansal, V., R. Misra, R., Agrawal, G. D., and Mathur, J., 2009, “Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for winter heating,” Energy and Buildings 41, pp. 1151–1154.

[20] Bansal, V., Misra, R., Agrawal, G. D., and Mathur, J., 2010, “Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for summer cooling,” Energy and Buildings, 42, pp. 645–648.

[21] Kusuda, T., Achenbach,P.R., 1965,“Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States”,ASHRAE Transactions, 71(1), pp.61-76.

[22] Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3, 2010 , “Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών,” Υ.Π.Ε.Κ.Α., Τ.Ε.Ε., Αθήνα.

ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ

Μαρία Παπαχρήστου[1*], Νίκος Ανδρίτσος[2], Απόστολος Αρβανίτης[3], Πασχάλης Δαλαμπάκης[4]

[1*] Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124 Θεσσαλονίκη, e-mail: mariap@geo.auth.gr
[2] Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος
[3] Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Αχαρναί, Αττική
[4] Ινστιτούτο Εδαφοϋδατικών Πόρων, ΕΛΓΟ «ΔΗΜΗΤΡΑ», Σίνδος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συστηματική αξιοποίηση των γεωθερμικών πόρων της Ελλάδας για παραγωγή θερμικής ενέργειας και ηλεκτρικής ισχύος ξεκίνησε δυναμικά τη δεκαετία του 1980, ακολουθώντας μια περίοδο εκτεταμένων ερευνών που αρχικά επικεντρώθηκαν σε νησιά του ενεργού ηφαιστειακού τόξου του Νοτίου Αιγαίου, όπως η Μήλος και η Νίσυρος. Στα νησιά αυτά βρέθηκαν γεωθερμικά ρευστά με θερμοκρασίες άνω των 300°C. Δυστυχώς οι πρώτες προσπάθειες για ηλεκτροπαραγωγή έληξαν άδοξα με την οριστική παύση λειτουργίας μετά από λίγα χρόνια της πιλοτικής γεωθερμικής μονάδας 2 MW της Μήλου. Σχεδόν τέσσερις δεκαετίες αργότερα, η Ελλάδα εξακολουθεί να μην χρησιμοποιεί το τεράστιο γεωθερμικό δυναμικό της για ηλεκτροπαραγωγή, ενώ η αξιοποίησή της γεωθερμίας περιορίζεται, στη λουτροθεραπεία, η οποία αποτελεί την παλαιότερη και πλέον διαχρονική μορφή αξιοποίησης της γεωθερμίας στην Ελλάδα, στη θέρμανση θερμοκηπίων, σε υδατοκαλλιέργειες και στη ξήρανση αγροτικών προϊόντων. Η εκμετάλλευση της αβαθούς γεωθερμίας αποτελεί τον μοναδικό κλάδο που πραγματικά παρουσιάζει εντυπωσιακή ανάπτυξη για τα ελληνικά δεδομένα. Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η εξέλιξη των χρήσεων αυτών στη χώρα μας, με έμφαση στις σημαντικές εγκαταστάσεις γεωθερμικών θερμοκηπίων στην Βόρεια Ελλάδα.

Ο ρόλος της γεωθερμίας στην παραγωγή ενέργειας στην Ευρώπη ενισχύεται συνεχώς, κυρίως όσον αφορά τις εφαρμογές θέρμανσης, ενώ ανάκαμψη παρατηρείται και στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από γεωθερμία, κυρίως λόγω της πολύ μεγάλης ανάπτυξης του τομέα αυτού στην Τουρκία. Το 2016 η εγκατεστημένη ισχύς από γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή υπερέβη τα 2,5 GWe, ενώ η αντίστοιχη ισχύς των αμέσων χρήσεων (εξαιρουμένων των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας) ανήλθε στα 10,0GW_{th}. Στην εργασία, εκτός από την εξέλιξη των γεωθερμικών εφαρμογών στην Ελλάδα και την Ευρώπη, παρουσιάζονται οι νέες τάσεις που παρατηρούνται όπως είναι η συμπαραγωγή με τα λεγόμενα Προηγμένα Γεωθερμικά Συστήματα (EGS).

Λέξεις Κλειδιά: *γεωθερμικό δυναμικό, γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή, άμεσες χρήσεις, γεωθερμικές αντλίες θερμότητας*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διείσδυση της γεωθερμικής ενέργειας στο εθνικό ενεργειακό ισοζύγιο παραμένει εξαιρετικά μικρή και σε καμία περίπτωση δεν αντικατοπτρίζει το πολύ σημαντικό δυναμικό της χώρας. Η πρωτογενής ενέργεια που παράγεται γενικά από τις ΑΠΕ στην Ελλάδα έφτασε στο τέλος του 2015 το 31,1% (2641 ktoe) της συνολικής παραγωγής ενέργειας (8473 ktoe), με τη γεωθερμία να κατέχει την τελευταία θέση με ποσοστό μόλις 0,1% [1], χωρίς όμως να συμπεριλαμβάνονται οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας. Όσον αφορά στην ηλεκτρική ενέργεια, η συμμετοχή της γεωθερμίας είναι μηδενική.

Συνεπώς, παρά την ύπαρξη κατάλληλων για ηλεκτροπαραγωγή γεωθερμικών πόρων, η γεωθερμική ενέργεια στην Ελλάδα συνεχίζει να αξιοποιείται πολύ περιορισμένα και μόνο σε άμεσες χρήσεις, κυρίως στον πρωτογενή τομέα και τον ιαματικό τουρισμό. Η συνολική εγκατεστημένη γεωθερμική ισχύς από τις άμεσες χρήσεις ανήλθε σε 93 MW_{th}, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας. Η αβαθής γεωθερμία είναι ο κλάδος με την πιο δυναμική ανάπτυξη στην Ελλάδα, καταγράφοντας διαρκή αύξηση του αριθμού των εγκατεστημένων συστημάτων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας (ΓΑΘ), οι οποίες πλέον ξεπερνούν τις 3200 μονάδες και τα 157 MW_{th}.

Οι πιο σημαντικές επενδύσεις που υλοποιήθηκαν τα τελευταία χρόνια στη γεωθερμία αφορούν στην κατασκευή και λειτουργία μεγάλων θερμοκηπιακών μονάδων σε περιοχές της Βόρειας Ελλάδας (Ν. Ξάνθης & Ν. Καβάλας), οι οποίες χρησιμοποιούν για τη θέρμανσή τους γεωθερμικά ρευστά χαμηλής ενθαλπίας (Τ<90°C). Τα νέα θερμοκήπια καταλαμβάνουν έκταση περίπου 150 στρεμμάτων. Αξιόλογες προοπτικές για την ανάπτυξη της γεωθερμίας διαγράφονται στην Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης, ιδιαίτερα όμως στο Νομό Έβρου, με την υλοποίηση μεγάλου ερευνητικού αλλά και επενδυτικού προγράμματος από το Δήμο Αλεξανδρούπολης.

Στην Ευρώπη, η αξιοποίηση της γεωθερμίας διαφέρει ανάμεσα στις διάφορες χώρες, ανάλογα με το είδος των διαθέσιμων γεωθερμικών πόρων, το θεσμικό πλαίσιο, την πολιτική βούληση, την κοινωνική αποδοχή και τα οικονομικά κίνητρα/οφέλη.

Παραγωγή ηλεκτρική ισχύος από γεωθερμικά ρευστά γίνεται προς το παρόν σε οκτώ (8) χώρες, προβλέπεται όμως ο αριθμός αυτός να υπερδιπλασιαστεί μέχρι το 2020 [2]. Σε 28 χώρες η γεωθερμία αξιοποιείται σε άμεσες χρήσεις, κυρίως για τηλεθέρμανση (4,9 GW_{th},), λουτροθεραπεία (2,24 GW_{th}) και στον αγροτικό τομέα (1,69 GW_{th}). Όπως και στην Ελλάδα, ο πιο ανεπτυγμένος τομέας της γεωθερμικής αγοράς στον Ευρωπαϊκό χώρο είναι αυτός των γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, με τις εγκατεστημένες μονάδες να υπερβαίνουν το 1,7 εκ. και τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ να ανέρχεται τουλάχιστον σε 22,9 GW_{th} [2].

2. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

2.1. Γεωθερμική Ηλεκτροπαραγωγή

Η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος από γεωθερμικά ρευστά στην Ελλάδα παραμένει διαχρονικά προβληματική, κυρίως λόγω της αρνητικής παρακαταθήκης και των κακών επιλογών που έγιναν τη δεκαετία του 1980 στη Μήλο, αλλά και ενός συνδυασμού ανασταλτικών παραγόντων, όπως το μεγάλο κόστος κατασκευής των έργων υποδομής σε συνδυασμό με τη δυσκολία χρηματοδότησης, η έλλειψη πολιτικής βούλησης, η αρνητική στάση των τοπικών κοινωνιών και ένα αρκετά περίπλοκο θεσμικό πλαίσιο.

Μέχρι σήμερα, η γεωθερμική έρευνα έχει αποκαλύψει την παρουσία γεωθερμικών πόρων υψηλής ενθαλπίας στα νησιά Μήλος και Νίσυρος με θερμοκρασίες άνω των 300°C, με το βεβαιωμένο και εκτιμώμενο δυναμικό να ξεπερνά τα 25 MW_e και 250 MW_e, αντιστοίχως. Ισχυρές ενδείξεις για την ύπαρξη γεωθερμικών ταμιευτήρων μέσης ενθαλπίας (Τ=90-150°C) με ρευστά κατάλληλα για ηλεκτροπαραγωγή υπάρχουν σε ιζηματογενείς λεκάνες της Βόρειας Ελλάδας (π.χ. Λεκάνη Δέλτα Έβρου και Δέλτα Νέστου) και σε διάφορα νησιά του Αιγαίου, όπως η Λέσβος, η Σαμοθράκη, η Χίος, η Κίμωλος κλπ.

Τα δικαιώματα εκμετάλλευσης των δύο βεβαιωμένων γεωθερμικών πεδίων υψηλής ενθαλπίας Μήλου και Νισύρου ανήκουν στην «ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε.», η οποία κατέχει επίσης τα δικαιώματα έρευνας/εκμετάλλευσης για ρευστά υψηλής θερμοκρασίας στην Κίμωλο, τη Λέσβο, τα Μέθανα και τον Ακροπόταμο Καβάλας.

Τον Αύγουστο του 2017, ολοκληρώθηκε η πρώτη φάση του διεθνούς διαγωνισμού από τη «ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε» για την υποβολή προτάσεων ενδιαφέροντος προς εξεύρεση στρατηγικού εταίρου για τη δημιουργία σταθμών ηλεκτροπαραγωγής από γεωθερμία στα Μέθανα, τη Λέσβο, τη Νίσυρο και στο νησιωτικό σύμπλεγμα Μήλου-Κιμώλου-Πολυαίγου. Σύμφωνα με τη ΔΕΗ, η ολοκλήρωση του διαγωνισμού και η επιλογή του εταίρου αναμένονται μέσα στους πρώτους μήνες του 2018. Το έργο προβλέπει την κατασκευή μικρών μονάδων ισχύος 5-8 MW_e που θα λειτουργούν σε κλειστό κύκλωμα (ολική επανεισαγωγή των γεωθερμικών ρευστών μετά τη χρήση τους). Τα γεωθερμικά ρευστά, πριν την επανεισαγωγή τους, θα αξιοποιηθούν συνδυαστικά και κατά περίπτωση σε άμεσες εφαρμογές, όπως η αφαλάτωση, ο κλιματισμός κτιρίων, η θέρμανση θερμοκηπίων κλπ.

Με τον Νόμο 4414/2016 που αφορά στο νέο καθεστώς στήριξης των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, εισάγεται η έννοια της «Λειτουργικής Ενίσχυσης», η οποία θα χορηγείται κυρίως με τη μορφή μιας Διαφορικής Προσαύξησης (feed-in-premium) και σε λίγες και πολύ συγκεκριμένες περιπτώσεις με «Σταθερές Εγγυημένες Τιμές (feed-in-tariff)». Η Λειτουργική Προσαύξηση υπολογίζεται στη βάση μιας Τιμής Αναφοράς, η οποία είναι καθορισμένη ως εξής (χωρίς την Επενδυτική Ενίσχυση): (α) 139 €/MWh για γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής εγκατεστημένης ισχύος έως 5 MW_e και (β) 108 €/MWh για μονάδες εγκατεστημένης ισχύος άνω των 5 MW_e. Στον ίδιο Νόμο καθορίζονται και οι ανταγωνιστικές διαδικασίες για τη χορήγηση των ενισχύσεων, ενώ προβλέπονται και μεταβατικές διατάξεις από το παλαιό καθεστώς στο νέο

2.2. Άμεσες Χρήσεις

Οι άμεσες χρήσεις της γεωθερμίας στην Ελλάδα περιλαμβάνουν τη λουτροθεραπεία, τη θέρμανση εδάφους και θερμοκηπίων, τις υδατοκαλλιέργειες και την ξήρανση αγροτικών προϊόντων. Λαμβάνεται υπόψη και η θέρμανση μικρών χώρων (χωρίς ΓΑΘ) που εφαρμόζεται σε ελάχιστες μόνο περιπτώσεις. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς (Νοέμβριος 2017) ανέρχεται σε 93 MW_{th}, παρουσιάζοντας αύξηση 16% την τριετία 2013-2016 [3].

2.2.1. Λουτροθεραπεία

Η λουτροθεραπεία αποτελεί την παλαιότερη και πλέον κοινή χρήση των γεωθερμικών ρευστών στη χώρα μας. Μέχρι σήμερα έχουν καταγραφεί περισσότερες από 750 θερμές πηγές, οι περισσότερες εκ των οποίων θεωρούνται «ιαματικές». Για λουτροθεραπεία και ποσιθεραπεία χρησιμοποιούνται 348 πηγές, όμως μόνο 42 είναι επίσημα αναγνωρισμένες ως «φυσικοί ιαματικοί πόροι» και άλλες 70 βρίσκονται σε διαδικασίες πιστοποίησης.

Στην Ελλάδα λειτουργούν περίπου 70 λουτροπόλεις και κέντρα ιαματικού τουρισμού και 25 εξωτερικές πισίνες που χρησιμοποιούν γεωθερμικά νερά. Η παραδοσιακή περίοδος λειτουργίας τους είναι από τον Ιούνιο μέχρι τον Οκτώβριο, ενώ λίγα παραμένουν ανοικτά καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Τα θερμά ρευστά αξιοποιούνται και ενεργειακά για τη θέρμανση των εγκαταστάσεων μόνο σε ελάχιστες περιπτώσεις. Παρότι δεν υπάρχει συστηματική καταγραφή δεδομένων από τα ιαματικά κέντρα της χώρας, λαμβάνοντας υπόψη συνολική παροχή περίπου 1000kg/s και 10°C ωφέλιμη διαφορά θερμοκρασίας, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς εκτιμάται σε 42 MW_{th} [4].

2.2.2. Θέρμανση Θερμοκηπίων

Η γεωθερμική θέρμανση θερμοκηπίων ξεκίνησε στην Ελλάδα από τις αρχές της δεκαετίας του 1980. Τα πρώτα γεωθερμικά θερμοκήπια κατασκευάστηκαν στη Βόρεια Ελλάδα (Νέα Απολλωνία, Λαγκαδάς, Νιγρίτα, Νέα Κεσσάνη) και στη Λέσβο (Πολιχνίτος). Αρκετά απ' αυτά σήμερα βρίσκονται εκτός λειτουργίας ή χρησιμοποιούν διαφορετικές μεθόδους θέρμανσης, για λόγους όμως που δεν σχετίζονται με τη γεωθερμία, αλλά αφορούν κατά βάση θέματα αδειοδότησης ή ιδιοκτησίας (π.χ. πρώην δημοτικά/κοινοτικά θερμοκήπια). Σήμερα λειτουργούν 20 γεωθερμικές θερμοκηπιακές μονάδες, κυρίως στην ηπειρωτική χώρα.

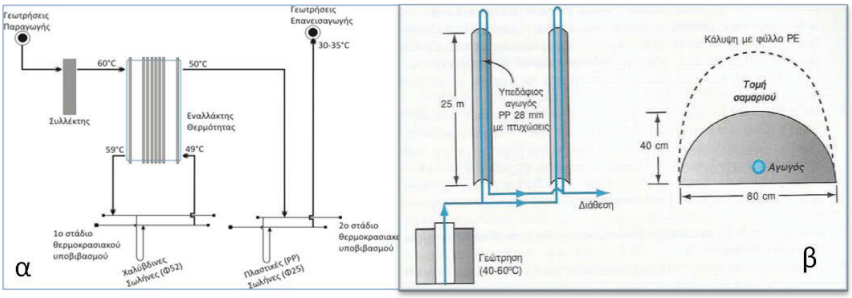
Στα περισσότερα θερμοκήπια καλλιεργούνται λαχανικά (τομάτες, αγγούρια, πιπεριές κλπ) και σε κάποια ανθοκομικά προϊόντα. Για τη θέρμανσή τους χρησιμοποιούνται νερά με θερμοκρασίες 50-90°C. Σε όσες περιπτώσεις το θερμό νερό είναι κατάλληλης ποιότητας, χρησιμοποιείται απευθείας στις εγκαταστάσεις θέρμανσης, ειδάλλως γίνεται χρήση εναλλάκτη θερμότητας.

Τα τελευταία χρόνια, η αξιοποίηση της γεωθερμίας στη θέρμανση θερμοκηπίων παρουσιάζει ιδιαίτερη ανάπτυξη και έφερε σημαντικές επενδύσεις στον πρωτογενή τομέα. Σύγχρονα υδροπονικά θερμοκήπια κατασκευάστηκαν πρόσφατα στη Βόρεια Ελλάδα, συγκεκριμένα στα γεωθερμικά πεδία Νέου Ερασμίου Ξάνθης και Ερατεινού Καβάλας:

Νέο Εράσμιο: Το βεβαιωμένο γεωθερμικό πεδίο χαμηλής ενθαλπίας έχει έκταση 16 km^2 και ο κύριος γεωθερμικός ταμιευτήρας εντοπίζεται σε βάθη 200-500m. Οι μέγιστες θερμοκρασίες που έχουν μετρηθεί στην περιοχή είναι 68°C.

Το 2014 ο όμιλος εταιρειών «Πλαστικά Θράκης» απέκτησε τα δικαιώματα διαχείρισης του πεδίου με μίσθωση διάρκειας 25 ετών. Την ίδια χρονιά κατασκευάστηκαν και τέθηκαν σε λειτουργία τα πρώτα 40 στρέμματα υδροπονικών θερμοκηπίων τομάτας και αγγουριού. Το 2016 έγινε η πρώτη επέκταση που κάλυψε άλλα 40 στρέμματα, το 2017 η μονάδα έφτασε τα 120 στρέμματα, ενώ υπάρχει πρόβλεψη για περαιτέρω επέκταση στα 200 στρέμματα μέχρι το 2020. Η ετήσια παραγωγή το 2016 ανήλθε σε 1800 τόνους τομάτας και 6 εκ. τεμάχια αγγουριού από τη λειτουργία 80 στρ. θερμοκηπίων. Πρόκειται για μία επένδυση που ήδη ξεπέρασε τα 10 εκ. ευρώ και προσφέρει περίπου 120 θέσεις εργασίας.

Τόσο τα θερμοκήπια όσο και οι βοηθητικοί/διοικητικοί χώροι καλύπτουν τις ανάγκες τους σε θέρμανση εξολοκλήρου από τη γεωθερμία, με τη χρήση 200-300 m^3/h γεωθερμικών ρευστών θερμοκρασίας περίπου 60°C, προερχόμενα από 4 γεωτρήσεις βάθους 250m. Δύο νέες γεωτρήσεις στο ίδιο βάθος ανορύχθηκαν πρόσφατα στην περιοχή και πρόκειται να τεθούν άμεσα σε λειτουργία. Η διαδικασία θέρμανσης βασίζεται στον σταδιακό υποβιβασμό της αρχικής θερμοκρασίας των ρευστών κατά 23-24°C. Αρχικά τα γεωθερμικά ρευστά διέρχονται μέσα από πλακοειδείς εναλλάκτες θερμότητας (πρωτεύον κύκλωμα) (Σχήμα 1α), όπου η θερμοκρασία μειώνεται κατά 10°C. Σε ένα δεύτερο στάδιο, το ρευστό κυκλοφορεί μέσα σε πλαστικούς αγωγούς περιμετρικά των γραμμών φύτευσης και τελικά απορρίπτεται με μέση θερμοκρασία 27-30°C στις γεωτρήσεις επανεισαγωγής. Το δευτερεύον κύκλωμα (κλειστός βρόχος) των εναλλακτών θερμότητας αποτελείται από δίκτυα μεταλλικών σωλήνων, οι οποίοι διατρέχουν τους διαδρόμους μεταξύ των γραμμών φύτευσης [5]. Μικρό μέρος των ρευστών χρησιμοποιείται στην υπεδαφέδια θέρμανση των χώρων διοίκησης (1.000 m^2 περίπου).



Σχήμα 1. (α) Διάταξη θέρμανσης στα γεωθερμικά θερμοκήπια του Ν. Ερασμίου, (β) Υπεδάφια θέρμανση στις φυτείες σπαραγγιών του Ν. Ερασμίου

Ερατεινό Χρυσούπολης: Το βεβαιωμένο γεωθερμικό πεδίο στην περιοχή αυτή έχει έκταση 14 km^2 και γεωθερμικά ρευστά με θερμοκρασίες 65-78°C που βρίσκονται σε βάθος περίπου 650m [6]. Τα δικαιώματα διαχείρισης του πεδίου έχουν εκμισθωθεί στον Δήμο Νέστου , ο οποίος ολοκλήρωσε το 2016 μεγάλο πρόγραμμα αξιοποίησης της γεωθερμίας που περιελάμβανε τη διάνοιξη δύο παραγωγικών γεωθερμικών γεωτρήσεων και μίας επανεισαγωγής μεγάλου βάθους (750m), καθώς και την κατασκευή δικτύων διανομής του θερμού νερού συνολικού μήκους 18 km. Η παραγόμενη θερμική ισχύς από τις δύο γεωτρήσεις μπορεί να φτάσει τα 10 MW$_{th}$ και θα διανέμεται μέσω δύο θερμικών σταθμών που είναι εγκατεστημένοι ο καθένας δίπλα σε παραγωγική γεώτρηση. Η συνολική επένδυση του Δήμου Νέστου για το έργο αυτό ήταν 10,5 εκ. ευρώ.

Τον Μάιο του 2017 εγκαινιάστηκε στο Ερατεινό Χρυσούπολης Καβάλας, γεωθερμική θερμοκηπιακή μονάδα 35 στρεμμάτων για την παραγωγή έρριζων μοσχευμάτων καλλωπιστικών ανθοκομικών φυταρίων. Τα θερμοκήπια ανήκουν στην εταιρεία «Selecta Hellas», η οποία συνεργάζεται για την παροχή της γεωθερμικής ενέργειας με το Δήμο Νέστου. Η επένδυση που υλοποιήθηκε μέχρι στιγμής από τη «Selecta Hellas» ανέρχεται σε 7 εκ. ευρώ, ενώ σε δεύτερη φάση θα κατασκευαστούν άλλα 25 στρέμματα θερμοκηπίων, με τη συνολική επένδυση να φτάνει τα 10 εκ. ευρώ. Σε πλήρη λειτουργία, η ετήσια παραγωγή αναμένεται να φτάσει τα 65 εκατ. μοσχεύματα και να παρέχει περίπου 150 θέσεις εργασίας. Το παραγόμενο προϊόν θα είναι σχεδόν 100% εξαγώγιμο.

Το σημερινό θερμοκηπιακό συγκρότημα αποτελείται, πέραν των βοηθητικών χώρων, από 16 επιμέρους τμήματα (θερμοκήπια). Κάθε ένα απ' αυτά αποτελεί ένα πλήρως ελεγχόμενο περιβάλλον με

αυτόνομο σύστημα θέρμανσης και δυνατότητα ελέγχου της θερμοκρασίας του υποστρώματος των γλαστρικών φυτών. Τα 10 θερμοκήπια έχουν σύστημα άρδευσης πλήρωσης-απορροής και τα υπόλοιπα 6 πάγκους καλλιέργειας. Υπάρχουν συστήματα απολύμανσης και ελέγχου αγωγιμότητας του νερού, με όλες τις λειτουργίες να ελέγχονται από ειδικά λογισμικά.

2.2.3. Θέρμανση εδάφους

Η χρήση ρευστών χαμηλής θερμοκρασίας (έως 60°C) για θέρμανση εδάφους σε ανοικτές καλλιέργειες εφαρμόστηκε για πρώτη φορά στον κόσμο το 1998 στο Νέο Εράσμιο Ξάνθης, σε φυτείες λευκού και πράσινου σπαραγγιού και περιστασιακά για την καλλιέργεια άλλων κηπευτικών και φρούτων (π.χ. μαρούλι, φράουλα κλπ). Η ύπαρξη της γεωθερμίας οδήγησε στην παροχή φθηνής θερμικής ενέργειας συνεχούς ροής και την επίτευξη μεγιστοποίησης της παραγωγικότητας 30-40 ημέρες νωρίτερα από τις μη θερμαινόμενες συμβατικές φυτείες, δηλαδή σε μια περίοδο με αυξημένη ζήτηση και υψηλές τιμές πώλησης [5].

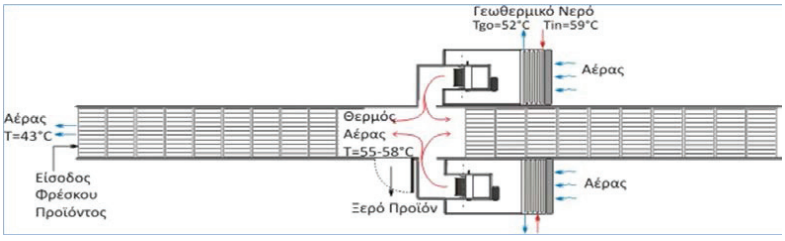
Η μέθοδος θέρμανσης που εφαρμόζεται είναι απλή και βασίζεται στην κυκλοφορία γεωθερμικών ρευστών θερμοκρασίας 30-60°C μέσα σε πλαστικούς σωλήνες που βρίσκονται τοποθετημένοι στο υπέδαφος, σε κατάλληλο βάθος και διάταξη κάτω από τα φυτά (Σχήμα 1β). Το νερό εξέρχεται από το σύστημα με θερμοκρασία 28-30°C, ενώ τα απαιτούμενα θερμικά φορτία κυμαίνονται μεταξύ 100 και 150KW/ha, ανάλογα με την εξωτερική θερμοκρασία και την περίοδο έναρξης της διαδικασίας θέρμανσης. Οι φυτείες σπαραγγιών στο Νέο Εράσμιο καλύπτουν πλέον μόνο 20 στρέμματα, παρουσιάζοντας σημαντική μείωση σε σχέση με την αρχική έκταση (107 στρ). Οι λόγοι που οδήγησαν στην μείωση αυτή δεν σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα της γεωθερμικής ενέργειας αλλά με την υπέρβαση της διάρκεια ζωής των φυτών.

Από το 2005, η ίδια μέθοδος πρωίμισης σπαραγγιού εφαρμόζεται επίσης σε 30 στρέμματα φυτειών στο Μυρωδάτο της Ξάνθης, χρησιμοποιώντας ρευστά θερμοκρασίας 52°C. Θέρμανση εδάφους σε ανοικτές καλλιέργειες λευκού σπαραγγιού γίνεται από το 2006 και στην Χρυσούπολη Καβάλας, με τη χρήση μονοβάθμιων και διβάθμιων γεωθερμικών αντλιών θερμότητας.

2.2.4. Ξήρανση Αγροτικών Προϊόντων

Ένα ακόμη πρωτοποριακό έργο αξιοποίησης της γεωθερμίας χαμηλής ενθαλπίας υλοποιείται από το 2001 στο Νέο Εράσμιο Ξάνθης και αφορά στην ξήρανση/αφυδάτωση αγροτικών προϊόντων με έμφαση στην τομάτα. Το γεωθερμικό ξηραντήριο λειτουργεί κατά τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο και χρησιμοποιεί γεωθερμικά ρευστά θερμοκρασίας 59°C και παροχής 25m^3/h.

Τα γεωθερμικά ρευστά διέρχονται μέσα από διάταξη εναλλακτών θερμότητας νερού-αέρα και στη συνέχεια ο θερμός αέρας (55-58°C) εισάγεται βεβιασμένα, σε συνεχή ροή, μέσα στις σήραγγες ξήρανσης (Σχήμα 2). Η μέση διάρκεια ξήρανσης είναι 33 ώρες και η δυναμικότητα της μονάδας ανέρχεται σε 650 κιλά ξηρού προϊόντος ημερησίως. Η ετήσια παραγωγή κυμαίνεται από 13 έως 20 τόνους εξαιρετικής ποιότητας αφυδατωμένης τομάτας. Στην ίδια μονάδα αφυδατώνονται επίσης ελιές, κεράσια, μήλα σε ροδέλες, πιπεριές, μελιτζάνες κλπ, και πρόσφατα αποξηραμένο τριφύλλι Alfalfa σε σκόνη, που θεωρείται σπουδαία υπερτροφή.



Σχήμα 2: Διάταξη γεωθερμικού ξηραντηρίου στο Νέο Εράσμιο Ξάνθης

2.2.5. Υδατοκαλλιέργειες

Η καλλιέργεια σπιρουλίνας με τη βοήθεια της γεωθερμίας ξεκίνησε τη δεκαετία του 1990 και συνεχίζεται μέχρι σήμερα στη Νιγρίτα Σερρών. Στην περιοχή δραστηριοποιούνται δύο εταιρείες και λειτουργούν τρεις (3) μονάδες με συνολική έκταση δεξαμενών που ανέρχεται σε 900m^2. Στις μονάδες χρησιμοποιούνται, μέσω εναλλάκτη, τα πλούσια σε CO_2 γεωθερμικά ρευστά της περιοχής με θερμοκρασία 47-50°C. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ανέρχεται σε 1,26 MW_{th}.

2.3. Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας

Η αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας (T<25°C) μέσω των Γεωθερμικών Αντλιών Θερμότητας (ΓΑΘ) ξεκίνησε ουσιαστικά στην Ελλάδα από στις αρχές της δεκαετίας του 2000, μέσα από μια σειρά ευρωπαϊκών και εθνικών πιλοτικών προγραμμάτων με υπεύθυνο κυρίως το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών & Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ). Από τα μέσα της δεκαετίας, είχαν πλέον δημιουργηθεί ώριμες συνθήκες και το κατάλληλο νομοθετικό πλαίσιο που έδωσαν εντυπωσιακή ώθηση στην αγορά των ΓΑΘ, η οποία συνεχίζεται μέχρι σήμερα, παρά την οικονομική κρίση, με ανάπτυξη 10%-15% ετησίως.

Σύμφωνα με το ΚΑΠΕ, οι εγκατεστημένες ΓΑΘ ξεπέρασαν τις 2600 μονάδες στο τέλος του 2014, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 135 MWth. Συγκεκριμένα, υπήρχαν καταγεγραμμένες 2449 μικρές μονάδες με μέση ισχύ 29 KW και 183 μέσης ισχύος 350 KW. Ο μέσος ρυθμό αύξησης την τελευταία πενταετία ήταν 15% ετησίως για τις χαμηλής ισχύος μονάδες και 5-10% για τις μεγαλύτερες μονάδες. Κάνοντας μια πολύ συντηρητική εκτίμηση για το περασμένο έτος με αύξηση γύρω στο 5%, λόγω γενικότερης πτώσης του ρυθμού ανάπτυξης της αγοράς των ΓΑΘ στη νότια Ευρώπη, ο αριθμός των εγκατεστημένων ΓΑΘ θα πρέπει να υπερβαίνει τις 3200 μονάδες στο τέλος του 2016, με τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ να ξεπερνά τα 157 MW_{th}.

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, οι ΓΑΘ χρησιμοποιούνται για τον κλιματισμό (θέρμανση και δροσισμό) κατοικιών και γραφείων, όμως έχει ήδη ξεκινήσει η εφαρμογή τους και στον ξενοδοχειακό τομέα. Σε αρκετές εγκαταστάσεις χρησιμοποιείται ως πηγή θέρμανσης το θαλασσινό νερό ή οι ρηχοί παράκτιοι υδροφορείς (συστήματα ανοικτού βρόχου). Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας επιλέγονται πλέον ως μέθοδος θέρμανσης και από μεγάλες εταιρείες super market, καθώς και για θέρμανση κολυμβητηρίων, πανεπιστημιακών χώρων (αίθουσες, εστιατόρια κλπ), αποπάγωση πεζοδρομίων και σε κάποιες αγροτικές εφαρμογές, όπως για την πρωίμιση λευκού σπαραγγιού (200 στρέμματα στη Χρυσούπολη), σε πέντε θερμοκήπια, ένα οινοποιείο και ένα πτηνοτροφείο.

2.4. Υπό εξέλιξη έργα

Τα πιο σημαντικά υπό εξέλιξη έργα γεωθερμίας στην Ελλάδα αφορούν στην εκμετάλλευση γεωθερμικών πόρων στη Βόρεια Ελλάδα. Συγκεκριμένα, πρόκειται για τα υπό κατασκευή θερμοκήπια στο γεωθερμικό πεδίο Νέας Κεσσάνης και το πρόγραμμα αξιοποίησης της γεωθερμίας στο Νομό Έβρου. Αναλυτικότερα:

Νέα Κεσσάνη: Το βεβαιωμένο γεωθερμικό πεδίο της Νέας Κεσσάνης εκτείνεται δυτικά της λίμνης Βιστωνίδας και καλύπτει συνολικά 25 km^2. Η μέγιστη θερμοκρασία των ρευστών είναι 82°C, ενώ ο γεωθερμικός ταμιευτήρας εντοπίστηκε σε βάθη 160-500m [6].

Δικαιώματα διαχείρισης του νότιου τμήματος του βεβαιωμένου γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας Νέας Κεσσάνης Ξάνθης παραχωρήθηκαν τον Απρίλιο του 2016 στην εταιρεία «Agritex Ενεργειακή», η οποία θα κατασκευάσει στη θέση *Ποταμιά* Αβδήρων μονάδα υδροπονικών θερμοκηπίων τομάτας έκτασης 50 στρεμμάτων. Σύμφωνα με το στρατηγικό πλάνο της εταιρείας, η μονάδα σε πλήρη ανάπτυξη θα φτάσει τα 100 στρέμματα, προσφέροντας 50 μόνιμες και 100 εποχικές θέσεις εργασίας. Το ύψος της επένδυσης αναμένεται να είναι περίπου 7 εκ. ευρώ. Οι ανάγκες του θερμοκηπίου σε θέρμανση υπολογίζονται σε 37.300 MWh/έτος και σχεδόν εξολοκλήρου (96%) θα καλύπτονται από τη γεωθερμία. Η θερμική ισχύς της μονάδας που θα κατασκευαστεί θα είναι 12MW_{th}

Αρίστηνο (Αλεξανδρούπολη): Το βεβαιωμένο γεωθερμικό πεδίο Αρίστηνου εκτείνεται 1km βόρεια του ομώνυμου οικισμού, 14km ανατολικά της Αλεξανδρούπολης. Έχει έκταση 20 km^2 και ο κύριος γεωθερμικός ταμιευτήρας με θερμοκρασία ρευστών της τάξης των 90°C και άνω εντοπίστηκε σε βάθος 400-450m.

Τα δικαιώματα διαχείρισης του πεδίου έχουν μισθωθεί από το 2013 στο Δήμο Αλεξανδρούπολης, ο οποίος υλοποιεί αυτήν την περίοδο σημαντικό πρόγραμμα γεωθερμικών υποδομών (γεωτρήσεις, δίκτυα διανομής, θερμικοί σταθμοί) προϋπολογισμού 6,3 εκ. ευρώ. Το επενδυτικό σχέδιο του Δήμου περιλαμβάνει την αξιοποίηση των γεωθερμικών ρευστών από υπάρχουσες και νέες γεωτρήσεις για τη θέρμανση 20 δημόσιων κτιρίων, συνολικής καλυμμένης επιφάνειας 8700m^2, και 40 στρεμμάτων θερμοκηπίων μέσω δικτύων διανομής μήκους 18,5km. Το καλοκαίρι του 2016, ο Δήμος Αλεξανδρούπολης ολοκλήρωσε την κατασκευή μιας νέας βαθιάς παραγωγικής γεωθερμικής γεώτρησης σε βάθος 410m. Η θερμοκρασία των ρευστών κατά τις προαντλητικές δοκιμές ανήλθε στους 97°C. Η γεώτρηση αυτή βρίσκεται σε φάση μακροχρόνιων δοκιμαστικών αντλήσεων. Προβλέπεται επίσης η διάνοιξη δύο γεωτρήσεων επανεισαγωγής για την επανέγχυση των γεωθερμικών ρευστών μετά τη χρήση τους. Τον Απρίλιο του 2017, το Υπουργείο Περιβάλλοντος και

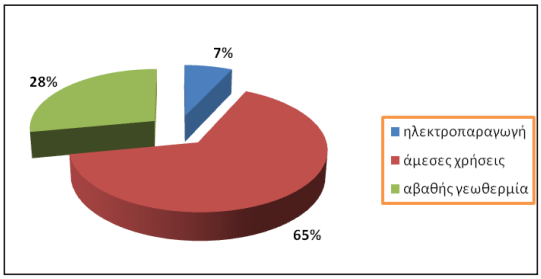
Ενέργειας παραχώρησε στο Δήμο Αλεξανδρούπολης άδεια διανομής θερμικής ενέργειας ισχύος 9,8 MW_{th}.

Μέσα στους στόχους του Δήμου είναι επίσης η δημιουργία μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση γεωθερμίας. Στην προσπάθεια για την έρευνα των γεωθερμικών πόρων υψηλών θερμοκρασιών έχουν εκδηλώσει ενδιαφέρον να συμμετέχουν το ΚΑΠΕ και η εταιρεία «ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε.». Ο σχεδιασμός για την Αλεξανδρούπολη περιλαμβάνει την εγκατάσταση μιας μικρής μονάδας ισχύος 2-3 MW_e, που θα είναι ικανή να μηδενίσει το ενεργειακό κόστος όλων των κτιρίων του Δήμου και του ηλεκτροφωτισμού.

3. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ

Η γεωθερμική ενέργεια φαίνεται ότι έχει πλέον αποκτήσει μια σταθερή θέση στην ενεργειακή αγορά της Ευρώπης, κυρίως όσον αφορά στις θερμικές εφαρμογές. Αντίθετα, γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή πραγματοποιείται σε λίγες χώρες, ενώ μόνο σε τρεις (3) περιπτώσεις (Ισλανδία, Ιταλία και Τουρκία) η γεωθερμία καταφέρνει να υπερβεί το όριο του 1% συμμετοχής στο εθνικό ισοζύγιο ηλεκτρικής ενέργειας. Στον τομέα της θέρμανσης/δροσισμού, λαμβάνοντας υπόψη και την αβαθή γεωθερμία, η κατάσταση είναι καλύτερη και υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να επιτευχθεί ο στόχος των 48 GW_{th} εγκατεστημένης ισχύος μέχρι το 2020 που τέθηκε με τη Διακήρυξη της Ferrara [2].

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται το ποσοστό των τριών κατηγοριών αξιοποίησης της γεωθερμικής ενέργειας επί της συνολικής εγκατεστημένης γεωθερμικής ισχύος στην Ευρώπη (**35,5 GW**), σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα δημοσιευμένα στοιχεία [2], [7].



Σχήμα 3: Κατανομή των τριών κύριων τομέων αξιοποίησης της γεωθερμίας ως ποσοστό επί της συνολικής εγκατεστημένης γεωθερμικής ισχύος στην Ευρώπη

Με βάση μια συντηρητική προσέγγιση, εκτιμάται ότι το 2015 οι επενδύσεις στη γεωθερμία ξεπέρασαν στην Ευρώπη τα 5 δις ευρώ. Οι μεγαλύτερες επενδύσεις έγιναν στη Σουηδία (3 δις ευρώ), ενώ οι περισσότερες θέσεις εργασίες στον τομέα της γεωθερμίας καταγράφονται στη Γερμανία και ανέρχονται περίπου σε 17.000 [8].

3.1. Γεωθερμική Ηλεκτροπαραγωγή

Στο τέλος του 2016 υπήρχαν περισσότερες από 100 γεωθερμικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής στην Ευρώπη, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ **2,5 GWe**, εκ των οποίων το 1GWe σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης [7]. Η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανήλθε σε 15 TWh (2016), ενώ ο μέσος συντελεστής φορτίου υπερβαίνει το 75 (%) [2, 7]. Όλες οι καινούριες μονάδες λειτουργούν με την τεχνολογία του οργανικού δυαδικού κύκλου (OCR).

Το ποσοστό διείσδυσης της γεωθερμίας στο εθνικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι αρκετά αυξημένο στην Ισλανδία, αγγίζοντας το 27%. Ακολουθεί η Τουρκία με το αντίστοιχο ποσοστό στο 2,5%, η Ιταλία με 2,1% και στη συνέχεια η Πορτογαλία, η Γαλλία, η Αυστρία και η Γερμανία με ποσοστά από 0,4 έως 0,02%.

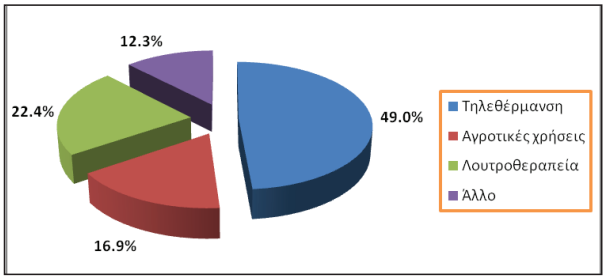
Στην Ιταλία, όπου υπάρχει και η μεγαλύτερη παράδοση στη γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή, η εγκατεστημένη ισχύς των γεωθερμικών ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων φτάνει τα 926 MWe και είναι περίπου σταθερή τα τελευταία χρόνια. Στην Ισλανδία υπήρξε σχεδόν τριπλασιασμός μεταξύ του 2005 και 2012 και έκτοτε σταθεροποίηση στα 660 MWe.

Αξίζει να αναφερθεί η ιδιαίτερα εντυπωσιακή ανάπτυξη της γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγής στην Τουρκία, όπου η εγκατεστημένη ισχύς έφτασε το 2016 τα 854 MWe [7] από 17,5 MWe που ήταν το 2002 [9] με 34 καινούριες μονάδες (739 MWe) να εγκαθίστανται την τελευταία πενταετία. Η θεαματική αυτή αύξηση καθιστά την Τουρκία ηγέτιδα χώρα στη γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή, κυρίως εφόσον επιτευχθεί ο στόχος του 1 GWe μέχρι το 2020, κάτι που θεωρείται σχεδόν βέβαιο.

Με 26 έργα να βρίσκονται σε φάση υλοποίησης και άλλα 160 υπό διερεύνηση, προβλέπεται ότι το 2020 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς από τη γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή θα ξεπεράσει τα 3 GW_e [7].

3.2. Άμεσες χρήσεις

Αξιοποίηση της γεωθερμίας σε άμεσες χρήσεις έχει αναφερθεί από 28 Ευρωπαϊκές χώρες [2], κυρίως για τηλεθέρμανση, αγροτικές εφαρμογές και λουτροθεραπεία, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ περίπου **10GW_{th}**. Στο Σχήμα 3 παρουσιάζονται τα ποσοστά συμμετοχής κάθε υπο-κατηγορίας άμεσων εφαρμογών επί της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος.



Σχήμα 4: Ποσοστά επί της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος των άμεσων εφαρμογών της γεωθερμίας στην Ευρώπη ([2], [7]

Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα καταγεγραμμένα στοιχεία [2], [7], η γεωθερμία χρησιμοποιείται για *τηλεθέρμανση* (district heating) σε 22 χώρες, με την Ισλανδία και την Τουρκία να έχουν τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη θερμική ισχύ, με 2.196 MW_{th} και 872 MW_{th}, αντιστοίχως. Στην Ευρώπη υπάρχουν συνολικά 280 μονάδες τηλεθέρμανσης, 51 εκ των οποίων είναι καινούριες και τέθηκαν σε λειτουργία το διάστημα 2012-2016, όλες σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ορισμένα συστήματα τηλεθέρμανσης βασίζονται 100% στη γεωθερμία, ενώ αρκετά είναι υβριδικά, σε συνδυασμό με βιομάζα, ηλιακή ενέργεια και συμβατικά καύσιμα. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς από τηλεθέρμανση είναι περίπου 4,9 GW_{th}, παρουσιάζοντας αύξηση 10% σε σχέση με το 2012 [7]. Οι κύριες αγορές για τα επόμενα χρόνια αναμένεται να είναι η Γαλλία, η Ολλανδία, η Γερμανία και η Ουγγαρία. Με βάση τα 200 περίπου έργα που βρίσκονται σε φάση κατασκευής ή μελέτης η συνολική εγκατεστημένη ισχύς από συστήματα τηλεθέρμανσης αναμένεται να υπερβεί τα 6,5 GW_{th} μέχρι το τέλος του 2020.

Η χρήση της γεωθερμίας στον *αγροτικό τομέα* είναι επίσης αρκετά διαδεδομένη στην Ευρώπη, με την Τουρκία και πάλι να κατέχει την πρώτη θέση με 804 MW_{th} εγκατεστημένης ισχύος. Ακολουθεί η Ουγγαρία, η οποία έχει μεγάλη παράδοση στον τομέα αυτό, με 325 MW_{th} και η Ιταλία με 221 MW_{th}.

Όσον αφορά στη *λουτροθεραπεία*, παρόλο που ακριβείς υπολογισμοί είναι πολύ δύσκολο να γίνουν λόγω απουσίας συστηματικών καταγραφών, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς εκτιμάται σε 2,2 GW_{th}, με την Τουρκία, την Ιταλία και την Ουγγαρία να εμφανίζουν τη μεγαλύτερη ανάπτυξη στον τομέα αυτό.

3.3. Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας

Με βάση των αριθμό των εγκατεστημένων μονάδων (>1,7 εκ.), την εγκατεστημένη ισχύ (**22,9 GW_{th}**) και την παραγόμενη ενέργεια (49.366 GWh_{th}/έτος), η εκμετάλλευση της αβαθούς γεωθερμίας με ΓΑΘ αποτελεί αδιαμφισβήτητα τον πλέον ανεπτυγμένο τομέα της ευρωπαϊκής γεωθερμικής αγοράς. Γενικά πάντως, ο ρυθμός ανάπτυξης της αγοράς των ΓΑΘ έχει μειωθεί τα τελευταία χρόνια, κυρίως εξαιτίας της συρρίκνωσης της αγοράς στις χώρες του νότου, οι οποίες μαστίζονται από την οικονομική κρίση.

Σχεδόν σε όλες τις χώρες τις Ευρώπης λειτουργούν μονάδες γεωθερμικών αντλιών θερμότητας, με τις περισσότερες να βρίσκονται στη Σουηδία (540.000), η οποία έχει πληθυσμό συγκρίσιμο με αυτόν της Ελλάδας. Ακολουθούν η Γερμανία (325.000) και η Γαλλία (200.000), που έχουν όμως πολύ μεγαλύτερο πληθυσμό.

Η μεγαλύτερη αύξηση στον αριθμό των εγκατεστημένων ΓΑΘ καταγράφεται στη Φινλανδία, όπου περισσότερες από τις μισές εκ των 130.000 μονάδων που υπάρχουν σήμερα εγκαταστάθηκαν την τριετία 2013-2016 [7]. Σημειώνεται ότι στη Φινλανδία πάνω από το 50% των νέων μικρών κατοικιών χρησιμοποιούν τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας ως μέθοδο θέρμανσης και δροσισμού [10].

4. Προηγμένα Γεωθερμικά Συστήματα

Τα Προηγμένα (ή Βελτιωμένα) Γεωθερμικά Συστήματα (Enhanced or Engineered Geothermal Systems, EGS) στοχεύουν στη χρήση της θερμότητας της γης σε περιοχές όπου δεν υπάρχει διαθέσιμος γεωθερμικός ατμός ή νερό, ή οι ποσότητές τους είναι ανεπαρκείς και, επίσης, η διαπερατότητα των πετρωμάτων είναι σχετικά μικρή. Η τεχνολογία EGS επικεντρώνεται ουσιαστικά στη δημιουργία μεγάλων επιφανειών εναλλαγής θερμότητας σε θερμά πετρώματα. Η διαδικασία περιλαμβάνει την ενίσχυση της διαπερατότητας με το άνοιγμα των προϋπαρχόντων ρηγμάτων ή/και τη δημιουργία νέων ρωγματώσεων με μηχανικό ή/και χημικό τρόπο. Η θερμότητα ανακτάται διοχετεύοντας, μέσω κατάλληλων γεωτρήσεων, νερό (φρέσκο ή/και επανεισαγωγής) από την επιφάνεια στο εσωτερικό των θερμών πετρωμάτων και στη συνέχεια άντλησή του με άλλη ή άλλες γεωτρήσεις.

Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (International Energy Agency) θεωρεί ότι είναι εφικτή η αύξηση της παραγωγής γεωθερμικής ηλεκτρικής ισχύος από τα σημερινά επίπεδα των 10 GW_e παγκοσμίως, στα 140-160 GW_e μέχρι το 2050 [11] Σημαντικό μέρος αυτής της αύξησης αναμένεται να καλυφθεί από τα EGS. Τρεις σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής EGS βρίσκονται σε λειτουργία σήμερα στην Ευρώπη (Inshein και Landau στη Γερμανία, Soultz-sous-Forêts στη Γαλλία) και μία θερμική μονάδα (Rittershoffen, Γαλλία), με άλλες δέκα μονάδες υπό ανάπτυξη. Σε παγκόσμια κλίμακα, η περισσότερο ίσως μελετημένη περιοχή και μονάδα EGS είναι η πιλοτική μονάδα στο Soultz-sous-Forêts της Γαλλίας, η οποία από τον Ιούνιο 2016 παράγει θερμότητα και ηλεκτρική ισχύ.

4.1. Μονάδα EGS στο Soultz-sous-Forêts

Ύστερα από 30 χρόνια επιστημονικών ερευνών στην πιλοτική μονάδα EGS στο Soultz-sous-Forêts της Γαλλίας και ύστερα από σημαντικές τροποποιήσεις, ξεκίνησε τον Ιούνιο του 2016 η λειτουργία της νέας μονάδας (Σχήμα 5) με χρηματοδότηση της ΕΕ, του γαλλικού και του γερμανικού δημοσίου και του ιδιωτικού τομέα.



Θερμοκρασία γεωθερμικού νερού:	160 °C
Αλατότητα νερού	~ 100 g/L τύπου Na-Cl-Ca
pH	4,8-5,0
Παροχή	35 L / s
Θερμική ισχύς	11,4 MWth
Ηλεκτρική ισχύς (ORC)	1,7 MWe

Σχήμα 5: Άποψη και χαρακτηριστικά της νέας μονάδας γεωθερμικής συμπαραγωγής στο Soultz-sous-Forêts. Στο βάθος διακρίνεται το σύστημα ORC και δεξιά οι αερόψυκτοι συμπυκνωτές.

Η θερμότητα εξάγεται από γρανιτικά πετρώματα που βρίσκονται σε βάθος περίπου 5km στην κοιλάδα του Ρήνου, με τη βοήθεια τεσσάρων γεωτρήσεων και αφού είχε προηγηθεί η δημιουργία μίας ζώνης ρωγματώσεων με υδραυλικό και χημικό τρόπο. Η χημική ενεργοποίηση του γρανιτικού ταμιευτήρα επιτεύχθηκε κυρίως με τη διοχέτευση υδροχλωρικού οξέος, με στόχο τη διαλυτοποίηση ανθρακικών αλάτων (ασβεστίτη και δολομίτη) που είχαν μερικώς γεμίσει τις φυσικές ρωγμές των πετρωμάτων [12]. Δύο από τις τρεις βαθιές γεωτρήσεις (η παραγωγική γεώτρηση GPK2 και η γεώτρηση επανεισαγωγής GPK4) παρουσίασαν σημαντική αύξηση της εισπιεστότητας και της παραγωγικότητας, ενώ ελάχιστη διαφορά παρατηρήθηκε στην τρίτη γεώτρηση (η γεώτρηση επανεισαγωγής GPK3).

Από τον Ιούνιο του 2016 και για αρκετούς μήνες αργότερα η ηλεκτρική αγωγιμότητα, το pH και η πυκνότητα του θερμού νερού (αλμόλοιπου) παραμένουν σταθερά, κάτι που δίνει ελπίδες για τη βιωσιμότητα της μονάδας. Βεβαίως προγραμματίζεται και νέα χημική επεξεργασία για την GPK4. Το θερμό νερό αντλείται στην επιφάνεια σε θερμοκρασία 160 C και πίεση 20 bars και επανεισάγεται σε θερμοκρασία 70 C και πίεση 18 bars. Λόγω της σημαντικής θερμοκρασιακής διαφοράς έχει παρατηρηθεί δημιουργία επικαθίσεων, κυρίως βαρύτη πλούσιου σε στρόντιο ($Ba_{0.6}Sr_{0.4}SO_4$) και δευτερευόντως θειούχων αλάτων βαρέων μετάλλων (π.χ. γαληνίτης) [13].

4.2. Μονάδα EGS στο Rittershoffen

Η γεωθερμική μονάδα EGS στο Rittershoffen (εγκατεστημένη ισχύς 24 MW_{th}) είναι η πρώτη αυτού του είδους στον κόσμο. Βρίσκεται στην Αλσατία, στην περιοχή Upper Rhine Graben, 50 km βόρεια από το Στρασβούργο και περίπου 10 km ανατολικά από τη μονάδα EGS στο Soultz. Τα γεωθερμικά ρευστά χρησιμοποιούνται για να θερμάνουν νερό που χρησιμοποιείται από βιομηχανική μονάδα επεξεργασίας αμύλου, σε απόσταση περίπου 15 km. Παράγονται ετησίως 190 εκατομμύρια θερμικές kWh και οι ανάγκες σε θερμό νερό του εργοστασίου καλύπτονται κατά 75% από τη γεωθερμική μονάδα. Το γεωθερμικό νερό αντλείται από βάθος 2500 μέτρων σε θερμοκρασία 165 °C και επανεισάγεται με αντλία στον ταμιευτήρα. Η γεώτρηση παραγωγής, GRT-1, με κατακόρυφο βάθος 2.550 m ανορύχθηκε το 2012. Δοκιμές της γεώτρησης με διέγερση του ταμιευτήρα πραγματοποιήθηκαν με επιτυχία το 2013. Η γεώτρηση επανεισαγωγής GRT-2, ύστερα από το αρχικό κατακόρυφο τμήμα, είναι κεκλιμένη και ολοκληρώθηκε τον Ιούλιο του 2014. Έχει κατακόρυφο βάθος ~2.750 m με συνολικό μήκος ανόρυξης 3.196 m, ενώ η απόσταση της επανεισαγωγής από το σημείο άντλησης της GRT-1 είναι περίπου 1,2 km. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται οι επιφανειακές εγκαταστάσεις των δύο γεωτρήσεων.



Σχήμα 6 Αριστερά, η κεφαλή της παραγωγικής γεώτρησης με την αντλία lineshaft που αντλεί από τα 480 m. Δεξιά, η κεφαλή της γεώτρησης επανεισαγωγής. Η απόσταση μεταξύ των δύο γεωτρήσεων στην επιφάνεια είναι 4 m.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε μία χώρα με τόσο πλούσιο δυναμικό και πολύ καλές συνθήκες εκμετάλλευσης (μικρά βάθη ταμιευτήρων), η γεωθερμία δεν έχει βρει ακόμη το ρόλο της στο εθνικό και τοπικό ενεργειακό ισοζύγιο και παραμένει η μεγάλη αγνοημένη ΑΠΕ. Λιγότερο από το 10% των βεβαιωμένων γεωθερμικών αποθεμάτων (~1000 MW) αξιοποιείται σήμερα, αποκλειστικά για την παραγωγή θερμικής ενέργειας και λουτροθεραπεία (Πίνακας 1). Η ανάπτυξη της ελληνικής γεωθερμικής αγοράς και η αύξηση της εγκατεστημένης γεωθερμικής ισχύος την τελευταία δεκαετία οφείλεται σχεδόν εξολοκλήρου στην αξιοποίηση της αβαθούς γεωθερμίας με τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας.

Η Τοπική Αυτοδιοίκηση, κυρίως στη Βόρεια Ελλάδα, δείχνει να έχει αντιληφθεί τα σημαντικά οφέλη που προκύπτουν από την αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού. Σε αρκετές περιπτώσεις μάλιστα, έχει αναλάβει σημαντική δράση για την προσέλκυση επενδύσεων και τη δημιουργία γεωθερμικών μονάδων, έχοντας σύμμαχο τη μεγάλη αποδοχή των τοπικών κοινωνιών.

Το αντίθετο συμβαίνει στη Μήλο και τη Νίσυρο, όπου ακόμη δεν έχει αποκατασταθεί η σχέση εμπιστοσύνης μεταξύ της γεωθερμικής κοινότητας και των κατοίκων, όσον αφορά στην αξιοποίηση της γεωθερμίας υψηλής ενθαλπίας. Έτσι λοιπόν, στον τομέα της γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγής η κατάσταση είναι στάσιμη, με το βεβαιωμένο δυναμικό υψηλής ενθαλπίας να παραμένει ανεκμετάλλευτο εδώ και πολλές δεκαετίες και τις προσπάθειες για έρευνα και αξιοποίηση ρευστών μέσης ενθαλπίας να μην έχουν αποδώσει καρπούς μέχρι σήμερα.

Η αβαθής γεωθερμία είναι ο μόνος κλάδος που παρουσιάζει ιδιαίτερη ανάπτυξη στην Ελλάδα, με σημαντική αύξηση των εγκατεστημένων μονάδων ΓΑΘ σε περισσότερες και διαφορετικές εφαρμογές. Τα οικονομικά κίνητρα, η ευνοϊκή νομοθεσία και οι απλοποιημένες διαδικασίες αδειοδότησης είναι οι κύριες αιτίες της θετικής πορείας αυτού του τομέα. Στο άμεσο μέλλον, θα πρέπει να ενισχυθεί σημαντικά η διείσδυση των ενεργειακών συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας στον αγροτικό τομέα. Λόγω ευνοϊκών συνθηκών (εκτεταμένες υπόγειες υδροφορίες σε μικρά βάθη σε εύφορες πεδιάδες της χώρας, δυνατότητα ορθολογικής διαχείρισης του νερού, επιστημονική και τεχνολογική εμπειρία και σημαντική οικονομική και ενεργειακή εξοικονόμηση), η χρήση των ΓΑΘ στην ενεργειακή υποστήριξη μικρών παραγωγικών εγχειρημάτων, θεωρείται ιδιαίτερα ελκυστική.

Πίνακας 1: Αξιοποίηση της γεωθερμίας στην Ελλάδα (Νοέμβριος, 2017)

Χρήση	**Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)**
Ηλεκτροπαραγωγή	**0**
Άμεσες χρήσεις	**93**
i. Λουτροθεραπεία	42
ii. Θέρμανση θερμοκηπίων	43
iii. Θέρμανση εδάφους	4,5
iv. Θέρμανση χώρων (εκτός ΓΑΘ)	1,65
v. Ξήρανση/Αφυδάτωση	0,60
vi. Υδατοκαλλιέργειες	1,25
Αβαθής γεωθερμία (ΓΑΘ)	**157**
ΣΥΝΟΛΟ	**250**

Ο καινούριος νόμος για τη γεωθερμία, που αναμένεται να δοθεί άμεσα σε διαβούλευση, προσβλέπει στην ενίσχυση της επενδυτικής κινητικότητας στη χαμηλή ενθαλπία, διαχωρίζοντας την αξιοποίηση από τη διαχείριση των πεδίων και εξορθολογίζοντας με τον τρόπο αυτό την εκμετάλλευσή τους, αφού θα δίνεται η δυνατότητα ακόμη και σε μικρούς επενδυτές να εισέλθουν στη γεωθερμική αγορά.

Στην Ευρώπη, την τελευταία πενταετία υλοποιήθηκε ένας σημαντικός αριθμός έργων που έβαλαν τα θεμέλια ώστε η γεωθερμία να αποτελέσει στο άμεσο μέλλον σημαντικό «παίκτη» της Ευρωπαϊκής ενεργειακής αγοράς. Καταγράφεται αύξηση της εγκατεστημένης γεωθερμικής ισχύος σε όλες τις κατηγορίες χρήσεων, με ένα μεγάλο μέρος του βεβαιωμένου δυναμικού να μην έχει αξιοποιηθεί ακόμη. Το μεγαλύτερο μερίδιο της ευρωπαϊκής γεωθερμικής αγοράς (65%) κατέχει η αβαθής γεωθερμία, αν και τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη του κλάδου γίνεται με χαμηλότερους ρυθμούς.

Στις άμεσες εφαρμογές, κυριαρχεί η τηλεθέρμανση, η οποία πραγματοποιείται σε 22 χώρες, με νέα δίκτυα να κατασκευάζονται συνεχώς, κυρίως σε χώρες που ανήκουν στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος συνδέεται κυρίως με την θεαματική ανάπτυξη του συγκεκριμένου κλάδου στην Τουρκία. Αναμένεται περαιτέρω αύξηση των γεωθερμικών ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων που θα λειτουργούν την επόμενη τριετία σε διάφορες χώρες της Ευρώπης, δεδομένου ότι πολλά έργα βρίσκονται σε εξέλιξη και προβλέπεται να ολοκληρωθούν μέχρι το 2020.

Η αξιοποίηση των Προηγμένων Γεωθερμικών Συστημάτων βρίσκεται σε τροχιά ανάπτυξης, με τρεις ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες και μία θερμική να λειτουργούν σήμερα στην Ευρώπη και άλλες δέκα να βρίσκονται υπό κατασκευή. Η τεχνολογία των EGS είναι ελκυστική, ιδίως σε περιοχές όπου απουσιάζουν οι υδροθερμικοί γεωθερμικοί πόροι (Κεντρική Ευρώπη, Μεγάλη Βρετανία, Ελβετία κλπ), όμως το κόστος της αρχικής επένδυσης και το γεωλογικό ρίσκο παραμένουν αρκετά μεγάλα.

Το μέλλον της γεωθερμίας στην Ελλάδα, αλλά και την Ευρώπη, συνδέεται με την προσπάθεια για αύξηση της χρήσης της, σε συνδυασμό ενδεχομένως με άλλες ΑΠΕ, και της ενίσχυσης της γεωθερμικής βιομηχανίας/αγοράς, που θα οδηγήσουν σε περαιτέρω μείωση των εκπομπών CO_2, στην εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας και στη δημιουργία πολλών και μόνιμων θέσεων εργασίας. Από την άλλη, η γεωθερμική ενέργεια, εκτός των εθνικών στόχων, αποδεδειγμένα συμβάλει στην ανάπτυξη των τοπικών κοινωνιών, είτε είναι αστικές είτε αγροτικές, με πολλά άμεσα και έμμεσα οφέλη. Στην Ελλάδα θα πρέπει να δοθεί έμφαση στην έμπρακτη αποδαιμονοποίηση της γεωθερμικής ηλεκτροπαραγωγής, καθώς και στον τομέα της θέρμανσης/δροσισμού χώρων, όπου η γεωθερμία μπορεί να παρέχει σταθερή, καθαρή και ασφαλή ενέργεια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Eurostat: 2015 Energy Balance (2017 edition), http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data (accessed 5.11.2017)

[2] Antics, M., Bertani, R., and Sanner, B., 2016 “Summary of EGC 2016 Country Update Reports on Geothermal Energy Use in Europe”, Proc. European Geothermal Congress, 19-24 September 2016, Strasbourg, France

[3] Andritsos, N., Arvanitis, A., Dalambakis P., Karytsas C., Mendrinos D., and Papachristou M., 2013, “Geothermal Energy Use, Country Update for Greece”, Proc. European Geothermal Congress 2013, Pisa, Italy

[4] Papachristou, M., Mendrinos, D., Dalambakis, P., Arvanitis, A., Karytsas, C, and Andritsos, N., 2016, “Geothermal Energy Use, Country Update for Greece”, Proc. European Geothermal Congress 2016, 19-24 September 2016, Strasbourg, France.

[5] Δαλαμπάκης, Π., Παπαχρήστου, Μ., Κολιός, Π., Αρβανίτης, Α., Κολιός Ν., 2015, “Αξιοποίηση των γεωθερμικών ρευστών στο Νέο Εράσμιο Ξάνθης”, Πρακτικά 9ου Συνεδρίου Ε.Γ.Μ.Ε., Θεσσαλονίκη, 8-9 Οκτωβρίου 2015

[6] Kolios, N., Fytikas, M., Arvanitis, A., Andritsos, N., and Koutsinos, S., 2007, “Prospective Medium Enthalpy Geothermal Resources in Sedimentary Basins of Northern Greece”, Proc. European Geothermal Congress, 30 May-1 June 2007, Unterhaching, Germany

[7] European Geothermal Council, “EGEC Market Report 2016” Sixth Edition, May 2017, available at https://www.egec.org

[8] Weber, J., Ganz, B., Sanner, B., and Moeck, I., 2016, “Geothermal Energy Use, Country Update for Germany”, Proc. European Geothermal Congress 2016, Strasbourg, France.

[9] Simsek, S., Mertoglu, O., Bakir, N., Akkus, I., Aydogdu, O., 2005, “Geothermal Energy Utilization, Development and Projections-Country Update Report (2000-2004) of Turkey”, Proc. World Geothermal Congress, Antalya Turkey, 24-29 April, 2005.

[10] Kallio, J.. 2016, “Geothermal Energy Use, Country Update for Finland”, Proc. European Geothermal Congress 2016, 19-24 September 2016, Strasbourg, France.

[11] IEA, 2011, “Technology Roadmap: Geothermal Heat and Power”, International Energy Agency, Paris, France, 52 pp.

[12] Portier, S. and Vuataz, F.D., 2010, “Developing the ability to model acid-rock interactions and mineral dissolution during the RMA stimulation test performed at the Soultz-sous-Forêts EGS site, France”, C. R. Geoscience 342, pp. 668–675.

[13] Scheiber, J., Seibt, A., Birner, J., Genter, A., Cuenot, N. and Moeckes, W., 2015, “Scale Inhibition at the Soultz-sous-Forêts (France) EGS Site: Laboratory and On-Site Studies”, Proceedings, World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΧΗΣ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Σ. Καρύτσας[1*], Ο. Πολύζου[2], Κ. Καρύτσας[2]

[1*] Τμήμα Γεωθερμικής Ενέργειας, Διεύθυνση ΑΠΕ, ΚΑΠΕ
190 09 Πικέρμι, e-mail: spkary@cres.gr
[2] Τμήμα Γεωθερμικής Ενέργειας, Διεύθυνση ΑΠΕ, ΚΑΠΕ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για την προώθηση και επιτυχημένη υλοποίηση των έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), απαραίτητη προϋπόθεση είναι η αποδοχή της τοπικής κοινωνίας [λόγω περιβαλλοντικών και οικονομικών ζητημάτων, συμμετοχής της τοπικής κοινωνίας, ζητημάτων αποδοχής τύπου NIMBY (Not In My Back Yard)], συνεπικουρούμενη από τη γνώση και ενημέρωση του κοινού σχετικά με αυτές τις μορφές ενέργειας. Η γεωθερμική ενέργεια είναι μια μορφή ΑΠΕ η οποία έχει αντιμετωπίσει προβλήματα κοινωνικής αποδοχής στην Ελλάδα, τα οποία έχουν ανακόψει -σε συνδυασμό και με άλλους παράγοντες- την αναπτυξιακή πορεία της συγκεκριμένης μορφής ενέργειας. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η σφαιρική εξέταση του αντικειμένου της κοινωνικής αποδοχής της γεωθερμικής ενέργειας στη χώρα μας, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα έως τώρα πεπραγμένα πάνω σε αυτό το ζήτημα.

Αρχικά πραγματοποιείται μια ανασκόπηση όλων των δημοσιευμένων ερευνών οι οποίες σχετίζονται με τη γνώση, την ενημέρωση, τις απόψεις και την αποδοχή του κοινού σχετικά με τη γεωθερμική ενέργεια, με στόχο την εξαγωγή μιας συνολικής άποψης πάνω στο υπό εξέταση θέμα. Η προαναφερθείσα διαδικασία, περιλαμβάνει ελληνικές και ξενόγλωσσες έρευνες οι οποίες πραγματεύονται τα κοινωνικά ζητήματα της γεωθερμικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή, για άμεσες χρήσεις, ή για αξιοποίηση μέσω γεωθερμικών αντλιών θερμότητας (ΓΑΘ). Να αναφερθεί ότι η πλειονότητα των ερευνών που παρουσιάζονται ασχολούνται εν μέρει με τη γεωθερμική ενέργεια, δίνοντας έμφαση είτε σε άλλες μορφές ΑΠΕ, είτε σε όλες τις ΑΠΕ γενικότερα, ενώ ο αριθμός ερευνών με αποκλειστικό αντικείμενο τη γεωθερμική ενέργεια είναι μικρός. Μέσω της ανασκόπησης αυτής, παρουσιάζεται και η συνολική εικόνα γνώσης/ ενημέρωσης/ αξιολόγησης/ αποδοχής της γεωθερμικής ενέργειας σε σύγκριση με τις διαφορετικές μορφές ΑΠΕ οι οποίες βρίσκουν εφαρμογή την Ελλάδα.

Εν συνεχεία, δίνεται ιδιαίτερη έμφαση -παρουσιάζοντας όλα τα έως τώρα πεπραγμένα- στην περίπτωση της Μήλου, καθώς αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα αντίδρασης της τοπικής κοινωνίας στην αξιοποίηση της γεωθερμίας. Το αρνητικό παράδειγμα που έχει δημιουργηθεί, είναι ένας από τους παράγοντες που έχουν επηρεάσει την περαιτέρω εξέλιξη της γεωθερμικής ενέργειας στην Ελλάδα, τουλάχιστον όσον αφορά στην ηλεκτροπαραγωγή. Επιπλέον, εξετάζονται και άλλες σχετικές περιπτώσεις όπου έχουν παρουσιαστεί ζητήματα κοινωνικής αποδοχής, όπως αυτά της Νισύρου και της Κιμώλου.

Επιπλέον, μέσω της μελέτης του αντικειμένου σε διεθνές επίπεδο, παρουσιάζονται βέλτιστες πρακτικές οι οποίες μπορούν να συμβάλλουν στη βελτίωση της κοινωνικής αποδοχής της συγκεκριμένης μορφής ενέργειας. Οι πρακτικές αυτές είναι σημαντικό να υλοποιούνται σε όλα τα στάδια ανάπτυξης ενός έργου (ανάπτυξη ιδέας, λήψη αποφάσεων, σχεδιασμός, υλοποίηση, λειτουργία), ενώ μεταξύ αυτών περιλαμβάνονται α) η ενημέρωση, ευαισθητοποίηση και ενεργή συμμετοχή του κοινού, β) η προώθηση του διαλόγου, γ) η αποτροπή και ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων επιπτώσεωνκαι δ) η δημιουργία οφελών για την τοπική αυτοδιοίκηση και τους κατοίκους της περιοχής.

Λέξεις Κλειδιά:*γεωθερμική ενέργεια, κοινωνική αποδοχή, τοπική κοινωνία, βέλτιστες πρακτικές*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην Ελλάδα η αξιοποίηση της γεωθερμίας πραγματοποιείται αποκλειστικά μέσω άμεσωνχρήσεων, κυρίως μέσω συστημάτων ΓΑΘ, ιαματικών λουτρών και θέρμανσης θερμοκηπίων. Το Μάρτιο του 2016 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς εκτιμάτο στα 231,76MWt, παρουσιάζοντας αύξηση 22% σε σχέση με το 2013· η αύξηση αυτή οφείλεται κυρίως στην εγκατάσταση συστημάτων ΓΑΘ.Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω γεωθερμίας ακόμη δεν έχει επιτευχθείστην Ελλάδα, παρά την ύπαρξη πεδίων υψηλών (Μήλος, Νίσυρος) και μέσων θερμοκρασιών (π.χ. Χίος, Λέσβος, Σαμοθράκη) [1].

Οι κύριοι λόγοι για την ανυπαρξία ηλεκτροπαραγωγής μέσω γεωθερμίας και τη στασιμότητα στην εγκατάσταση άμεσων χρήσεων –με εξαίρεση τα συστήματα ΓΑΘ- στην Ελλάδα, παρά τις μεγάλες δυνατότητες που υπάρχουν, είναι α) η έλλειψη επενδυτικών κεφαλαίων και η ανεπάρκεια οικονομικών κινήτρων, β) οι αστοχίες του θεσμικού πλαισίου που μπορούν να οδηγήσουν σε προβλήματα όπως η γραφειοκρατία, γ) η απουσία πολιτικής βούλησης καιτα μικροπολιτικά συμφέροντα και δ) η έλλειψη ενημέρωσης και αποδοχής από την κοινωνία. Στην παρούσα εργασία δίνεται έμφαση στον παράγοντα της ενημέρωσης και αποδοχής της γεωθερμικής ενέργειας. Στόχος της εργασίας είναι να εξετάσει σφαιρικά το αντικείμενο, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα έως τώρα πεπραγμένα. Αρχικά πραγματοποιείται ενδελεχής βιβλιογραφική ανασκόπηση πάνω στις κοινωνικές έρευνες που εξετάζουν τη γεωθερμία στην Ελλάδα, ενώ ακολούθως παρουσιάζονται συγκεκριμένες χαρακτηριστικές περιπτώσεις αντίθεσης των τοπικών κοινωνιών στην ανάπτυξη της γεωθερμίας. Τέλος, προσφέρονταισυγκεκριμένες προτάσεις, βάσει των εφαρμοζόμενωνδιεθνών πρακτικών, για τη βελτίωση της ενημέρωσης και αποδοχής της γεωθερμίας.

2. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΚΟΙΝΩΝΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑ

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε σε κοινωνικές μελέτες όσον αφορά τη γεωθερμική ενέργεια, περιλάμβανε θέματα σχετικά μετην ενημέρωση, την αποδοχή και τη στάση του κοινού έναντι αυτής της μορφής ενέργειας. Διαπιστώθηκε ότι ένας πολύ μικρός αριθμός κοινωνικών μελετών επικεντρώνονται αποκλειστικά στη γεωθερμική ενέργεια (Ενότητα 2.2). Παρ' όλα αυτά, μεμονωμένα στοιχεία σχετικά με τα κοινωνικά ζητήματα της γεωθερμίας εντοπίστηκαν σε μελέτες και εκθέσεις που ασχολούνται είτε με τις ΑΠΕ γενικά είτε με συγκεκριμένες ΑΠΕ όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια - δύο πηγές ενέργειας ιδιαίτερα δημοφιλείς στην Ελλάδα (Ενότητα 2.1).

2.1 Κοινωνικές έρευνες για τις ΑΠΕ με αναφορά στη γεωθερμική ενέργεια

Στο πλαίσιο της εξέτασης της αποδοχής του κοινού σε θέματα που αφορούν διάφορες λύσεις εξοικονόμησης ενέργειας και τεχνολογιών ΑΠΕ, διεξήχθη έρευνα σε 5 διαφορετικές ελληνικές πόλεις (Βόλος, Θεσσαλονίκη, Ιωάννινα, Κως και Σπάρτη) στις οποίες απάντησαν ερωτηθέντες που συμμετείχαν σε ενημερωτικές ημερίδες με θέματα ΑΠΕ και εξοικονόμησης ενέργειας. Από τον Νοέμβριο του 2001 έως τον Ιούλιο του 2002 συλλέχθηκαν 141 ερωτηματολόγια. Σύμφωνα με τη μελέτη αυτή, η σημαντικότητα της γεωθερμικής ενέργειας αξιολογήθηκε με μέση τιμή περίπου 3,5 σε πενταβάθμια κλίμακα 5 Likert, κατατάσσοντας την 4^{η} μεταξύ 5 διαφορετικών ΑΠΕ [2].

Το 2006, μια έκθεση που εκπόνησε το Ειδικό Ευρωβαρόμετρο επικεντρώθηκε στις γνώσεις, τις στάσεις και τις αντιλήψεις των πολιτών της ΕΕ σε ενεργειακά ζητήματα. Η έρευνα διεξήχθη από τον Μάιο έως τον Ιούνιο του 2006 και αφορούσε 1.000 ερωτηθέντες από ολόκληρη την ελληνική επικράτεια. Στο πλαίσιο της παραγωγής ενέργειας, το 37% των ερωτηθέντωνδήλωσε ότι είχε ακούσει για τη γεωθερμική ενέργεια [3].

Μελέτη σχετικά με τις αντιλήψεις καθηγητών της πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης σε περιβαλλοντικά ζητήματα περιελάμβανε έρευνα με ερωτηματολόγιο, κατά την οποία ανταποκρίθηκαν 188 συμμετέχοντες μεταξύ 2004 και 2006. Με βάση τα ευρήματα της έρευνας, οι περισσότεροι ερωτηθέντες χαρακτήρισαν τη γεωθερμία ως μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας [4].

Μια άλλη έρευνα με θέμα τη γνώση και τη στάση των εκπαιδευτικών έναντι των ΑΠΕ - ειδικά τα συστήματα αιολικής και ηλιακής ενέργειας - πραγματοποιήθηκε το 2006. Σύμφωνα με την έρευνα, η οποία αφορούσε καθηγητές δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης στην πόλη της Ρόδου (121 συμμετέχοντες), το 21,5% γνώριζε ότι η γεωθερμική ενέργεια είναι ΑΠΕ, έχοντας έτσι το 4^{ο} υψηλότερο ποσοστό μεταξύ 6 διαφορετικών ΑΠΕ [5].

Το 2007, πραγματοποιήθηκε τηλεφωνική έρευνα σχετικά με τη στάση των πολιτών έναντι της ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ και την προθυμία πληρωμής για την κατασκευή ενός αιολικού πάρκου

στη Ρόδο, εστιάζοντας στον ενήλικο πληθυσμό της περιοχής. Μέσα από τα 200 ερωτηματολόγια που συγκεντρώθηκαν εξήχθη το συμπέρασμα ότι το 19% των ερωτηθέντων γνώριζε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμική ενέργεια (9η μεταξύ 13 διαφορετικών πηγών παραγωγής ενέργειας), ενώ το 36% συμφώνησε με τη χρήση της γεωθερμικής ενέργειας στην Ελλάδα (6η μεταξύ 13 διαφορετικών πηγών παραγωγής ενέργειας) [6].

Μεταξύ του 2009 και του 2010 διεξήχθη έρευνα σε Έλληνες καταναλωτές, με σκοπό τη διερεύνηση της προθυμίας των καταναλωτών να υιοθετήσουν ΑΠΕ στον οικιακό τομέα. Τα αποτελέσματα (βάσει 200 απαντήσεων) δείχνουν ότι το 38% των ερωτηθέντων ήταν ενήμερο σχετικά με τη χρήση της γεωθερμίας στον οικιακό τομέα, κατατάσσοντας τη γεωθερμική ενέργεια στην 4η θέση μεταξύ 5 διαφορετικών ΑΠΕ [7].

Το 2010, πραγματοποιήθηκε στους κατοίκους της Άνδρου μελέτη με στόχο την ποιότητα και τη διαθεσιμότητα ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επίσης και την εγκατάσταση ανεμογεννητριών στο νησί. Η έρευνα διεξήχθη πρόσωπο με πρόσωπο σε 292 καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η γεωθερμική ενέργεια θεωρείτο ως φιλική προς το περιβάλλον με μέση τιμή 6,71 σε μια δεκαβάθμια κλίμακα Likert, κατατάσσοντας την 4η μεταξύ 10 διαφορετικών πηγών ενέργειας και 4η μεταξύ 5 διαφορετικών ΑΠΕ [8].

Το 2010, διεξήχθη έρευνα αγοράς σε έξι ευρωπαϊκές χώρες (Ελλάδα, Κύπρο, Βουλγαρία, Ρουμανία, Κροατία και Ισπανία) εστιάζοντας σε ιδιοκτήτες Φ/Β συστημάτων. Στόχος της έρευνας ήταν να καταγραφούν οι στάσεις και οι αντιλήψεις των ενδιαφερομένων φορέων ώστε να προσαρμοστούν οι μέθοδοι, τα εργαλείο και το περιεχόμενο της εκπαίδευσης στις απαιτήσεις και τις ανάγκες της βιομηχανίας και της αγοράς φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το 24% των ιδιοκτητών Φ/Β συστημάτων θα συμβούλευε έναν φίλο να επενδύσει σε γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, με τα αντίστοιχα ποσοστά για τα Φ/Β και τους ηλιακούς συλλέκτες να είναι 93% και 27% αντίστοιχα [9].

Το 2013 πραγματοποιήθηκε έρευνα σε καταναλωτές με στόχο τον εντοπισμό των παραγόντων που επηρεάζουν την αποδοχή των εγκαταστάσεων ΑΠΕ, δίνοντας έμφαση στην αιολική και την ηλιακή ενέργεια. Τα αποτελέσματα της έρευνας, που πραγματοποιήθηκε σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας (κυρίως στους Νομούς Λάρισας, Λασιθίου και Αττικής) έδειξαν ότι το 51,5% των 396 ερωτηθέντων γνωρίζουν τη γεωθερμική ενέργεια. Ως εκ τούτου, το επίπεδο γνώσης της γεωθερμικής ενέργειας κατέλαβε την 3η θέση μεταξύ των 5 διαφορετικών ΑΠΕ, ελαφρώς υψηλότερα από την υδροηλεκτρική ενέργεια (4η) και τα βιοκαύσιμα (5η) [10].

Το 2015, διεξήχθη μελέτη που επικεντρώθηκε σε έναν διαφορετικό τύπο συμμετεχόντων. Η έρευνα αφορούσε τη γνώση και τις στάσεις των τοπικών αρχών σε θέματα παραγωγής ενέργειας, διαχείρισης ενέργειας, κατανάλωσης ενέργειας και ΑΠΕ, καθώς επίσης και τις ενεργειακές πρακτικές και προθέσεις αυτών. Η έρευνα με ερωτηματολόγιο πραγματοποιήθηκε σε εκλεγμένους εκπροσώπους των τοπικών αρχών (δήμων και νομού) της Ρόδου. Τα αποτελέσματα από δώδεκα συμμετέχοντες έδειξαν ότι στο πλαίσιο εφαρμογής των τεχνολογιών ΑΠΕ στις δημόσιες υπηρεσίες, τις εγκαταστάσεις και τα δημόσια κτίρια στον τομέα ευθύνης τους, το 20% των ερωτηθέντωνείχε πολύ θετική άποψη σχετικά με την εφαρμογή των γεωθερμικών συστημάτων, το 40% είχε θετική άποψη, ενώ το υπόλοιπο 40% είχε αρνητική άποψη [11].

Το 2015 διεξήχθη έρευνα σε 200 σπουδαστές και μέλη του προσωπικού του ΤΕΙ Πειραιά, με θέμα την ενημέρωση του κοινού σε διάφορες ΑΠΕ. Σε πενταβάθμια κλίμακα Likert, η γνώση της γεωθερμικής ενέργειας βρέθηκε να είναι μάλλον χαμηλή (4,5% πολύ καλή, 14% καλή, 22% μέτρια, 26,5% φτωχή, 33% πολύ φτωχή), ενώ το πόσο σημαντική είναι αυτή μορφή ενέργειας είχε μέση τιμή 3,23, κατατάσσοντας την 6η μεταξύ 9 διαφορετικών πηγών ενέργειας (και 5η μεταξύ 6 διαφορετικών ΑΠΕ) [12].

Μελέτη που δημοσιεύθηκε το 2016 εξέτασε τη γνώση, τις αντιλήψεις και τις στάσεις των μαθητών λυκείου για τις ΑΠΕ, προκειμένου να ανιχνευθούν οι εκπαιδευτικές τους ανάγκες. Συνολικά συλλέχτηκαν 234 απαντήσεις από δύο λύκεια της πόλης του Διδυμοτείχου. Σε πενταβάθμια κλίμακα Likert, η συμπεριφορά της γεωθερμικής ενέργειας προς το περιβάλλον αξιολογήθηκε ως πολύ φιλική από το 20,1%, φιλική από 25,6%, λιγότερο ή περισσότερο φιλική από 33,3%, λίγο φιλική από 16,7% και καθόλου φιλική από 4,3%. Σύμφωνα με τα ανωτέρω αποτελέσματα κατετάγη στην 7η θέση μεταξύ 15 πηγών ενέργειας και στην 6η θέση μεταξύ 9 διαφορετικών ΑΠΕ. Όσον αφορά τη σημασία της γεωθερμικής ενέργειας, το 18,8% την χαρακτήρισε πολύ σημαντική, το 22,6% ως σημαντική, το 35% ούτε σημαντική ούτε μη σημαντική, το 16,7% λίγο σημαντική και το 6,8% καθόλου σημαντική. Έτσι, κατέλαβετην 5ηθέσημεταξύ9 ΑΠΕ[13].

Μια έρευνα μέσω ηλεκτρονικά διανεμημένου ερωτηματολογίου είχε ως στόχο την εξέταση της κοινωνικής αποδοχής των ΑΠΕ και ειδικότερα των Φ/Β. Τα αποτελέσματα που δημοσιεύθηκαν το 2016 και βασίζονται σε δείγμα 201 ερωτηθέντων (μισοί συμμετέχοντες από το νομό Αττικής και υπόλοιπο μισό από την υπόλοιπη Ελλάδα) έδειξαν ότι σε μια πενταβάθμια κλίμακα Likert η γνώση της γεωθερμικής ενέργειας είχε μέσο όρο 2,54, κατατάσσοντας την στην 5η θέση μεταξύ 5 διαφορετικών ΑΠΕ, ενώ το πόσο σημαντική είναι η γεωθερμική ενέργεια είχε μέσο όρο 3,16, κατατάσσοντας την 5ημεταξύ 9 διαφορετικών πηγών ενέργειας και 4ημεταξύ 5 διαφορετικών ΑΠΕ. Όσον αφορά τη σημαντικότητα συγκεκριμένων εφαρμογές ΑΠΕ, η θέρμανση και η τηλεθέρμανση με γεωθερμία είχαν μέσο όρο 3,02, κατατάσσοντάς την τελευταία μεταξύ 7 διαφορετικών εφαρμογών με ΑΠΕ [14].

Μια μελέτη με παρόμοια αποτελέσματα με την παραπάνω, κυκλοφόρησε το 2017, η οποία είχε ως στόχο την κοινωνική αποδοχή των «πράσινων» επενδύσεων και την αξιολόγησήτους από τους καταναλωτές. Τα αποτελέσματα, βασισμένα σε ένα δείγμα 280 ερωτηθέντων (το ήμισυ από το νομό Αττικής και το υπόλοιπο μισό από την υπόλοιπη Ελλάδα), έδειξαν ότι σε μια πενταβάθμια κλίμακα Likert η γνώση της γεωθερμικής ενέργειας είχε μέσο όρο 2,10 και έτσι κατατάχθηκε στην 5η θέση μεταξύ 5 διαφορετικών ΑΠΕ, ενώ η σημαντικότητα της θέρμανσης και της τηλεθέρμανσης με γεωθερμία είχε μέσο όρο 2,94 σε πενταβάθμια κλίμακα 5 Likert (κατετάγη 6ημεταξύ 7 διαφορετικών εφαρμογών ΑΠΕ) [15].

Τα αποτελέσματα μιας έρευνας με ερωτηματολόγιο με συμμετέχοντες κατοίκους της Σκύρου δημοσιεύθηκαν το 2017. Η μελέτη διερεύνησε τη χρήση ΑΠΕ ως μέρος ενός σχεδίου ενεργειακής αυτονομίας στη Σκύρο. Με βάση τις 183 απαντήσεις που συγκεντρώθηκαν, οι κάτοικοι έτειναν να είναι πιο ανοιχτοί σε νέες εγκαταστάσεις ηλιακής, αιολικής και γεωθερμικής ενέργειας, ενώ απέρριψαν άμεσα την πυρηνική ενέργεια και τα εργοστάσια άνθρακα [16].

2.2 Κοινωνικές έρευνες στοχευμένεςστη γεωθερμική ενέργεια

2.2.1 Αφαλάτωση στη Μήλο

Το 2004 δημοσιεύτηκε μελέτη των απόψεων των κατοίκων σχετικά με τις επιπτώσεις της κατασκευής μονάδας αφαλάτωσης - με χρήση γεωθερμικής ενέργειας - στη Μήλο. Η έρευνα με συμμετέχοντες τις τοπικές αρχές,κρατικές υπηρεσίες, συνδικαλιστικές οργανώσεις, κοινωνικούς φορείς και φορείς που λαμβάνουν αποφάσεις διεξήχθη το 2000, κατά την οποία συγκεντρώθηκαν 100 απαντήσεις.Οι συμμετέχοντες ήταν αρκετά προσεκτικοί, ακόμη και αρνητικοί, όσον αφορά την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας - ιδιαίτερα της γεωθερμικής ενέργειας υψηλής ενθαλπίας. Αυτό οφειλόταν στην αρνητική εμπειρία που είχε η Μήλος από τη λειτουργία πιλοτικής γεωθερμικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής τη δεκαετία του '80. Σύμφωνα με τις προτιμήσεις των ερωτηθέντων, οι ενεργειακές ανάγκες που μπορούν να καλυφθούν από τη γεωθερμική ενέργεια είναι το πόσιμο νερό (90,5%), η άρδευση (54,7%), η θέρμανση / ψύξη κτιρίων (52,6%), η ανάπτυξη του χειμερινού τουρισμού (45,3%) και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (35,8%) [17].

2.2.2 Γεωθερμική ανάπτυξη στη Μήλο και τη Νίσυρο

Μια κοινωνική έρευνα - μέσω τηλεφωνικού ερωτηματολογίου –με στόχο τη καταγραφή και ανάλυση των απόψεων των τοπικών κοινωνιώντης Μήλου και της Νισύρου σχετικά με την ανάπτυξη της γεωθερμικής ενέργειας πραγματοποιήθηκε το 2004. Στην περίπτωση της Μήλου συλλέχθηκαν 250 ερωτηματολόγια ενώ στην περίπτωση της Νισύρου 90 ερωτηματολόγια [18].

Η πλειοψηφία των κατοίκων της Μήλου (Μ) και της Νισύρου (Ν) γνώριζε ακριβώς τι είναι η γεωθερμία (86,8% και 95% αντίστοιχα), ανεξαρτήτως ηλικίας, επιπέδου εκπαίδευσης και απασχόλησης. Κύρια πηγή πληροφοριών και γνώσεων ήταν η προσωπική εμπειρία (Μ = 79%, Ν = 72%), η οποία ήταν πιο εμφανής στις μεσαίες και μεγαλύτερες ηλικίες (> 30 ετών). Οι νεότεροι ερωτηθέντες (ηλικίας 14-19 ετών) είχαν το σχολείο ως κύρια πηγή πληροφοριών, αν και η συμβολή του φαίνεται να ήταν αρκετά περιορισμένη. Η επίδραση του τύπου και των ηλεκτρονικών μέσων ενημέρωσης ήταν αμελητέα [18].

Η πλειοψηφία στη Μήλο (82,5%) –ανεξαρτήτως ηλικίας- πίστευε ότι η γεωθερμική ενέργεια αποτελεί ρυπογόνο δραστηριότητα. Αυτή η πεποίθηση ήταν λιγότερο έντονη στις ομάδες των ανέργων και των φοιτητών. Δεν διαπιστώθηκε ότι τα επαγγέλματα που σχετίζονταν με τον τουρισμό συνδέονταν με υψηλότερα επίπεδα περιβαλλοντικής ευαισθησίας. Στη Νίσυρο η κατάσταση ήταν ελαφρώς διαφορετική, καθώς λιγότεροι (68,2%) ερωτηθέντες πίστευαν ότι η εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας έχει περιβαλλοντικό αντίκτυπο, ενώ οι νεώτερες ηλικίες (<30 ετών) συμφωνούσαν απολύτως με την ύπαρξη αυτών των επιπτώσεων. Οι ερωτώμενοι που ασχολούντανμε δραστηριότητες που σχετίζονται με τον τουρισμό φαίνεται να ήταν πιο ευαίσθητοι όσον αφορά τις περιβαλλοντικές ανησυχίες [18].

Και στις δύο περιοχές, βασιζόμενοι στις προσωπικές εμπειρίες, η μόλυνση στον αέρα και το έδαφος / νερό (M = 81%, N = 98%) θεωρείτο ότι δημιουργούσαν τις κυριότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Και στα δύο νησιά, οι οικονομικές δραστηριότητες που φαίνεται να επηρεάζονταν περισσότερο ήταν εκείνες που σχετίζονταν με τη γεωργία και την αλιεία, ενώ οι τουριστικές δραστηριότητες φαίνεται να επηρεάζονταν λιγότερο [18].

Σε σχέση με τις πιθανές χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας, το κοινό επέλεξε ως σημαντικές εκείνες που αντικατόπτριζαν τις καθημερινές ανάγκες του, δηλαδή την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την αφαλάτωση. Πρέπει να αναφερθεί ότι στη Νίσυρο οι δύο αυτές επιλογές ήταν οι μόνες απαντήσεις που δόθηκαν. Το γεγονός ότι οι εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας στη γεωργία, την αλιεία και τον τουρισμό δεν θεωρήθηκαν ως πιθανές επιλογές μπορεί να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι και στις δύο τοπικές κοινωνίες υπήρχε μικρή γνώση των πολλών και συνδυαστικών χρήσεων της γεωθερμικής ενέργειας, και ιδιαίτερα αυτών της χαμηλής ενθαλπίας [18].

Στη Μήλο, ένα υψηλό ποσοστό (73%) τασσόταν υπέρ της εκμετάλλευσης του γεωθερμικού δυναμικού του νησιού. Οι εικασίες σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις δεν φαίνεται να επηρέαζαν την δεκτικότητα για την ανάπτυξη του νησιού. Αντίθετα, στη Νίσυρο το κοινό παρουσιάσθηκε διαφοροποιημένο (θετική γνώμη = 51,1%, αρνητική γνώμη = 48,9%). Η ρύπανση του περιβάλλοντος και οι επιπτώσεις στην υγεία των κατοίκων φαίνεται να ήταν οι κύριοι λόγοι για την αντίθεση όσον αφορά την εφαρμογή επενδυτικών σχεδίων για την ανάπτυξη της γεωθερμικής ενέργειας στα δύο νησιά. Ωστόσο, πρέπει να αναφερθεί ότι σημαντικό μέρος της τοπικής κοινωνίας της Νισύρου ήταν αρνητική χωρίς καμία δικαιολογία. Η πλειοψηφία των πολιτών και στα δύο νησιά πίστευε ότι το έργο δεν θα κατασκευαστεί σωστά, αντικατοπτρίζοντας την έλλειψη εμπιστοσύνης προς το κράτος και τους εκπροσώπους του, καθώς και προς τα μέσα παρακολούθησης και ελέγχου των έργων [18].

2.2.3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη Λέσβο

Μια άλλη μελέτη που αφορά σε μεγάλο βαθμό τη γεωθερμική ενέργεια δημοσιεύθηκε το 2013, με στόχο τη διερεύνηση των προτιμήσεων και αξιών προς συγκεκριμένες τεχνολογίες ΑΠΕ στη Λέσβο. Διεξήχθησαν προσωπικές συνεντεύξεις σε νοικοκυριά της Λέσβου, όπου συλλέχθηκαν 312 ερωτηματολόγια μεταξύ Ιουλίου και Σεπτεμβρίου 2010. Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι το 9% των ερωτηθέντων επέλεξε τη γεωθερμική ενέργεια ως την καταλληλότερη λύση για την αντικατάσταση του 10% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από πετρέλαιο στη Λέσβο, κατατάσσοντας την τελευταία μεταξύ 4 διαφορετικών τεχνολογιών (οι τρεις εναλλακτικές ήταν αιολική, υπεράκτια αιολική και φωτοβολταϊκή ενέργεια). Το ποσοστό υπέρ της γεωθερμικής ενέργειας ήταν υψηλότερο (33,3%) στον Πολυχνίτο, λόγω της γνώσης των ερωτηθέντων για την ύπαρξη γεωθερμικού δυναμικού στην περιοχή. Τα άτομα που επέλεξαν τη γεωθερμική ενέργεια είχαν υψηλά εισοδήματα, ενώ παράλληλα δήλωσαν ικανοποιημένοι από τη συμμετοχή τους στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Οι δήμοι και οι δημοτικές επιχειρήσεις προτιμήθηκαν για την υλοποίηση έργων γεωθερμικής ενέργειας. Οι επιπτώσεις της αλλαγής του κλίματος δεν ήταν καθοριστικός παράγοντας για την επιλογή της γεωθερμικής ενέργειας. Η ανάλυση της προθυμίας πληρωμής έδειξε ότι οι ερωτηθέντες ήταν πρόθυμοι να πληρώσουν το υψηλότερο ποσό (μεταξύ των τεσσάρων τεχνολογιών) για την αντικατάσταση του 10% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας με γεωθερμική ενέργεια [19].

2.2.4 Γνώση και στάση έναντι των συστημάτων ΓΑΘ

Μια κοινωνική μελέτη που δημοσιεύτηκε το 2016 περιελάμβανε δύο διαφορετικές έρευνες, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν κατά την περίοδο 2011-2012, σχετικά με τις γνώσεις και τις στάσεις όσον αφορά τη γεωθερμική ενέργεια γενικά και τα οικιακά συστήματα ΓΑΘ ειδικότερα. Η πρώτη έρευνα αφορούσε 203 κατοίκους της βορειοανατολικής Αττικής και διεξήχθη μέσωπρόσωπο με πρόσωπο ερωτηματολογίων. Η δεύτερη έρευνα χρησιμοποίησε ένα ηλεκτρονικά διανεμημένο ερωτηματολόγιο και αφορούσε τους καταναλωτές εν γένει, χωρίς περιορισμούς στην περιοχή κατοικίας. Στην προκειμένη περίπτωση συγκεντρώθηκαν 533 απαντήσεις. Στην πρώτη έρευνα, το 42% δήλωσε ότι γνώριζε τη γεωθερμική ενέργεια, το 35% γνώριζε ότι η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση / ψύξη οικιών, το 21% είχε ακούσει για τα συστήματα ΓΑΘ και το 18% ότι τα συστήματα ΓΑΘ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση / ψύξη οικιών. Στη δεύτερη έρευνα τα αντίστοιχα αποτελέσματα ήταν 71% (η γεωθερμική ενέργεια κατετάγη στην 3η θέση μεταξύ 8 διαφορετικών ΑΠΕ), 56%, 35% και 29% αντίστοιχα. Τα επίπεδα γνώσης ήταν υψηλότερα στη δεύτερη έρευνα, λόγω των χαρακτηριστικών του δείγματος (νεώτερες ηλικίες, υψηλότερο μορφωτικό επίπεδο, ενδιαφέροντα που σχετίζονται με την τεχνολογία / περιβάλλον). Και στις δύο περιπτώσεις, περίπου το 7,5% των ερωτηθέντων σκέφτηκαν να εγκαταστήσουν ένα σύστημα ΓΑΘ στην κατοικία τους [20][21].

Οι παράγοντες που επηρέασαν την ενημέρωση του κοινού σχετικά με τα υπό εξέταση ζητήματα, καθώς και την πρόθεση εγκατάστασης ενός οικιακού συστήματος ΓΑΘ, ήταν το φύλο, η ηλικία, το επίπεδο εκπαίδευσης, το επίπεδο εκπαίδευσης του επικεφαλής του νοικοκυριού, η απασχόληση, το εισόδημα, η περιβαλλοντική συμπεριφορά, η υιοθέτηση νέων τεχνολογιών και η σχέση του επαγγέλματος/ ενδιαφερόντων με το περιβάλλον ή την τεχνολογία. Επιπλέον, η πρόθεση εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος επηρεάστηκε από παράγοντες που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της κατοικίας και τους παράγοντες που σχετίζονται με τη συμπεριφορά των καταναλωτών και τις προτιμήσεις τους προς συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των συστημάτων θέρμανσης[20][21][22].

Η μελέτη περιελάμβανε και μια τρίτη έρευνα που εξέταζε τις απόψεις των ατόμων που εμπλέκονταν στον τομέα των ΓΑΘ, σχετικά με το υφιστάμενο και το μελλοντικό επίπεδο υιοθέτησης οικιακών συστημάτων ΓΑΘ, τα εμπόδια διάδοσης και τις δράσεις που μπορούν να συμβάλουν στη διάχυση τους. Η έρευνα διεξήχθη το 2012, χρησιμοποιώντας συνεντεύξεις πρόσωπο με πρόσωπο και ηλεκτρονικά διανεμημένα ερωτηματολόγια. Μεταξύ των κυριότερων ευρημάτων - βασισμένων σε 181 απαντήσεις - ήταν ότι ένα από τα σημαντικότερα εμπόδια διάχυσης των συστημάτων ΓΑΘ σε οικίες είναι η έλλειψη ενημέρωσης του κοινού σχετικά με την τεχνολογία των ΓΑΘ και τα οφέλη της [22].

3. ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗΣ ΕΝΑΝΤΙΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

3.1 Μήλος

Η Μήλος είναι ένα ηφαιστειογενές νησί στο Αιγαίο Πέλαγος. Βρίσκεται στο νοτιοδυτικό άκρο του νησιωτικού συμπλέγματος των Κυκλάδων και απέχει 86 ναυτικά μίλια από το λιμάνι του Πειραιά. Έχει έκταση 151 km^2, συνολικό πληθυσμό 4.966 κατοίκους[23], πρωτεύουσα του νησιού είναι η Πλάκα και μεγαλύτερο λιμάνι ο Αδάμαντας.Γεωλογικά ανήκει στην Αττικο-Κυκλαδική ζώνη. Βρίσκεται στο «Ηφαιστειακό τόξο του Νοτίου Αιγαίου», σε σημείο όπου οι λιθοσφαιρικές πλάκες Ευρώπης και Αφρικής συγκλίνουν, απελευθερώνοντας μεγάλες ποσότητες θερμότητας στο φλοιό της γης. Τα μη υδροπερατά πετρώματά του (μπεντονίτης, καολίνης, κ.α.) εγκλωβίζουν τα γεωθερμικά ρευστά και έτσι εμποδίζουν την απώλεια θερμότητας από τον γεωθερμικό ταμιευτήρα.

Η γεωθερμική έρευνα στη Μήλο ξεκίνησε το 1973 σαν μέρος του γεωθερμικού προγράμματος του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ). Την εποχή εκείνη, πραγματοποιήθηκε επιφανειακή έρευνα σε διάφορες περιοχές του νησιού, κατά την οποία κατασκευάστηκαν δέκα γεωτρήσεις μέτρησης θερμοβαθμίδας, για τον εντοπισμό των καταλληλότερων περιοχών. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων οδήγησε στην κατασκευή δύο βαθιών γεωτρήσεων (ΜΑ1 και ΜΖ1) από τη ΔΕΗ, με τις οποίες εντοπίστηκαν γεωθερμικά πεδία υψηλών (325°C) και χαμηλών θερμοκρασιών. Το 1982, κατασκευάστηκαν από τη ΔΕΗ τρεις παραγωγικές γεωτρήσεις βάθους 1.000-1.500m. Μετά από δοκιμαστική παραγωγή που πραγματοποιήθηκε, εκτιμήθηκε ότι το δυναμικό του ταμιευτήρα για ηλεκτροπαραγωγή ανέρχεται σε 120MWe.Μετά τον εντοπισμό του γεωθερμικού δυναμικού υψηλών θερμοκρασιών, η ΔΕΗ ξεκίνησε την κατασκευή πιλοτικού εργοστασίου ηλεκτροπαραγωγής ισχύος 2MWe, με στόχο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών του νησιού αλλά και ολόκληρου του συμπλέγματος των Κυκλάδων[24][25][26][27].

Οι κύριες γεωτρήσεις κατασκευάστηκαν στην περιοχή της Ζεφυρίας, πολύ κοντά στην μεγαλύτερη πόλη του νησιού, τον Αδάμαντα, όπου είχε μόλις ξεκινήσει η τουριστική ανάπτυξη. Επιπλέον, η αρνητική εμπειρία των κατοίκων από τις υπάρχουσες βιομηχανικές εγκαταστάσεις (το μεγαλύτερο μέρος του νησιού έχει επηρεαστεί από την μεταλλευτική δραστηριότητα), είχε σαν αποτέλεσμα τις έντονες αντιδράσεις της τοπικής κοινωνίας έναντι του πιλοτικού εργοστασίου ηλεκτροπαραγωγής που λειτούργησε το 1986, με το απλό σύνθημα «Σε καμία περίπτωση!»[18].

Επιπλέον, οι ελλείψεις και τα σφάλματα που έγιναν κατά την κατασκευή και λειτουργία του πιλοτικού εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησαν σε α) ατμοσφαιρική ρύπανση εξαιτίας της ανεξέλεγκτης διαρροής υδρόθειου και άλλων επικίνδυνων αερίων από τη γεώτρηση, β) ρύπανση των επιφανειακών υδάτων (βρόχινο νερό και νερό υδατοδεξαμενών) με αρσενικό και θειικά ιόντα και γ) μεγάλες ποσότητες υγρών και στερεών αποβλήτων στον κόλπο της Αγίας Κυριακής. Η κατάσταση αυτή δημιούργησε πρόσθετες αντιδράσεις στην ήδη αρνητική γνώμη της τοπικής κοινωνίας. Αποτέλεσμα των προαναφερθέντων προβλημάτων ήταν οι έντονες αντιδράσεις της τοπικής κοινωνίας, με διαμαρτυρίες και απεργίες, για περίπου δύο χρόνια (1987-1989) που οδήγησαν στο κλείσιμο της πιλοτικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής[18].

Μέχρι τώρα, περίπου 30 χρόνια μετά, οι αρνητικές αντιδράσεις της τοπικής κοινωνίας δεν έχουν επιλυθεί. Οι κάτοικοι εξακολουθούν να αντιτίθενται στην ανάπτυξη του γεωθερμικού πεδίου υψηλής ενθαλπίας, ενώ πιστεύουν ότι το κράτος θα προσπαθήσει να μη λάβει υπόψη τη γνώμη της τοπικής κοινότητας. Επιπλέον, εξακολουθούν να αντιτίθενται στη συμμετοχή της ΔΕΗ Ανανεώσιμες σε οποιαδήποτε εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας στο νησί. Εν τω μεταξύ, ο δήμος του νησιού έχει κάνει σχέδια για τη χρήση των γεωθερμικών πόρων χαμηλής ενθαλπίας, η οποία έχει την έγκριση της πλειοψηφίας των ντόπιων.

3.2 Νίσυρος

Η Νίσυρος είναι ένα ηφαιστειογενές νησί στο Αιγαίο Πέλαγος. Ανήκει στο νησιωτικό σύμπλεγμα των Δωδεκανήσων, καλύπτει μια έκταση 42km^2, έχει συνολικό πληθυσμό 982 κατοίκους [23], ενώ πρωτεύουσα και μεγαλύτερο λιμάνι του νησιού είναι το Μανδράκι. Γεωλογικά ανήκει στην Υποπελαγωνική ζώνη. Το νησί αποτελείται από ηφαιστειακά πετρώματα, με διογκωμένες επιφάνειες που σχηματίστηκαν από προηγούμενες ηφαιστειακές δραστηριότητες.

Η γεωθερμική έρευνα στη Νίσυρο ξεκίνησε το 1973 σαν μέρος του γεωθερμικού προγράμματος του ΙΓΜΕ. Κατασκευάστηκαν 9 γεωτρήσεις θερμοβαθμίδας μέσου βάθους 70m μέσα στην καλδέρα του ηφαιστείου. Εκτιμάται ότι το γεωθερμικό δυναμικό του νησιού ανέρχεται σε 50MWe. Αποτέλεσμα των ερευνών ήταν ο εντοπισμός γεωθερμικών πεδίων υψηλών (400°C) και χαμηλών θερμοκρασιών.Το 1982 η ΔΕΗ πρότεινε την κατασκευή πιλοτικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής, με στόχο την επίλυση των προβλημάτων ηλεκτρικής ενέργειας τόσο στη Νίσυρο, όσο και στη γειτονική Κω. Το 1983, κατασκευάστηκαν δύο γεωτρήσεις στην περιοχή της καλδέρας του ηφαιστείου οι Ν1 (1816m) και Ν2 (1547m) αντίστοιχα, όπου αποτελεί τον κύριο πόλο έλξης για τους τουρίστες του νησιού[28][29].

Οι κάτοικοι αντέδρασαν στον πιλοτικό σταθμό ηλεκτροπαραγωγής. Στόχος των αντιδράσεων και της αρνητικής τοποθέτησης μεγάλου τμήματος της τοπικής κοινωνίας ήταν η προστασία του περιβάλλοντος (αέρια ρύπανση και ρύπανση υδάτων) σε συνδυασμό με την πιθανότητα πρόκλησης σεισμικής και/ή ηφαιστειακής δραστηριότητας από τη διατάραξη της ισορροπίας του ηφαιστείου.Η εμπειρία από τις δοκιμαστικές γεωτρήσεις στο νησί, καθώς επίσης και το άσχημο παράδειγμα της Μήλου, οδήγησε τους κατοίκους του νησιού να εκφράσουν την αντίθεση τους σε οποιαδήποτε σκέψη εκμετάλλευσης της γεωθερμικού δυναμικού της περιοχής, με δημοψήφισμα που διενεργήθηκε το Μάιο του 1997 και το οποίο είχε αρνητικό αποτέλεσμα[18].

Μέχρι σήμερα, υπάρχουν αντιδράσεις από την τοπική κοινωνία και τις τοπικές αρχές στην ανάπτυξη γεωθερμικής ενέργειας υψηλής ενθαλπίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, οι ντόπιοι είναι θετικοί στη χρήση των γεωθερμικών πεδίων χαμηλής ενθαλπίας για την παραγωγή πόσιμου νερού και άρδευσης, τη θέρμανση / ψύξη κτιρίων και το ζεστό νερό οικιακής χρήσης. Οι κάτοικοι πιστεύουν ότι δεν είναι σωστά ενημερωμένοι και ότι η γνώμη τους δεν έχει σημασία για την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας, δεν εμπιστεύονται τη ΔΕΗ Ανανεώσιμες για την κατασκευή μιας τέτοιας μονάδας, ενώ το μικρό μέγεθος του νησιού και ο χαρακτηρισμός του ως περιοχής Natura 2000 είναι άλλοι λόγοι οι οποίοι οδηγούν στην αρνητική τους στάση [30]. Οι αντιδράσεις τους συνοδεύονται από διάφορες ενέργειες όπως η ευαισθητοποίηση των κατοίκων και των πολιτικών, οι δραστηριότητες διάδοσης σχετικά με τα επιχειρήματα κατά της κατασκευής ενός γεωθερμικού σταθμού και διάφορες άλλες δραστηριότητες (συναντήσεις, διαμαρτυρίες κ.λπ.). Μια φράση που δείχνει τη θέση τους είναι: «Δεν θέλουμε και δεν θα επιτρέψουμε την κατασκευή οποιασδήποτε γεωθερμικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Νίσυρο» [20].

3.3 Κίμωλος

Η Κίμωλος είναι ένα ηφαιστειογενές νησί στο Αιγαίο Πέλαγος και απέχει 86 ναυτικά μίλια από τον Πειραιά. Καλύπτει μια έκταση 37km^2, έχει συνολικό πληθυσμό 910 κατοίκους [23], ενώ πρωτεύουσα του νησιού είναι το Χωριό και μεγαλύτερο λιμάνι είναι η Ψάθη. Γεωλογικά ανήκει στην Αττικο-Κυκλαδική ζώνη, όπως και όλο το νησιωτικό σύμπλεγμα των Κυκλάδων.

Μετά το 1982, η ΔΕΗ πραγματοποίησε μια προκαταρκτική γεωθερμική έρευνα στην Κίμωλο, κατασκευάζοντας 8 γεωτρήσεις θερμοβαθμίδας με βάθος 100 μ έκαστη. Αργότερα, ορύχθησαν 2 γεωθερμικές γεωτρήσεις από το ΙΓΜΕ για τη λειτουργία μονάδας γεωθερμικής αφαλάτωσης θαλασσινού νερού. Κατά τη διάρκεια του 2009-10 πραγματοποιήθηκε στο νησί ένα νέο Πρόγραμμα Γεωφυσικής Έρευνας, όπου βρέθηκαν νέες πιθανές θέσεις για γεωτρήσεις.Το 2014 η ΔΕΗ Ανανεώσιμες άρχισε να σχεδιάζει την κατασκευή ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής 5MW στο νησί. Αυτό οδήγησε στην αντίδραση της τοπικής κοινωνίας και των τοπικών αρχών, που επηρεάστηκαν από την προηγούμενη αρνητική εμπειρία της Μήλου. Τόσο οι κάτοικοι όσο και οι τοπικές αρχές πιστεύουν

ότι η ΔΕΗ Ανανεώσιμες θέλησε να προχωρήσει στην ανάπτυξη χωρίς να τους έχει ενημερώσει και χωρίς τη συγκατάθεσή τους [26][27].

4. ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗΣ ΑΠΟΔΟΧΗΣ

Κατά το παρελθόν διαφορετικοί ορισμοί έχουν δοθεί όσον αφορά την επιτυχή κοινωνική αποδοχή των γεωθερμικών έργων. Σύμφωνα με τον de Jesus (1995) [31], «η κοινωνική αποδοχή επιτυγχάνεται εάν οι δραστηριότητες του έργου δεν οδηγήσουν σε δραστικές αλλαγές σε σχέση με τις κανονικές συνθήκες της περιοχής, και εάν οι επηρεαζόμενοι τομείς μπορούν να επωφεληθούν από κάποια πλεονεκτήματα που προκύπτουν από το έργο». Από την άλλη, ο Cataldi (2001) [32]αναφέρει ότι «η κοινωνική αποδοχή ενός έργουπου έχει σκοπό το κέρδος είναι η προϋπόθεση βάσει της οποίας οι τεχνικοί και οικονομικοί στόχοι του έργου μπορούν να επιδιωχθούν σε εύθετο χρόνο και με τη συναίνεση των τοπικών κοινοτήτων· συναίνεση η οποία θα επιτευχθεί ενεργώντας σε συμφωνία με τις δυναμικές συνθήκες του περιβάλλοντος και με σεβασμό στην ανθρώπινη υγεία, ευημερία και πολιτισμό». Επιπλέον, ο Popovski (2003) [33]συμπληρώνει ότι «η κοινωνική αποδοχή είναι ένα από τα σημαντικότερα μέρη της διαδικασίας ανάπτυξης της γεωθερμικής ενέργειας σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον. Δεν είναι δυνατή η ολοκλήρωση ενός επιτυχημένου έργου εάν αρχικά δεν εντοπιστούν τα στοιχεία του τοπικού περιβάλλοντος, που μπορούν να επηρεάσουν την κοινωνική του αποδοχή· και εάν δεν σχεδιασθούν κατάλληλες οργανωτικές, τεχνικές, οικονομικές και άλλες λύσεις έτσι ώστε να αρθούν οι αρνητικές απόψεις».

Βάσει των παραπάνω ορισμών, για την επίτευξη κοινωνικής αποδοχής απαιτείται η διασφάλιση της συμφωνίας των τοπικών κοινοτήτων ως προς την υλοποίηση του έργου η οποία μπορεί να εξασφαλισθεί μέσω α) της αποτροπής πρόκλησης δραστικών αλλαγών στις υπάρχουσες τοπικές συνθήκες, όσον αφορά το περιβάλλον, την υγεία των κατοίκων και τις κοινωνικές δομές και β) την παροχή ουσιαστικών οικονομικών και κοινωνικών οφελών στις τοπικές κοινότητες. Ακολούθως παρουσιάζεται, βάσει της έως τώρα καταγεγραμμένης εμπειρίας, ένα πλαίσιο δράσεων το οποίο μπορεί να συμβάλλει στην κοινωνική αποδοχή ενός γεωθερμικού έργου, μέσα από την ενημέρωση, τη συνεργασία και την ενεργή συμμετοχή των τοπικών κοινοτήτων, την αποτροπή και ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων επιπτώσεων και τη δημιουργία οφελών για τις τοπικές κοινότητες.Το πλαίσιο δράσεων που προτείνεται αφορά κυρίως τις εταιρείες που εμπλέκονται στην ανάπτυξη του έργου. Παράλληλα, η πολιτεία μπορεί από την πλευρά της να συμβάλλει στην επίτευξη κοινωνικής αποδοχής μέσω κατάλληλων νομοθετικών ρυθμίσεων (π.χ. διανομή συγκεκριμένου ποσοστού των κερδών για ανάπτυξη της περιοχής), συμμετοχής στην υλοποίηση των απαραίτητων κοινωνικών υποδομών και μακροχρόνιων δράσεων εκπαίδευσης του κοινού (π.χ. στα σχολεία).

4.1 Ενημέρωση, συνεργασία και ενεργή συμμετοχή

Η ενημέρωση, η ενεργή συμμετοχή και η συνεργασία με τις τοπικές κοινότητες είναι μείζονος σημασίας για την επίτευξη της κοινωνικής αποδοχής ενός γεωθερμικού έργου, καθώς μέσω αυτών ενδυναμώνεται η εμπιστοσύνη μεταξύ εταιρείας και κοινότητας, μειώνονται οι αντιδράσεις/ διαμάχες και ενισχύεται η αποδοχή της εταιρείας όσον αφορά την υλοποίηση του έργου. Προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι αυτοί, απαιτείται η εφαρμογή ενός συνολικού σχεδίου δράσης. Βάσει της μελέτης προηγούμενων σχεδίων δράσης με σκοπό την ανάπτυξη γεωθερμικών έργων, μπορεί να γίνει αναφορά στις ακόλουθες αρχές, στοχεύοντας στη δημιουργία ενός όσο το δυνατόν πιο ολοκληρωμένου σχεδίου που θα αποσκοπεί στην προώθηση της ενεργής συμμετοχής των τοπικών κοινοτήτων:

- Οι δράσεις ενημέρωσης/ ενεργούς συμμετοχής/ συνεργασίας πρέπει να είναι το πρωταρχικό βήμα κατά τη συνολική διαδικασίας ανάπτυξης ενός γεωθερμικού έργου [34][35][36][37][38].
- Παροχή ειλικρινών πληροφοριών στους ντόπιους,με κατανοητό τρόπο και προσαρμοσμένων στον τοπικό πολιτισμό, προερχόμενες από αξιόπιστες και αντικειμενικές πηγές [34][35][36][38][39][40][41][42][43].
- Αναγνώριση του ότι το κοινό είναι ανομοιογενές βάσει των δημογραφικών του χαρακτηριστικών, της γνώσης, της δύναμης, των αξιών και των ενδιαφερόντων του[34][41].
- Αντιμετώπιση των εμπλεκόμενων φορέων ως ίσους, με σκοπό τη δημιουργία μιας σωστής σχέσης, βασισμένης στην ειλικρίνεια και την εμπιστοσύνη [44].
- Αντιμετώπιση κάθε ζητήματος που αφορά το έργο με ανοικτό τρόπο, ακόμη και των αρνητικών ζητημάτων[45].

- Διασφάλιση ότι όλα τα συμφέροντα, συμπεριλαμβανομένων και αυτών που δεν εκπροσωπούνται ή εκπροσωπούνται σε μικρό βαθμό λαμβάνονται υπόψη όσον αφορά την διανομή των επιπτώσεων, αποζημιώσεων και οφελών [34][44].
- Ορισμός συγκεκριμένου ατόμου το οποίο θα είναι το «πρόσωπο» του έργου, και θα επικοινωνεί σχετικά με το έργο με όλους τους εμπλεκόμενους φορείς με τον κατάλληλο τρόπο [45]. Επίσης, η συμμετοχή υψηλών εκπροσώπων της διοίκησης του οργανισμού στο διάλογο ερμηνεύεται από τους εμπλεκόμενους φορείς ως ειλικρίνεια και αναγνώριση της ευθύνης [34][44].
- Κατά την έναρξη ενός γεωθερμικού έργου, οι απρόσεκτες πρακτικές μπορεί να οδηγήσουν σε αρχική αρνητική άποψη, με αποτέλεσμα η εκ νέου καθιέρωση μιας θετικής εικόνας να απαιτήσει τεράστια επένδυση σε προσπάθεια και χρόνο. Συνεπώς, οι κατάλληλες τεχνικές/ τεχνολογικές και οργανωτικές πρακτικές θα πρέπει να εφαρμόζονται σε όλες τις φάσεις του έργου, δηλαδή κατά την έρευνα, τον προγραμματισμό, το σχεδιασμό, την εφαρμογή, τη δοκιμαστική λειτουργία, και τη λειτουργία και συντήρησή του [38].
- Πραγματική υλοποίηση όλων των δεσμεύσεων που πραγματοποιούνται στα πλαίσια της συμμετοχής και συνεργασίας με τις τοπικές κοινότητες [34][44].

Οι δράσεις που μπορούν να περιλαμβάνονται σε ένα σχέδιο δράσης ενημέρωσης, ενεργής συμμετοχή και συνεργασίας με τις τοπικές κοινότητες αφορούν:

- Πραγματοποίηση κοινωνικοοικονομικής μελέτης της περιοχής κατά τα αρχικά στάδια του έργου. Η μελέτη θα πρέπει να περιλαμβάνει θέματα όπως διοικητικά όρια, χρήσεις γης και μορφές ιδιοκτησίας, πληθυσμός, φυσικοί πόροι, υποδομές, δημόσιες υπηρεσίες, πηγές εισοδήματος, μεταφορές, πολιτιστικά αξιοθέατα, ιστορικές τοποθεσίες, χρήση και ζήτηση ενέργειας, ταυτοποίηση των εμπλεκόμενων φορέων και των απόψεων τους σχετικά με τη γεωθερμική ενέργεια, οφέλη που έχουν αξία για τις τοπικές κοινότητες [35][36][46][47].
- Δημιουργία μιας ομάδας τοπικών εμπλεκόμενων μερών με συμμετοχή της τοπικής αυτοδιοίκησης, εκπροσώπους από όλες τις κοινότητες της περιοχής, ομάδες περιβαλλοντικής προστασίας, εκπροσώπους του αγροτικού και επιχειρηματικού κλάδου κλπ. Ενημέρωση της ομάδας σχετικά με τις δράσεις και τα μελλοντικά σχέδια της εταιρείας και διάλογος με σκοπό την επίτευξη κοινής εμπιστοσύνης[36][37][40][42][46][47][48][49]. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ενσωμάτωση της τοπικής γνώσης, εμπειριών και διαφορετικών συμφερόντων, καθώς και μια έντονη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ όλων των συμμετεχόντων [46].
- Συζήτησημε τη συμμετοχή μεγάλου μέρους των κοινοτήτων. Οι συμμετέχοντες θα έχουν την δυνατότητα να συζητήσουν σχετικά με τα οφέλη και τους κινδύνους του έργου, να θέσουν ερωτήσειςκαι να εκφράσουν τις ανησυχίες τους στους εκπροσώπους του έργου [39][42][46][47][48].
- Υλοποίηση δραστηριοτήτων ενημέρωσης στοχεύοντας σε όλους τους διαφορετικούς εμπλεκόμενους φορείς. Οι δραστηριότητες ενημέρωσης θα πρέπει να υλοποιούνται καθ' όλη τη φάση σχεδιασμού και υλοποίησης του έργου. Το περιεχόμενο των ενημερώσεων μπορεί να αφορά τον γεωθερμικό πόρο, την περιγραφή του έργου, ενδεχόμενες επιπτώσεις στο περιβάλλον, μέτρα και οφέλη για τις τοπικές κοινότητες [34][36][38][40][41][43][44][46][50]. Σημαντικά εργαλείαπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενημέρωση των εμπλεκόμενων φορέων είναι επισκέψεις στην τοποθεσία του έργου, διαλέξεις, ιστοσελίδα, ενημερωτικά δελτία/ φυλλάδια, δελτία τύπου, κέντρο πληροφόρησης, γραφείο διασύνδεσης, πραγματοποίηση κοινωνικής έρευνας μέσω αποστολής ερωτηματολογίων, κοινωνικά δίκτυα, αποκλειστική τηλεφωνική επαφή, κατασκευή επιδεικτικής μονάδας, συμμετοχή σε εκδηλώσεις (συμμετοχή σε επιστημονικές/ εμπορικές/ περιβαλλοντικές εκθέσεις, εκδηλώσεις πανεπιστημίων και ΜΚΟ), διοργάνωση επιστημονικών συναντήσεων, δικτύωση με ομάδες με συναφή ενδιαφέροντα [34][38][39][40][42][44][45][48][51][52].

4.2 Αποτροπή και ελαχιστοποίηση ανεπιθύμητων επιπτώσεων

Ηαποτροπή και ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων επιπτώσεων στο περιβάλλον και τους ανθρώπουςμπορεί να επιτευχθεί μέσα από α) την εκπόνηση περιβαλλοντικών σχεδίων δράσης, στοχεύοντας στα απαραίτητα μέτρα για την αποφυγή ή ελαχιστοποίηση των οποιονδήποτε ανεπιθύμητων επιπτώσεων [34][40], β) τις κατάλληλες πρακτικές περιβαλλοντικής διαχείρισης και σχεδιασμού του έργου, και οργάνωσης των εργασιών κατά την κατασκευή και λειτουργία του [38][53], γ) τις ολοκληρωμένες διαδικασίες για την εξασφάλιση συμμόρφωσης με τα πρότυπα υγείας, ασφάλειας και περιβάλλοντος [53], δ) τη δημιουργία κεφαλαίου περιβαλλοντικής εγγύησης, το οποίο έχει σκοπό να χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις αποκατάστασης και αποζημίωσης ζημιών που μπορεί να οφείλονται στη λειτουργία του έργου [44], αλλά και ε) τη διοργάνωση διαφόρων περιβαλλοντικών δράσεων,με σκοπό τη διατήρηση του οικοσυστήματος [34].

Εξίσου σημαντική είναι η άμεση αποζημίωση για ζημιές που έχουν προκληθεί από τις εργασίες του έργου σε ιδιωτικές ή δημόσιες ιδιοκτησίες, π.χ. καλλιέργειες, ζώα, εγκαταστάσεις, κτίρια, δρόμους, υποδομές. Σε αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται ο διαχειριστής του έργου να έχει μια ευέλικτη στάση, να καταβάλλονται λίγο υψηλότερες αποζημιώσεις σε κάποιες περιπτώσεις, να υιοθετούνταιαντισταθμιστικά μέτρα και οι διαπραγματεύσεις να ολοκληρώνονται γρήγορα, έτσι ώστε να υπάρχουν καλές σχέσεις με τις τοπικές κοινότητες [40].

4.3 Δημιουργία οφελών για τις τοπικές κοινότητες

Η δημιουργία οφελών για τις τοπικές κοινότητες μπορεί να επιτευχθεί είτε με την άμεση παροχή χρημάτων στις τοπικές αυτοδιοικήσεις (δήμοι, περιφέρειες, κλπ), η οποία συνήθως ορίζεται από την εκάστοτε νομοθεσία [44][54], είτε μέσω της δημιουργίας προγραμμάτων τοπικής ανάπτυξης.

Η παροχή χρηματικών πόρων στις τοπικές διοικητικές ενότητες μπορεί να πραγματοποιείται είτε μέσω ποσοστού κερδών της εταιρείας τα οποία αντιπροσωπεύουν τα δικαιώματα για χρήση των ενεργειακών πόρων της περιοχής [40][44], είτε μέσω ποσοστού οποιασδήποτε είσπραξης, δικαιωμάτων, τελών για την ανάπτυξη και αξιοποίηση των γεωθερμικών πόρων [54]. Τα ποσά που συγκεντρώνονται μπορούν να αξιοποιηθούν για την επιδότηση της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος στις περιοχές όπου βρίσκεται η πηγή ενέργειας, καθώς και για την υλοποίηση αναπτυξιακών έργων (κατασκευή υποδομών, παροχή υπηρεσιών, κλπ) που αφορούν τις τοπικές κοινότητες [40][44][54].

Μέσα από τη δημιουργία προγραμμάτων τοπικής ανάπτυξης, μπορεί να υποστηριχθεί η οικονομική, κοινωνική και ανθρώπινη ανάπτυξη των κοινοτήτων που βρίσκονται πλησίον του έργου. Με αυτόν τον τρόπο η εταιρεία που είναι υπεύθυνη για το έργο μπορεί να εκπληρώσει το στόχο σχετικά με την παροχή οφελών στις κοινοτήτων στις οποίες δραστηριοποιείται[34][36][40][44][50][53].Οι δράσεις αυτές μπορούν ενδεχομένως να αποτελούν και τμήμα του προγράμματος Κοινωνικής Εταιρικής Ευθύνης (Corporate Social Responsibility –CSR) που εφαρμόζει μια εταιρεία[34]. Για το σχεδιασμό δράσεων που ανταποκρίνονται στις ανάγκες των τοπικών κοινοτήτων ενδείκνυται η εταιρεία α) να ερευνήσει και να καταγράψει τις τοπικές οικονομικές, κοινωνικές κ.α. συνθήκες, β) να συζητήσει με την τοπική αυτοδιοίκηση, τοπικούς άρχοντες, τοπικούς οργανισμούς και συλλόγους κλπ, και γ) να παρακολουθεί διαρκώς τις δράσεις, έτσι ώστε μέσω της καταγραφής της εμπειρίας να βελτιώνονται τα μελλοντικά προγράμματα [50]. Δράσεις οι οποίες μπορούν να ενταχθούν στα προαναφερθέντα πλαίσια είναι οι ακόλουθες:

- Βελτίωση της εκπαίδευσης: Κατασκευή νέων εκπαιδευτικών εγκαταστάσεων, βελτίωση των εκπαιδευτικών υποδομών, παροχή εξοπλισμού και προμηθειών (π.χ. βιβλίων) στα σχολεία, παροχή υποτροφιών σε ντόπιους μαθητές / φοιτητές[34][36][44][50][51][54][55].
- Βελτίωση υγείας και υγιεινής: Συμβολή στην πρόσβαση των κατοίκων σε υπηρεσίες υγείας, μέσω παροχής φαρμάκων και υπηρεσιών περίθαλψης, βελτίωσης της πρόσβασης σε κλινικές, παροχή τροφίμων σε ασθενέστερες πληθυσμιακές ομάδες [34][36][44][50][51][54][55].
- Προστασία τοπικού περιβάλλοντος: Δράσεις περιβαλλοντικής ευαισθητοποίησης, καθαρισμοί περιοχών, συμμετοχή σε δράσεις αντιμετώπισης έκτακτων καταστροφών (π.χ. βοήθεια της κοινότητας σε περίπτωση πλημμύρας, ή κατά τη διάρκεια ξηρασίας) [36][50][51][55].
- Ενδυνάμωση τοπικής οικονομίας και επιχειρηματικότητας: Προγράμματα κατάρτισης για τη βελτίωση/ ανάπτυξη των δεξιοτήτων και γνώσεων των ντόπιων σε αντικείμενα σχετικά με την διαχείριση και οργάνωση επιχειρήσεων, δεξιότητες σχετικές με το αντικείμενο εργασίας τους κλπ [50][54][55], προσφορά θέσεων εργασίας του έργου στους ντόπιους (ανάλογα με τις δεξιότητες που απαιτούνται) [34][36][40][48][50], προτίμηση αγοράς προμηθειών από τοπικούς πόρους και υπηρεσίες [40][55], επιχειρηματικές ευκαιρίες για τους ντόπιους [51], μεταφορά τεχνολογίας για βελτίωση τοπικής παραγωγής [55], χρηματοδότηση έρευνας ωφέλιμης για την τοπική κοινωνία[49], ενθάρρυνση της διαφοροποίησης της τοπικής οικονομικής δραστηριότητας στις αγροτικές περιοχές μέσω της ανάπτυξης δραστηριοτήτων που θα χρησιμοποιούν γεωθερμικούς πόρους [55].
- Βελτίωση υποδομών: Κατασκευή ή βελτίωση δρόμων, γεφυρών, αιθουσών πολλαπλών χρήσεων, αγορών, δικτύου ηλεκτρικού ρεύματος, δικτύου ύδρευσης, παροχή μεταφορικών υπηρεσιών [34][36][40][44][50][51][55]. Παροχή σε χαμηλό κόστος (ή και δωρεάν) του απορριπτόμενου ατμού ή του ζεστού νερού για χρήση σε δημόσια κτίρια, πολιτιστικά κέντρα και άλλες δημόσιες εγκαταστάσεις [40].
- Δράσεις προαγωγής πολιτισμού και αθλητισμού: Διοργάνωση και χορηγία αθλητικών και πολιτιστικών εκδηλώσεων [34][36][40][44][50][55], κατασκευή αθλητικών εγκαταστάσεων, συμμετοχή στην αναπαλαίωση κτιρίων/ χώρων/ πάρκων κλπ, με σκοπό την προώθηση της πολιτιστικής κληρονομιάς και την προώθηση του τουρισμού [54].

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάπτυξη της γεωθερμικής ενέργειας στην Ελλάδα βρίσκεται σε πολύ χαμηλό επίπεδο, αν αναλογιστεί κανείς το υπάρχον δυναμικό. Συγκεκριμένα, η γεωθερμία αξιοποιείται μέσω άμεσων εφαρμογών, κυρίως ΓΑΘ, ενώ παρουσιάζεται πλήρης απουσία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που εμποδίζουν την ανάπτυξη της γεωθερμίας είναι η έλλειψη ενημέρωσης και κοινωνικής αποδοχής. Η έλλειψη κοινωνικής αποδοχής έχει επιπτώσεις κυρίως στην ηλεκτροπαραγωγή, σε μικρότερο βαθμό στις άμεσες χρήσεις (π.χ. τηλεθέρμανση, θερμοκήπια), ενώ μπορεί να επηρεάσει ελάχιστα (όταν πρόκειται για πολύ μεγάλες εφαρμογές) την εγκατάσταση συστημάτων ΓΑΘ. Από την άλλη, η έλλειψη ενημέρωσης μπορεί να συμβάλλει αρνητικά στην ανάπτυξη όλων τωνπροαναφερθεισών εφαρμογών.

Πραγματοποιήθηκε λεπτομερής βιβλιογραφική ανασκόπηση των κοινωνικών ερευνών στην Ελλάδα που αφορούν ή συμπεριλαμβάνουν τη γεωθερμική ενέργεια. Το κύριο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι υπάρχει χαμηλό επίπεδο γνώσης και ενημέρωσης σχετικά με τη γεωθερμία, ενώ η ανάπτυξή της δεν αποτελεί προτεραιότητα σε σύγκριση με άλλες ΑΠΕ. Από την άλλη, είναι σαφές ότι οι μορφές ενέργειας που φαίνεται να πρωταγωνιστούν σε επίπεδο ενημέρωσης και αποδοχής είναι η ηλιακή και η αιολική. Λόγοι που συμβάλλουν σε αυτό είναι η μεγαλύτερη κρατική υποστήριξη αυτών των τεχνολογιών και το ότι ως εφαρμογές είναι πιο «ορατές», δηλαδή ο καταναλωτής είναι πιο πιθανό να τις αναγνωρίσει λόγω της κατασκευής τους.

Στην Ελλάδα έχουν καταγραφεί περιπτώσεις σημαντικών κοινωνικών αντιδράσεων, όσον αφορά την εκμετάλλευση της γεωθερμίας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρώτη περίπτωση όπου εμφανίστηκαν αντιδράσεις ήταν αυτή της Μήλου κατά τη δεκαετία του 1980, όπου αστοχίες κατά την κατασκευή και λειτουργία πιλοτικής μονάδας ηλεκτροπαραγωγής –με αποτέλεσμα την ρύπανση του περιβάλλοντος- οδήγησαν στις έντονες αντιδράσεις των κατοίκων με συνέπεια την παύση λειτουργίας της μονάδας. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός αρνητικού κλίματος για τη γεωθερμία όχι μόνο στη Μήλο, αλλά και σε άλλες περιοχές με πλούσιο δυναμικό (π.χ. Νίσυρος, Κίμωλος). Από την άλλη, οι κάτοικοι στις περιοχές αυτές είναι πιο θετικοί στην ανάπτυξη εφαρμογών χαμηλών θερμοκρασιών.

Προκειμένου να υπάρξει ανάπτυξη της γεωθερμίας απαιτείται ενημέρωση για όλες τις γεωθερμικές εφαρμογές, και κοινωνική αποδοχή κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η κοινωνική αποδοχή μπορεί να επιτευχθεί μέσω της α) ευαισθητοποίησης και ενεργής συμμετοχή του κοινού, β) προώθησης του διαλόγου, γ)αποτροπής και ελαχιστοποίησηςτων ανεπιθύμητων επιπτώσεων στην περιοχή και δ) δημιουργίας οφελών για τους κατοίκους της περιοχής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Papachristou, M., Mendrinos, D., Dalampakis, P., Arvanitis, A., Karytsas, C., and Andritsos, N., 2016,“Geothermal Energy Use, Country Update for Greece”, Proc. European Geothermal Congress 2016, Starsbourg, France, 19-24 Sept 2016.

[2] Tzanakaki E., and Mavrogioros D., 2005,“Public Acceptance of Renewable Energy Sources and Energy Conservation”, Heleco ’05, TEE, Athens, Greece, 3-6 Feb 2005.

[3] Eurobarometer, 2006,“Energy Technologies: Knowledge, Perception, Measures”.

[4] Spiropoulou, D., Antonakaki, T., Kontaxaki, S., andBouras, S., 2007,“Primary Teachers’ Literacy and Attitudes on Education for Sustainable Development”, J. Sc. Ed. Tech., 16(5), pp. 443-450.

[5] Liarakou, G., Gavrilakis, C., and Flouri, E., 2009,“Secondary School Teachers’ Knowledge and Attitudes Towards Renewable Energy Sources”, J. Sc. Ed. Tech., 18(2), pp. 120-129.

[6] Koundouri, P., Kountouris, Y., and Remoundou, K., 2009, “Valuing a Wind Farm Construction: A Contingent Valuation Study in Greece”, En. Pol., 37(5), pp. 1939-1944.

[7] Sardianou, E., and Genoudi, P., 2013,“Which Factors Affect the Willingness of Consumers to Adopt Renewable Energies?”, Ren. En, 57, pp. 1-4.

[8] Tampakis, S., Tsantopoulos, G., Arabatzis, G., andRerras, I., 2013,“Citizens’ Views on Various Forms of Energy and their Contribution to the Environment”, Ren. Sust. En. Rev., 20, pp. 473-482.

[9] Tsoutsos, T., Tournaki, S., Gkouskos, Z., Masson, G., Holden, J., Huidobro, A.,Stoykova, E. et al., 2013,“Training and Certification of PV Installers in Europe: A Transnational Need for PV Industry's Competitive Growth”, En. Pol., 55, pp. 593-601.

[10] Skoupra, M., 2013,“Social acceptance of Renewable Energy Sources Installations by Consumers”, Master’s Thesis [In Greek].

[11] Dimitriou, A., andPimenidis, D., 2015,“Local Authorities’ Views and Attitudes on Sustainable Energy Policy: The Case of Mayors of Rhodes, Island, Greece (2010-2014)”, Int. J. Env. Prot. Pol., 3(2), pp. 20-30.

[12] Ntanos, S., Ntanos, A., Salmon, I., and Ziatas, T., 2016,“Public Awareness on Renewable Energy Sources: A Case Study for the Piraeus University of Applied Sciences”, 5th International Symposium and 27th National Conference on Operational Research, Athens, Greece, 9-11 Jun 2016.

[13] Keramitsoglou, K.M., 2016,“Exploring Adolescents’ Knowledge, Perceptions and Attitudes Towards Renewable Energy Sources: A Colour Choice Approach”, Ren. Sust. En. Rev., 59, pp. 1159-1169.

[14] Koutroumpi, M. and Saltaoura I., 2016,“Renewable Energy Sources – Photovoltaics”. Bachelor’s Thesis [In Greek].

[15] Fanourgaki, I. and Mauroudi I.M., 2017,“Green Investments / Evaluation from the Consumer’s Side”. Bachelor’s Thesis [In Greek].

[16] Petrakopoulou, F., 2017,“The Social Perspective on the Renewable Energy Autonomy of Geographically Isolated Communities: Evidence from a Mediterranean Island”, Sust., 9, pp. 1-8.

[17] Manologlou, E., Tsartas, P., andMarkou, A., 2004,“Geothermal Energy Sources for Water Production - Socio-economic Effects and People's Wishes on Milos island: A Case Study”, En. Pol., 32(5), pp. 623-633.

[18] Polyzou O., 2007,“Geothermal Energy – Sustainable Development and Local Societies, PhD Thesis, National Technical University of Athens [In Greek].

[19] Kontogianni, A., Tourkolias, C., andSkourtos, M., 2013,“Renewables Portfolio, Individual Preferences and Social Values Towards RES Technologies”, En. Pol., 55, pp. 467-476.

[20] Karytsas, S., and Theodoropoulou, H. ,2014,“Public Awareness and Willingness to Adopt Ground Source Heat Pumps for Domestic Heating and Cooling”, Ren. Sust. En. Rev., 34, pp. 49-57.

[21] Karytsas, S., and Theodoropoulou, H., 2014,“Socioeconomic and Demographic Factors that Influence Publics' Awareness on the Different Forms of Renewable Energy Sources”, Ren. En., 71, pp. 480-485.

[22] Karytsas, S., and Choropanitis, I., 2017, “Barriers Against and Actions Towards Renewable Energy Technologies Diffusion: A Principal Component Analysis for Residential Ground Source Heat Pump (GSHP) Systems”, Ren. Sust. En. Rev., 78, pp. 252-271.

[23] Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδος, 2011.

[24] Energy Press, 2011,“Κατηγορηματικό «όχι» στη Γεωθερμία Λέει η Μήλος”,https://energypress.gr/news/katigorimatiko-ohi-sti-geothermia-leei-i-milos(πρόσβαση Οκτ 2017).

[25] ΣΕΡΙΦΟΣ, 2012,“Μήλος – Γεωθερμία Δεκαετία ’80. Το Χρονικό της Καταστροφής”,http://giannisserfanto.blogspot.gr/2012/08/80.html(πρόσβαση Οκτ 2017).

[26] B2Green, 2014,“Το Ιστορικό της Γεωθερμίας σε Μήλο και Κίμωλο”,http://www.b2green.gr/el/post/19625/to-istoriko-tis-geothermias-se-milo-&-kimolo(πρόσβαση Οκτ 2017).

[27] Τζεφέρης Π., 2014,“Το Ιστορικό της Γεωθερμίας στη Μήλο-Κίμωλο”, http://www.oryktosploutos.net/2014/12/blog-post_25.html#.Wd8Xbrhc_Gg(πρόσβαση Οκτ 2017).

[28] Τζεφέρης Π., 2014,“Το Ιστορικό του Γεωθερμικού Πεδίου της Νισύρου”,http://www.oryktosploutos.net/2014/12/blog-post_28.html#.Wd8vV7hc_Gg(πρόσβαση Οκτ 2017).

[29] Νικολόπουλος Ν.,et al.,n.d.,“Νίσυρος και Γεωθερμία: Το Πέρασμα στη Βιομηχανοποίηση του Νησιού”http://www.nisyriakesmeletes.gr/article.html(πρόσβαση Οκτ 2017).

[30] Econews, 2011, “Γεωθερμία: Αντιδρούν στην Κατασκευή Μονάδας οι Κάτοικοι της Νισύρου”, http://www.econews.gr/2011/05/02/geothermia-nisiros/(πρόσβαση Οκτ 2017).

[31] de Jesus, A.C., 2000,“Resettlement of Affected Communities in the Leyte Geothermal Project and Strategies for Co-existence Between the Community and Project Developer”,Proc. World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, 28 May 28 -10 Jun, 2000.

[32] Cataldi, R., 2001,“Social Acceptance of Geothermal Projects: Problems and Costs”, EC International Geothermal Course, Oradea, Romania.

[33] Popovski, K., 2003,“Political and Public Acceptance of Geothermal Energy”, Geothermal Training Programme, The United Nations University, IGC2003 – Short Course.

[34] Wetang'ula, G.N., 2010,"Public Participation in Environmental and Socioeconomic Considerations for Proposed 2.5 MW Pilot Eburru Geothermal Power Project, Kenya", Proc. World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 Apr 2010.

[35] Ashworth, P., Bradbury, J., Wade, S., Feenstra, C.F.J.Y., Greenberg, S., Hund, G., and Mikunda, T., 2012, "What's in Store: Lessons from Implementing CCS", Int. J. Gr. Gas Contr.,9, pp. 402-409.

[36] Chebet S.K., 2013,"Community Engagement in Suswa Geothermal Prospect", GRC Trans., 37, pp. 779-784.

[37] Thompson. R., 2014,"An Assessment of the Socio-economic and Marine Environmental Impacts Associated with the St. Kitts and Nevis Geothermal Energy Project", Graduate Project, Halifax, NS: Dalhousie University.

[38] ENGINE – Enhanced Geothermal Network of Europe, n.d.,"Increasing Policy Makers' Awareness and Public Acceptance", WP5 – Del. 38.

[39] Beck A.G., 1990, "Dealing with Controversial Facts: Geothermal Public Information in Hawai'i", GRC Trans., 14(1), pp. 583-588.

[40] Cataldi, R., 1999,"Social Acceptance: A Sine Qua Non for Geothermal Development in the 21st Century", Bull. d'Hydrogéologie, 17, pp. 467-476.

[41] Leucht, M., Kölbel, T., Laborgne, P., and Khomenko, N., 2010,"The Role of Societal Acceptance in Renewable Energy Innovations Breakthrough in the Case of Deep Geothermal Technology",Proc. World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 Apr 2010.

[42] Carr-Cornish, S., Huddlestone-Holmes, C.,and Ashworth, P., 2011,"The ARRC/Pawsey Geothermal Demonstration Project: An Example of how to Engage the Community". Proc. 2011 Australian Geothermal Energy Conference, Melbourne, Geoscience Australia, 16-18 Nov 2011.

[43] Shoedarto, R.M., Aries, F.R., Irawan, D., Perdana, F., Arisbaya, I., and Indrawan, B., 2016,"Raising Public Acceptance of Geothermal Utilization Through Direct Application in Indonesia", Proc. 41st Stanford Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, SGP-TR-209.

[44] de Jesus, A.C., 2005, "Social Issues Raised and Measures Adopted in Philippine Geothermal Projects", Proc. World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24-29 Apr 2005.

[45] Schwellenbach E., and van Douwe A., 2016,"The Citizens' Initiative in Deep Geothermal Energy", Proc. European Geothermal Congress 2016, Strasbourg, France, 19-24 Sept 2016.

[46] Wallquist, L., and Holenstein, M., 2015, "Engaging the Public on Geothermal Energy", Proc. World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 Apr 2015.

[47] van Douwe A., Stahl L.K., and Kreuter H., 2016, Acceptance of Geothermal Projects in a Critical Environment in the Upper Rhine Graben", European Geothermal Congress 2016, Strasbourg, France, 19-24 Sept 2016.

[48] Manyara D., and Mading P., 2012,"Environmental and Social Considerations in Geothermal Development: Case Study Menengai, Kenya: Moving Towards Green and Clean Economy", GRC Trans., 36, pp. 1227-1232.

[49] Barasa P.J., and Mathenge R.W., 2015, "Stakeholder Engagement Through Participatory Research: A Case Study of Eburru Geothermal Wellhead Generator in Nakuru County, Kenya", GRC Trans., 39, pp. 233-238.

[50] Meidav M.Z., Calica M.C., and Enalpe E.E., 1995, "Model of Social Responsibility and Community Service: Case History of Unocal/ Philippine Geothermal INC's Experience with the Mak-Ban and Tiwi Fields", Proc. World Geothermal Congress 1995, Florence, Italy, 18-31May 1995.

[51] Slamet, U., and Moelyono, D.G., 2000, "Maximizing Community Benefits and Minimizing Environmental Impacts in the Gunung Salak Geothermal Project, Indonesia", Proc. World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, 28 May- 10 Jun, 2000.

[52] Carr-Cornish, S., and Romanach, L., 2012, Exploring Community Views Toward Geothermal Energy Technology in Australia, CSIRO, Pullenvale, Australia.

[53] Zepeda, N., and Rodriguez, A., 2005,"Socially Responsible Geothermal Development in El Salvador", Proc. World Geothermal Congress 2005 Antalya, Turkey, 24-29 Apr 2005.

[54] Camu, M., and Santiago, R., 2000,"Social Development in the Philippines' Tiwi Geothermal Area", Proc. World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, 28 May- 10 Jun, 2000.

[55]Musembi R., 2010,"Corporate Social Responsibility (CSR) in Geothermal Development: The Case of the Geothermal Development Company (GDC), Kenya", Proc. ARGEO-C3,3rd East African Rift Geothermal Conference, Djibouti, 22 - 25 Nov2010, pp. 516-521.

ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΑΣΣΑΛΩΝ ΜΕ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΗ ΚΕΦΑΛΗ

Δημήτριος Σκορδάς[1]*, Ιωάννης Καμάς[2], Κωνσταντίνος Γεωργιάδης[1], Αιμίλιος Κωμοδρόμος[2]

[1] Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ,
[2] Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΠΘ,
[1*] 541 24 Θεσσαλονίκη, e-mail:dskordas@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ενσωμάτωση συστημάτων αβαθούς γεωθερμίας στο σώμα πασσάλων θεμελίωσης αποτελεί ένα καινοτόμο τρόπο θέρμανσης και ψύξης κτιρίων. Οι ενεργειακοί πάσσαλοι, όπως έχει επικρατήσει να ονομάζονται, εκμεταλλευόμενοι τη σταθερή θερμοκρασία του υπεδάφους είναι δυνατόν να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες ενός κτιρίου, παρουσιάζοντας έτσι σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Τα αναπτυσσόμενα θερμικά φορτία, ωστόσο, μπορεί να επηρεάσουν την μηχανική συμπεριφορά των πασσάλων. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται θερμομηχανικές αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και εξετάζεται η επίδραση των πρόσθετων θερμικών φορτίων στη μηχανική συμπεριφορά μεμονωμένου πασσάλου σε αμμώδες έδαφος. Εξετάζεται η επίδραση: i) της χρονικής διάρκειας εφαρμογής του θερμικού φορτίου και ii) του συντελεστή θερμικής διόγκωσης του εδάφους στη μηχανική συμπεριφορά του πασσάλου. Επίσης, διερευνάται η επίδραση της θερμικής φόρτισης στη φέρουσα ικανότητα του πασσάλου. Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των αναλύσεων η θερμική φόρτιση δεν μεταβάλλει σημαντικά τη φέρουσα ικανότητα του πασσάλου. Αντίθετα, παρατηρείται ότι τόσο η χρονική διάρκεια εφαρμογής της θερμικής φόρτισης όσο και η τιμή του συντελεστή θερμικής διόγκωσης του εδάφους επηρεάζουν τις αξονικές τάσεις που ασκούνται στο πάσσαλο και τη συνολική του απόκριση.

Λέξεις Κλειδιά: αβαθής γεωθερμική ενέργεια, ενεργειακοί πάσσαλοι, ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, θεμελιώσεις

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Εδώ και αρκετές δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες οι οποίες εκμεταλλεύονται την αβαθή γεωθερμική ενέργεια με σκοπό να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. Η αβαθής γεωθερμία χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για να καλύψει ανάγκες θέρμανσης και ψύξης κτιρίων, και αποτελεί μια εξαιρετικά οικονομική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (Α.Π.Ε)

Ο πιο διαδεδομένος τύπος γεωενναλάκτη σε συστήματα αξιοποίησης της αβαθούς γεωθερμίας είναι οι γεωτρήσεις γεωθερμίας. Ωστόσο, τις τελευταίες δύο δεκαετίες χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο ως γεωενναλάκτες γεωτεχνικές κατασκευές (ενεργειακές γεωκατασκευές) όπως είναι οι επιφανειακές και βαθιές θεμελιώσεις, οι τοίχοι αντιστήριξης και οι επενδύσεις σηράγγων [1]. Η χρησιμοποίηση των δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος για την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας είναι ιδιαιτέρως ελκυστική καθώς τα στοιχεία αυτά απαιτούνται ούτως ή άλλως, π.χ. για να αντιστηρίξουν μια εκσκαφή ή για να μεταφέρουν τα φορτία της ανωδομής στο έδαφος και επίσης γιατί το σκυρόδεμα έχει μεγάλη θερμική αγωγιμότητα. Ο βέλτιστος σχεδιασμός και η εγκατάσταση τέτοιων στοιχείων μπορεί να οδηγήσει σε μείωση έως και 50% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα CO_2 ενός κτιρίου [2]. Ακόμη, σε αντίθεση με τις γεωτρήσεις γεωθερμίας, έχουν μειωμένο κόστος εγκατάστασης ενώ δεν χρειάζεται επιπλέον έκταση γης για το πεδίο των γεωτρήσεων. Ένας μεμονωμένος ενεργειακός πάσσαλος μπορεί να μεταφέρει 15-120 W/m αναλόγως του μεγέθους του, τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες, τον τύπο του εδάφους που τον περικλείει και τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος [3].

Η τεχνολογία των πασσάλων-γεωεναλλακτών εφαρμόστηκε αρχικά στην Αυστρία και την Ελβετία [1], [4], αλλά έκτοτε έχει χρησιμοποιηθεί σε αρκετές Ευρωπαϊκές χώρες, αλλά και στις Η.Π.Α. και στην Ιαπωνία. Πολλά σημαντικά κτήρια που κατασκευάστηκαν στην Ευρώπη τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια θεμελιώθηκαν σε ενεργειακούς πασσάλους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν το One New Change Building (219 ενεργειακοί πάσσαλοι), το Lambeth College και τα ξενοδοχεία Bulgari Hotel Knightsbridge και Knightsbridge Palace Hotel στο Λονδίνο, ο τερματικός Dock Midfield E (306 ενεργειακοί πάσσαλοι) στο αεροδρόμιο της Ζυρίχης, το School Centre στο Βερολίνο και οι πύργοι Main και Galileo στη Φρανκφούρτη.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει σημαντικές ερευνητικές προσπάθειες για την κατανόηση της σύνθετης θερμομηχανικής συμπεριφοράς και της ενεργειακής απόδοσης των ενεργειακών γεωκατασκευών. Οι προσπάθειες αυτές περιλαμβάνουν πειράματα πλήρους κλίμακας ([2], [5], [6]), και μικρής κλίμακας ([7]–[10]). Ακόμη, έχουν δημοσιευθεί αριθμητικές μελέτες που διερευνούν τη συμπεριφορά μεμονωμένων πασσάλων και ομάδων πασσάλων με τη μέθοδο φορτίου-μετατόπισης (load transfer approach) [11]–[13]) καθώς και με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων ([2], [14]–[20].

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα δοκιμαστικών φορτίσεων (Amatya et al.[21]), οι θερμοκρασιακές μεταβολές που ασκούνται στο πάσσαλο, μπορεί να θεωρηθούν ομοιόμορφες κατά μήκος του πασσάλου, εκτός από τα πρώτα μέτρα κοντά στην επιφάνεια. Παρατηρείται επίσης ότι ο πάσσαλος όταν θερμαίνεται ή ψύχεται, διαστέλλεται ή συστέλλεται αντίστοιχα, σε σχέση με το περιβάλλον έδαφος [2], [5]. Η αντίσταση που ασκείται στη θερμική αυτή μετακίνηση μέσω της πλευρικής τριβής, της αντίδρασης της βάσης και της κεφαλής του πασσάλου εξαρτάται από τη δυσκαμψία του εδάφους και της υπερκείμενης κατασκευής [3]. Ακόμη, οι τάσεις που προκαλούνται στο πάσσαλο λόγω των θερμικών φορτίων που δέχεται επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος της θερμικής φόρτισης και τις θερμικές ιδιότητες του εδάφους [21]. Πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι όταν ο πάσσαλος θερμαίνεται, οι αξονικές τάσεις γίνονται περισσότερο θλιπτικές, ενώ όταν ψύχεται γίνονται λιγότερο θλιπτικές και μπορεί να οδηγήσουν και σε εφελκυσμό του πασσάλου [21]. Παρόλα αυτά στη βιβλιογραφία αναφέρονται και περιπτώσεις στις οποίες ο πάσσαλος όταν θερμαίνεται μπορεί να δεχτεί εφελκυστικές τάσεις [14], [20]. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στις θερμικές ιδιότητες του εδάφους και συγκεκριμένα στη μεγάλη τιμή του συντελεστή διόγκωσης του εδάφους.

Οι Goode & McCartney [7], μελέτησαν με πειράματα σε φυγοκεντριστή τη θερμομηχανική συμπεριφορά πασσάλου με ελεύθερη και δεσμευμένη κεφαλή, σε αμμώδες έδαφος. Παρατήρησαν αύξηση των αξονικών τάσεων της τάξης του 50% στον πάσσαλο με δεσμευμένη κεφαλή σε σχέση με τον πάσσαλο με ελεύθερη κεφαλή που οφείλεται στο γεγονός ότι η δέσμευση εμποδίζει τη θερμική διόγκωση του πασσάλου κατά τη θέρμανση και προκαλείται μεγάλη αύξηση των θλιπτικών τάσεων. Αντίθετα, η θερμική παραμόρφωση του πασσάλου άρα και η κατακόρυφη μετακίνησή του είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της ελεύθερης κεφαλής όπου ο πάσσαλος μπορεί ελεύθερα να διογκώνεται κατά τη διάρκεια της θέρμανσης.

Το έδαφος, κατά τη λειτουργία του συστήματος ψύξης-θέρμανσης του πασσάλου δέχεται με τη σειρά του θερμικά φορτία που μεταβάλλουν τη θερμοκρασία του. Η μεταβολή αυτή ενδέχεται να προκαλέσει μη αντιστρεπτές ογκομετρικές παραμορφώσεις σε άμμους [22] και αργίλους [23], και να οδηγήσει σε

ανύψωση ή καθίζηση του πασσάλου μεταβάλλοντας τη διατμητική αντίσταση κατά μήκος του πασσάλου [24], ενώ ταυτόχρονα επηρεάζεται και η συμπεριφορά της αιχμής του πασσάλου [21]. Η επιρροή του συντελεστή θερμικής διόγκωσης του εδάφους στη θερμομηχανική συμπεριφορά του πασσάλου μελετήθηκε από τους Bodas Freitas et al. [14] και Gawecka et al. [18] για συνθήκες μόνιμης θέρμανσης (steady state heating) και μη μόνιμης ψύξης (transient cooling) αντίστοιχα. Και οι δύο μελέτες αναφέρονται σε πάσσαλο με ελεύθερη κεφαλή σε αργιλικό έδαφος. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η επιρροή του θερμικού συντελεστή διόγκωσης του εδάφους μεταβάλλει σημαντικά τη θερμομηχανική συμπεριφορά του πασσάλου. Σημαντική παράμετρος που μπορεί να διαφοροποιήσει το θερμοκρασιακό πεδίο τόσο του εδάφους όσο και των στοιχείων της θεμελίωσης είναι οι θερμικές συνοριακές συνθήκες που επιβάλει η υπερκείμενη κατασκευή στο σύστημα θεμελίωσης-εδάφους οι οποίες σύμφωνα με τους Bourne-Webb et al. [20] επηρεάζουν την απόκριση της θεμελίωσης στους επερχόμενους κύκλους ψύξης και θέρμανσης. Όλα τα παραπάνω έχουν αντίκτυπο στη λειτουργικότητα και ασφάλεια του πασσάλου. Οι Ng et al. [8] πραγματοποίησαν πειράματα σε φυγοκεντριστή και εξέτασαν την επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας στη φέρουσα ικανότητα του πασσάλου σε μέσης πυκνότητας κορεσμένη άμμο και παρατήρησαν αύξηση 13% και 30% της φέρουσας ικανότητας του πασσάλου για αύξηση της θερμοκρασίας κατά 15ºC και 30ºC αντίστοιχα, ενώ σύμφωνα με τους Tsetoulidis et al. [15] η θέρμανση και ψύξη του πασσάλου προκαλούν μικρές μόνο μεταβολές στη φέρουσα ικανότητα του πασσάλου οι οποίες οφείλονται στην πρώτη περίπτωση στην αύξηση και στη δεύτερη περίπτωση στη μείωση των ορθών και διατμητικών τάσεων που ασκούνται στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους.

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τα αποτελέσματα θερμομηχανικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση κώδικα πεπερασμένων στοιχείων και αφορούν στη διερεύνηση της θερμομηχανικής συμπεριφοράς μεμονωμένου ενεργειακού πασσάλου που υπόκεινται σε αξονική φόρτιση. Εξετάζεται η επίδραση: i) της χρονικής διάρκειας εφαρμογής του θερμικού φορτίου και ii) του συντελεστή θερμικής διόγκωσης του εδάφους στη μηχανική συμπεριφορά του πασσάλου. Επίσης, διερευνάται η επίδραση της θερμικής φόρτισης στη φέρουσα ικανότητα του πασσάλου.

2. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

2.1. Αριθμητικό προσομοίωμα

Οι αριθμητικές αναλύσεις που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS. Θεωρήθηκε πάσσαλος κυκλικής διατομής, με δεσμευμένη κεφαλή, μήκους L=30m και διαμέτρου D=1m, σε κορεσμένο αμμώδες έδαφος. Στον πάσσαλο εφαρμόστηκαν μόνο κατακόρυφα φορτία επομένως κρίθηκε κατάλληλη η αξονοσυμμετρική προσομοίωση του προβλήματος. Για την πραγματοποίηση των αριθμητικών αναλύσεων έγιναν οι εξής παραδοχές: i) θεωρήθηκε ομοιόμορφη θερμοκρασία κατά μήκος του πασσάλου, ii) θεωρήθηκε ότι η υπερκείμενη κατασκευή είναι θερμικά πλήρως μονωμένη και επομένως δεν υπάρχει ροή θερμότητας μεταξύ κτιρίου και συστήματος πασσάλου-εδάφους.

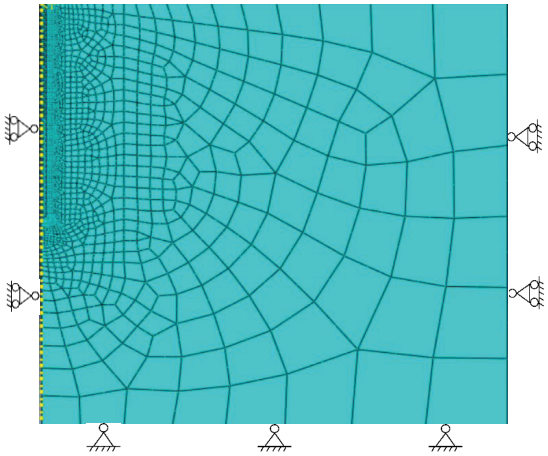
Η μηχανική συμπεριφορά του εδάφους προσομοιώθηκε ως γραμμικά ελαστική – τέλεια πλαστική με κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb. Επιλέχθηκαν οι ακόλουθες τυπικές τιμές μηχανικών παραμέτρων για το έδαφος: γωνία διατμητικής αντοχής φ = 30º, γωνία διαστολής ψ = 0.1 º, μέτρο Young E_s = 30 MPa, λόγος Poisson v_s = 0.3, φαινόμενο ειδικό βάρος γ_s = 20 kN/m^3. Ο πάσσαλος προσομοιώθηκε γραμμικά ελαστικός με μέτρο ελαστικότητας E_p = 2.9 GPa, λόγο Poisson v_p = 0.1, φαινόμενο ειδικό βάρος γ_p = 25 kN/m^3. Οι τιμές των θερμικών ιδιοτήτων του εδάφους επιλέχθηκαν με βάση αντίστοιχες τιμές από την υπάρχουσα βιβλιογραφία, όπου προέκυψε ότι το εύρος των τιμών του συντελεστή θερμικής διόγκωσης για αμμώδες έδαφος κυμαίνεται μεταξύ 10 - 30·10^{-6} m/m/K ([16], [17], [19]). Με σκοπό να μελετηθεί η επιρροή του συντελεστή θερμικής διόγκωσης για αμμώδη εδάφη θεωρήθηκε σκόπιμο να μελετηθούν τιμές με εύρος 0-30·10^{-6} m/m/K. Στον πίνακα 1 φαίνονται οι θερμικές ιδιότητες του εδάφους του πασσάλου και οι εργασίες από τις οποίες επιλέχθηκαν οι διαφορετικές τιμές του συντελεστή θερμικής διόγκωσης του εδάφους.

Πίνακας 1: Θερμικές ιδιότητες εδάφους και πασσάλου

Θερμικές ιδιότητες	Άμμος	Πάσσαλος
Συντελεστής θερμικής διόγκωσης, α: με/K	0, 5[1], 10[2], 20[1], 30[3]	10
Θερμική αγωγιμότητα, λ: W/mK	2.5	1.8
Συντελεστής ειδικής θερμότητας, C: J/kg/K	1200	1000

[1]Rotta Loria & Laloui 2017; [2] Jeong et al., 2014; [3] Salciarini et al., 2015

Ο κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση (Σχήμα 1) είχε ύψος και πλάτος ίσο με 60m. Χρησιμοποιήθηκαν 8-κομβα τετράπλευρα αξονοσυμμετρικά στοιχεία. Για τον καθορισμό των κόμβων στην περιοχή του πασσάλου χρησιμοποιήθηκε διακριτοποίηση της τάξης 0.2 μέτρων, ενώ για το έδαφος επιλέχθηκε διακριτοποίηση, η οποία ξεκινάει από 0.1 έως 0.2 μέτρα στην περιοχή περιμετρικά του πασσάλου και καταλήγει μέχρι τα 5 έως 10 μέτρα στην άκρη του εδαφικού προφίλ μακριά από τον πάσσαλο. Συνολικά ο κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων αποτελείται από 3347 στοιχεία και 10846 κόμβοι.



Σχήμα 1: Κάνναβος πεπερασμένων στοιχείων αριθμητικού προσομοιώματος

Στο κάτω όριο του καννάβου δεσμεύτηκαν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας (άρθρωση), ενώ στα πλευρικά όρια δεσμεύτηκε η μετακίνηση μόνο ως προς την οριζόντια διεύθυνση (κύλιση). Θεωρήθηκε ότι το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται στην επιφάνεια και για τον υπολογισμό των αρχικών γεωστατικών τάσεων επιλέχθηκε συντελεστής ωθήσεων σε ηρεμία K_o = 1. Η μηχανική φόρτιση επιβλήθηκε στην κεφαλή του πασσάλου με μορφή καταναγκασμένης μετακίνησης (displacement loading) σταθερής σε ολόκληρη τη διάρκεια των θερμομηχανικών αναλύσεων. Θεωρήθηκε σταθερό αρχικό θερμοκρασιακό πεδίο με θερμοκρασία 15^{o}C για όλα τα στοιχεία του πασσάλου και του εδάφους στο ξεκίνημα της ανάλυσης. Οι θερμικές συνοριακές συνθήκες ορίστηκαν με τρόπο που επιτρέπει τη διατήρηση της θερμοκρασίας αυτής στο κάτω όριο και στα πλευρικά όρια του καννάβου σε όλη τη διάρκεια της ανάλυσης ενώ η γραμμή συμμετρίας ορίστηκε αδιάβατη. Η διεπιφάνεια εδάφους πασσάλου μοντελοποιήθηκε με την τεχνική ‘’penalty’’, με γωνία τριβής ίση με τη γωνία διατμητικής αντοχής του εδάφους χωρίς να επιτρέπεται η αποκόλληση των δύο επιφανειών.

2.2. Βήματα θερμικών και θερμομηχανικών αναλύσεων

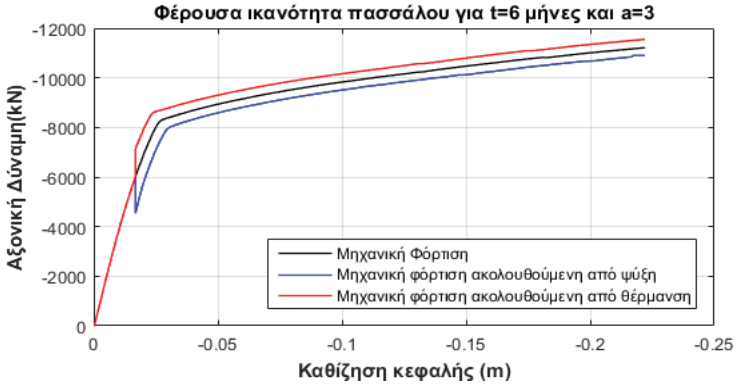
Η προσομοίωση των θερμικών φορτίων έγινε σε ξεχωριστή θερμική ανάλυση στην οποία επιβλήθηκαν οι θερμοκρασιακές διαφορές στα στοιχεία του πασσάλου. Πραγματοποιήθηκαν θερμικές αναλύσεις με κατάσταση μη μόνιμής ροής (transient state) και μόνιμης ροής θερμότητας (steady state) μεταξύ πασσάλου και εδάφους. Ο κάνναβος που χρησιμοποιήθηκε στις θερμικές αναλύσεις είχε την ίδια διακριτοποίηση και χρησιμοποιήθηκαν 8-κομβα τετράπλευρα αξονοσυμμετρικά στοιχεία μεταφοράς

θερμότητας. Τα θερμοκρασιακά πεδία που υπολογίστηκαν από την ανάλυση θερμότητας στη συνέχεια εισήχθησαν στα αντίστοιχα βήματα της μηχανικής ανάλυσης ώστε να υπολογιστεί η μηχανική απόκριση του πασσάλου για τις συγκεκριμένες θερμοκρασιακές μεταβολές. Στον πάσσαλο επιβλήθηκε αρχικά ψύξη με ΔΤ = -15 ºC, και στη συνέχεια θέρμανση με ΔΤ = +30 ºC με σταθερό πάντα μηχανικό φορτίο.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Γενική επισκόπηση

Εξετάζεται η μηχανική συμπεριφορά πασσάλου που υπόκειται αρχικά σε μηχανική και στη συνέχεια σε θερμική φόρτιση. Οι κύκλοι ψύξης και θέρμανσης εφαρμόστηκαν σε πάσσαλο που λειτουργεί με αξονικό φορτίο ίσο με το μισό του φορτίο αστοχίας. Αρχικά η φέρουσα ικανότητα υπολογίστηκε με εξισώσεις υπολογισμού της φέρουσας ικανότητας πασσάλου σε αμμώδες έδαφος [25] και προέκυψε ίση με Q_{ult} = 11900 kN. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε στο πρόγραμμα η φέρουσα ικανότητα του πασσάλου αυξάνοντας το φορτίο της κεφαλής του πασσάλου μέχρι την αστοχία. Προέκυψε η καμπύλη φορτίου-μετατόπισης του Σχήματος 2 η οποία βρίσκεται σε πολύ ικανοποιητική συμφωνία με την παραπάνω θεωρητικά υπολογισμένη φέρουσα ικανότητα. Στους υπολογισμούς που παρουσιάζονται στη συνέχεια θεωρήθηκε φορτίο αστοχίας Q_{ult} = 12000 kN. Επιλέχθηκε ως φορτίο λειτουργίας του πασσάλου το μισό του φορτίου αστοχίας ίσο με Q = 6000 kN (συντελεστής ασφαλείας ίσος προς 2).



Σχήμα 2: Καμπύλες αξονικού φορτίου-καθίζησης

Εξετάστηκε η επίδραση της θερμικής φόρτισης στην αξονική φέρουσα ικανότητα του πασσάλου φορτίζοντας το πάσσαλο μέχρι την αστοχία του για διαφορετικά θερμικά σενάρια. Διερευνήθηκε επίσης, η επιρροή της χρονικής διάρκειας εφαρμογής του θερμικού φορτίου και του συντελεστή θερμικής διόγκωσης του εδάφους.

3.2. Επιρροή της θερμικής φόρτισης στην αξονική φέρουσα ικανότητα του πασσάλου

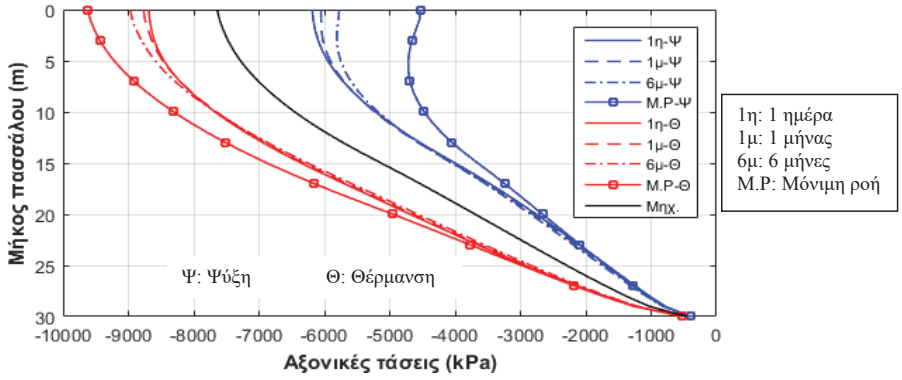
Εξετάστηκαν τα εξής διαφορετικά σενάρια: i) αξονική φόρτιση μέχρι την αστοχία χωρίς την επιβολή θερμικής φόρτισης ii) επιβολή του φορτίου λειτουργίας του πασσάλου, ακολουθούμενου από ψύξη του πασσάλου στους 0ºC με σταθερό φορτίο στην κεφαλή, και τελικά αύξηση του μηχανικού φορτίου μέχρι την αστοχία σε σταθερή θερμοκρασία, iii) επιβολή του φορτίου λειτουργίας του πασσάλου, ακολουθούμενου από θέρμανση του πασσάλου στους 30ºC με σταθερό φορτίο στην κεφαλή, και τελικά αύξηση του μηχανικού φορτίου μέχρι την αστοχία σε σταθερή θερμοκρασία iv) επιβολή του φορτίου λειτουργίας του πασσάλου, ακολουθούμενου από ψύξη του πασσάλου στους 0ºC, θέρμανση στους 30ºC και ξανά ψύξη στους 15ºC με σταθερό φορτίο στην κεφαλή ώστε να επανέλθει στην αρχική του θερμοκρασία, και τελικά αύξηση του μηχανικού φορτίου μέχρι την αστοχία υπό σταθερή θερμοκρασία. Οι καμπύλες φορτίου-μετατόπισης που προέκυψαν φαίνονται στο Σχήμα 2. Συγκεκριμένα με την ολοκλήρωση του κύκλου ψύξης και θέρμανσης που ο πάσσαλος επανέρχεται στην αρχική του θερμοκρασία, η φέρουσα ικανότητά του παραμένει αμετάβλητη και οι αντίστοιχες καμπύλες ταυτίζονται [περιπτώσεις (i) και (iv)], γι' αυτό στο Σχήμα 2 διακρίνεται μόνο η καμπύλη του μηχανικού φορτίου. Στις περιπτώσεις ii) και iii) υπάρχει μια μικρή μεταβολή της φέρουσας ικανότητας

του πασσάλου εξαιτίας της θερμικής φόρτισης αφού παρατηρείται μείωση κατά 3% στην ψύξη και αύξηση 2.8% στη θέρμανση. Η μικρή αυτή μεταβολή οφείλεται στην συστολή ή διαστολή του πασσάλου και του εδάφους. Κατά τη διάρκεια της ψύξης, ο πάσσαλος και το έδαφος συστέλλονται. Μειώνονται έτσι οι ορθές τάσεις στη διεπιφάνεια του πασσάλου με αποτέλεσμα να μειώνεται η διατμητική αντοχή στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους. Η μείωση αυτή της διατμητικής αντοχής οδηγεί σε μείωση της αξονικής φέρουσας ικανότητας του πασσάλου. Το αντίθετο συμβαίνει όταν ο πάσσαλος θερμαίνεται. Ο πάσσαλος και το έδαφος τότε διαστέλλονται, αυξάνονται οι ορθές και διατμητικές τάσεις στη διεπιφάνεια με αποτέλεσμα να αυξάνεται η αξονική φέρουσα ικανότητα του πασσάλου. Παρατηρήθηκε επίσης, ότι χρειάστηκε μεγαλύτερη κατακόρυφη μετακίνηση για να αναπτυχθεί πλήρως η αντίσταση του πασσάλου κατά τη διάρκεια ψύξης απ' ότι κατά τη διάρκεια θέρμανσης το οποίο οφείλεται στην ανύψωση της αιχμής του πασσάλου όταν ψύχεται η οποία προστίθεται στην καθίζηση του πασσάλου λόγω της μηχανικής φόρτισης. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν δημοσιευτεί από τους Tsetoulidis et al. [15] οι οποίοι μελέτησαν την επιρροή της θερμικής φόρτισης στη φέρουσα ικανότητα πασσάλου με ελεύθερη κεφαλή, σε αργιλικό έδαφος και παρατήρησαν αύξηση 3% στην ψύξη και 1.3% στη θέρμανση του πασσάλου. Αντίθετα, οι Ng et al. [8] με πειράματα που πραγματοποίησαν σε φυγοκεντριστή σε μέσης πυκνότητας κορεσμένη άμμο, παρατήρησαν ότι η αύξηση της θερμοκρασίας του πασσάλου αυξάνει σημαντικά τη φέρουσα ικανότητα του. Συγκεκριμένα, για αύξηση της θερμοκρασίας κατά 15°C και κατά 30°C, η φέρουσα ικανότητα αυξήθηκε κατά 13% και 30% αντίστοιχα.

3.3. Επιρροή της χρονικής διάρκειας της θερμικής φόρτισης

Οι περισσότερες δημοσιευμένες αριθμητικές μελέτες εξετάζουν την επιρροή της θερμικής φόρτισης στην απόκριση του πασσάλου θεωρώντας συνθήκες μόνιμης ροής θερμότητας (steady state conditions). Στην πραγματικότητα όμως, ένα τυπικό σύστημα ψύξης ή θέρμανσης (π.χ καλοριφέρ αερίου ή πετρελαίου, air-condition) λειτουργεί με εύρος από κάποιες ώρες μέσα στην ημέρα έως και συνεχόμενους μήνες σε περιβάλλοντα ακραίων καιρικών συνθηκών. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση που για την ψύξη και θέρμανση του κτιρίου χρησιμοποιούνται ενεργειακές γεωτεχνικές κατασκευές. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να διερευνηθεί πώς επηρεάζει η χρονική διάρκεια λειτουργίας του συστήματος ψύξης-θέρμανσης τη μηχανική συμπεριφορά του πασσάλου.

Εξετάστηκαν τέσσερις χρόνοι θερμικής φόρτισης (1 ημέρα: 1d, 1 μήνας: 1m, 6 μήνες: 6m, συνθήκες μόνιμης ροής: St). Και για τους τέσσερις χρόνους εφαρμόστηκε αρχικά ψύξη του πασσάλου στους 0 °C και στη συνέχεια θέρμανσή του στους 30 °C, υπό σταθερό μηχανικό φορτίο, όπως περιεγράφηκε στην ενότητα 2.2. Το Σχήμα 3 δίνει τις τιμές των αξονικών τάσεων κατά μήκος του πασσάλου. Λόγω του περιορισμού που επιβάλει η δέσμευση, δεν είναι δυνατή η κατακόρυφη μετακίνηση της κεφαλής του πασσάλου κατά τη διάρκεια της θερμικής φόρτισης με αποτέλεσμα να συγκεντρώνονται μεγάλες τάσεις στη κεφαλή οι οποίες μειώνονται με το μήκος.



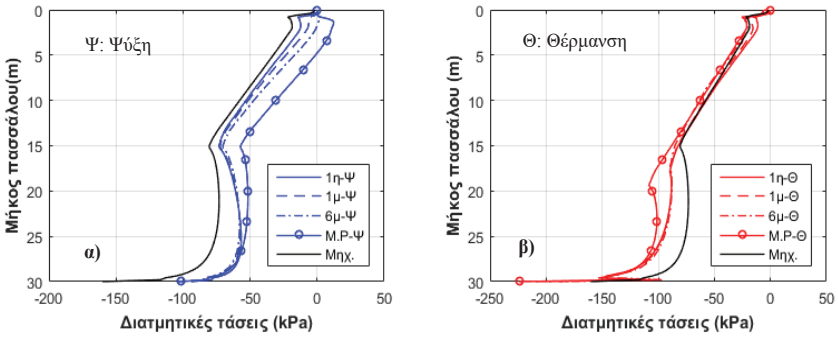
Σχήμα 3: Κατανομή αξονικών τάσεων με το βάθος

Η ψύξη και θέρμανση του πασσάλου διαφοροποιεί σημαντικά το μέγεθος των αξονικών φορτίων του πασσάλου (Σχήμα 3). Ο πάσσαλος όταν ψύχεται δέχεται εφελκυστικές τάσεις που οφείλονται στην αξονική θερμική συστολή του. Συγκεκριμένα, καθώς ψύχεται, το περιβάλλον έδαφος και η δέσμευση της κεφαλής του δεν του επιτρέπουν να συσταλεί ελεύθερα με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται

εφελκυστικές πρόσθετες αξονικές τάσεις στο πάσσαλο, που μειώνουν τις θλιπτικές αξονικές τάσεις που προκαλεί το μηχανικό φορτίο. Το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση της θέρμανσης του πασσάλου. Ο πάσσαλος τώρα τείνει να διασταλεί, όμως η δέσμευση στην κεφαλή του και η αντίσταση του περιβάλλοντος εδάφους προκαλούν επιπλέον θλιπτικά φορτία με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι θλιπτικές αξονικές τάσεις του πασσάλου. Είναι φανερό από το ίδιο σχήμα, ότι η μεταβολή των τάσεων κατά μήκος του πασσάλου επηρεάζεται σημαντικά από τη χρονική διάρκεια επιβολής της θερμικής φόρτισης και όσο μεγαλύτερη η χρονική διάρκεια τόσο μεγαλύτερη η μεταβολή των αξονικών και διατμητικών τάσεων. Παρατηρούμε ότι για χρονική διάρκεια θερμικής φόρτισης 1 ημέρα και 1 μήνα η μέγιστη μεταβολή του αξονικού φορτίου είναι σχεδόν η ίδια (19% και 20% αντίστοιχα), ενώ μεγαλύτερη είναι η μεταβολή για διάρκεια 6 μηνών (24,4%), και ακόμα μεγαλύτερη για συνθήκες μόνιμης ροής (40,8%). Στην περίπτωση της θέρμανσης, οι αντίστοιχες μεταβολές είναι μικρότερες και συγκεκριμένα 13,8% για 1 ημέρα, 14.8% για 1 μήνα, 17.4% για 6μήνες και 26% για συνθήκες μόνιμης ροής.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι η θεώρηση μόνιμης ροής θερμότητας στο σχεδιασμό ενεργειακών πασσάλων μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικά συντηρητικό σχεδιασμό αυξάνοντας έτσι το κόστος κατασκευής της θεμελίωσης.

Στα Σχήματα 4α και 4β παρουσιάζονται οι τιμές των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους. Παρατηρείται ότι η συστολή του πασσάλου κατά τη ψύξη, προκαλεί μείωση των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους σε ολόκληρο το μήκος του πασσάλου (Σχήμα 4α). Η μείωση αυτή οφείλεται στη δέσμευση της κεφαλής του πασσάλου. Ο πάσσαλος καθώς ψύχεται δεν μπορεί να συσταλεί ελεύθερα ενώ αντίθετα το έδαφος που τον περιβάλει συστέλλεται. Οι πρόσθετες διατμητικές τάσεις που οφείλονται στη μετατόπιση του εδάφους σε σχέση με τον πάσσαλο, έχουν φορά προς τα κάτω και επομένως μειώνουν τις αρχικές διατμητικές τάσεις λόγω μηχανικού φορτίου. Στην περίπτωση μάλιστα της μόνιμης ροής θερμότητας, η μείωση των διατμητικών τάσεων σε βάθη μέχρι τα πρώτα 5 μέτρα είναι τόσο μεγάλη ώστε να αλλάξουν φορά. Το αντίθετο συμβαίνει όταν ο πάσσαλος θερμαίνεται (Σχήμα 4β), όπου αυξάνονται οι διατμητικές τάσεις κυρίως στο κάτω μισό μέρος του πασσάλου. Η παραπάνω συμπεριφορά είναι αντίθετη από αυτήν που παρατηρήθηκε από τους Tsetoulidis et al. [15] για πασσάλους με ελεύθερη κεφαλή.



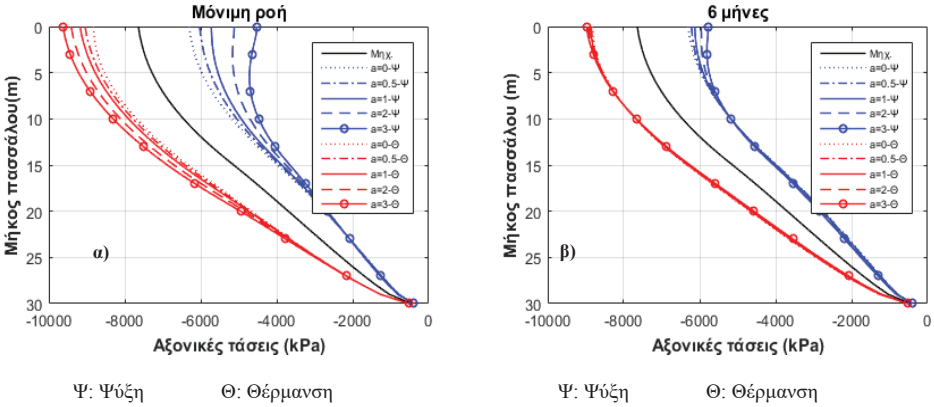
Σχήμα 4: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος στη διεπιφάνεια για: α) ψύξη, και β) θέρμανση του πασσάλου.

3.4. Επιρροή του συντελεστή θερμικής διόγκωσης του εδάφους

Διερευνήθηκε η επιρροή του συντελεστή θερμικής διόγκωσης του εδάφους (α_{soil}) στη θερμομηχανική συμπεριφορά του πασσάλου. Επιλέχθηκαν πέντε τιμές συντελεστών θερμικής διόγκωσης για το έδαφος: 0, 5με/K, 10με/K, 20με/K και 30με/K, οι οποίες είναι αντιπροσωπευτικές για αμμώδη εδάφη (Βλέπε πίνακα 1) Για όλες τις περιπτώσεις εφαρμόστηκαν τα βήματα της ανάλυσης που περιεγράφηκαν στην παράγραφο 2.2. Αρχικά εφαρμόστηκε μηχανική φόρτιση και ακολούθησε ψύξη με ΔΤ=-15ºC και θέρμανση με ΔΤ=30ºC, υπό σταθερό μηχανικό φορτίο. Οι αριθμητικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για τέσσερις διαφορετικές χρονικές διάρκειες θερμικής φόρτισης (1 ημέρα, 1μήνας, 6 μήνες, συνθήκες μόνιμης ροής). Στα Σχήματα 5α και 5β παρουσιάζονται οι κατανομές των αξονικών τάσεων κατά μήκος του πασσάλου και στα Σχήματα 6α και 6β παρουσιάζονται οι διατμητικές τάσεις στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους, μόνο για τις περιπτώσεις χρονικής διάρκειας φόρτισης 6

μηνών και μόνιμης ροής θερμότητας, καθώς για μικρότερη χρονική διάρκεια οι θερμικές τάσεις του πασσάλου ήταν ανεξάρτητες του θερμικού συντελεστή διόγκωσης του εδάφους.

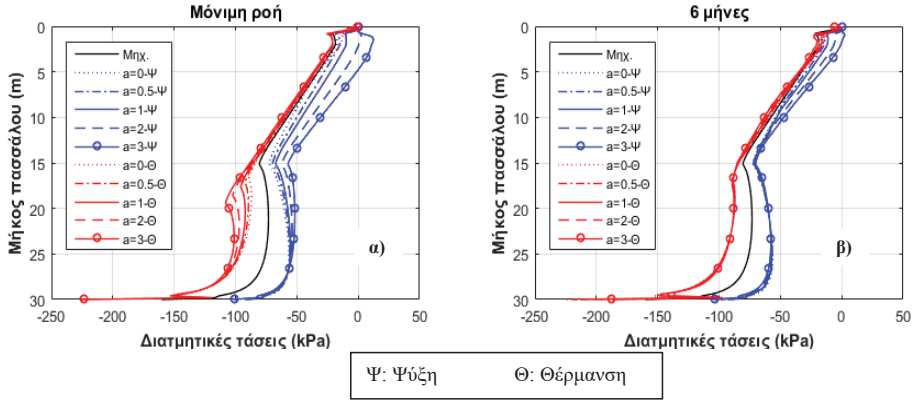
Από τα Σχήματα 5α και 5β, φαίνεται καθαρά η επίδραση του συντελεστή θερμικής διόγκωσης του εδάφους στις αξονικές τάσεις του πασσάλου. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τόσο μεγαλύτερη είναι η μεταβολή των αξονικών τάσεων. Όταν δηλαδή το έδαφος είναι περισσότερο διασταλτικό, τότε η μείωση των αξονικών τάσεων στη ψύξη και αντίστοιχα η αύξηση στη θέρμανση είναι πιο έντονες. Είναι ξεκάθαρο επίσης, ότι η επίδραση του θερμικού συντελεστή διόγκωσης του εδάφους είναι μεγαλύτερη όταν αυξάνεται η διάρκεια της θερμικής φόρτισης. Μια ακόμα σημαντική παρατήρηση είναι το γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της ψύξης του πασσάλου, η μεταβολή του θερμικού συντελεστή διόγκωσης του εδάφους προκαλεί μεγαλύτερες μεταβολές στις αξονικές τάσεις σε σύγκριση με τις αντίστοιχες μεταβολές όταν ο πάσσαλος θερμαίνεται, κάτι που σχετίζεται με τη σημαντική μείωση των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους κατά τη διάρκεια της θέρμανσης.



Ψ: Ψύξη Θ: Θέρμανση Ψ: Ψύξη Θ: Θέρμανση

Σχήμα 5: Κατανομή αξονικών τάσεων με το βάθος για: α) συνθήκες μόνιμης ροής θερμότητας και β) διάρκεια θερμικής φόρτισης 6 μήνες.

Στα Σχήματα 6α και 6β παρατηρείται ότι η επίδραση του θερμικού συντελεστή διόγκωσης του εδάφους στις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους είναι σημαντική μόνο στην περίπτωση της ψύξης και κυρίως στο πρώτο μισό του πασσάλου, όπου όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής τόσο μικρότερες είναι οι διατμητικές τάσεις. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της θέρμανσης, η τιμή του συντελεστή διόγκωσης του εδάφους, δεν επηρεάζει τις αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις παρά μόνο στο κάτω μισό του πασσάλου σε συνθήκες μόνιμης ροής θερμότητας.



Σχήμα 6: Κατανομή διατμητικών τάσεων με το βάθος για: α) συνθήκες μόνιμης ροής θερμότητας και β) διάρκεια θερμικής φόρτισης 6 μήνες.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Διερευνήθηκε η επίδραση της θερμικής φόρτισης στη μηχανική συμπεριφορά πασσάλου με δεσμευμένη κεφαλή, που βρίσκεται τοποθετημένος σε αμμώδες έδαφος. Οι αριθμητικές αναλύσεις έγιναν με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Αρχικά εξετάστηκε η επίδραση των κύκλων ψύξης και θέρμανσης στη φέρουσα ικανότητα του πασσάλου. Στη συνέχεια διερευνήθηκε η επίδραση της χρονικής διάρκειας εφαρμογής των θερμικών φορτίων και του συντελεστή θερμικής διόγκωσης του εδάφους στη μηχανική συμπεριφορά του πασσάλου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εν λόγω έρευνα οδήγησαν στα εξής συμπεράσματα:

α) Η εφαρμογή των κύκλων ψύξης και θέρμανσης έχει μικρή μόνο επιρροή στην αξονική φέρουσα ικανότητα του πασσάλου. Οι όποιες μεταβολές της φέρουσας ικανότητας οφείλονται στη μείωση ή την αύξηση των ορθών και διατμητικών τάσεων που ασκούνται στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους στη διάρκεια ψύξης και θέρμανσης αντίστοιχα. Φαίνεται επίσης, ότι η εφαρμογή των θερμικών φορτίων προκαλεί μεγάλες μεταβολές στις αξονικές τάσεις του πασσάλου καθ' ύψος. Συγκεκριμένα, όταν ο πάσσαλος ψύχεται, αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις οι οποίες οφείλονται στο περιορισμό που προκαλεί η δέσμευση στη κεφαλή, καθώς και στη θερμική συστολή του εδάφους, που προκαλεί μείωση των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους, σε όλο το μήκος του πασσάλου. Αντίθετα, η θέρμανση του πασσάλου έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των θλιπτικών τάσεων που ασκούνται στο πάσσαλο. Στην περίπτωση αυτή, η θέρμανση τείνει να προκαλέσει διαστολή του πασσάλου η οποία όμως παρεμποδίζεται από την δέσμευση στη κεφαλή με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι θλιπτικές τάσεις στο πάσσαλο, ενώ τέλος η θερμική διαστολή του εδάφους, αυξάνει τις διατμητικές τάσεις στη διεπιφάνεια.

β) Η διάρκεια της θερμικής φόρτισης επηρεάζει σημαντικά τη μηχανική συμπεριφορά του πασσάλου. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια τόσο μεγαλύτερες είναι οι μεταβολές των αξονικών και διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους. Ειδικότερα, για χρονική διάρκεια έως 6 μήνες οι μεταβολές είναι παρόμοιες, ενώ στην περίπτωση που θεωρηθεί μόνιμη ροή θερμότητας (steady state) τότε οι αξονικές τάσεις του πασσάλου μεταβάλλονται κατά 40,8% στην ψύξη και 26% στη θέρμανση. Για το λόγο αυτό, πρέπει να τονιστεί ότι η θεώρηση μόνιμης ροής θερμότητας, παρότι έχει χρησιμοποιηθεί σε σημαντικό αριθμό μελετών, δεν αποτελεί ρεαλιστικό σενάριο και μπορεί να οδηγήσει σε συντηρητικό σχεδιασμό και σημαντική αύξηση του κόστους κατασκευής της θεμελίωσης με ενεργειακούς πασσάλους.

γ) Φαίνεται ξεκάθαρα, ότι όσο μεγαλύτερο συντελεστή θερμικής διόγκωσης έχει το έδαφος, τόσο περισσότερο μεταβάλλονται οι αξονικές και διατμητικές τάσεις στη διεπιφάνεια πασσάλου-εδάφους κατά την εφαρμογή της θερμικής φόρτισης. Στην περίπτωση μάλιστα της ψύξης, οι μεταβολές αυτές είναι ακόμη μεγαλύτερες, σε ολόκληρο το μήκος του πασσάλου. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει κατά το σχεδιασμό μιας θεμελίωσης με ενεργειακούς πασσάλους, να γίνεται σωστή επιλογή συντελεστή θερμικής διόγκωσης του εδάφους, καθώς η υποεκτίμηση ή η υπερεκτίμηση του μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες εκτιμήσεις της αλληλεπίδρασης μεταξύ πασσάλου και εδάφους, επομένως και σε λανθασμένο σχεδιασμό.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Brandl, H., 2006, "Energy foundations and other thermo-active ground structures," *Géotechnique*, vol. 56, no. 2, pp. 81–122.

[2] Laloui, L., Nuth, M., and Vulliet, L., 2006, "Experimental and numerical investigations of the behaviour of a heat exchanger pile," *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, vol. 30, no. 8, pp. 763–781.

[3] Bourne-Webb, P. J., 2013, "An overview of observed thermal and thermo-mechanical response of piled energy foundations," *Proc. Eur. Geotherm. Conf. Pisa, Italy*, pp. 1–8, 2013.

[4] Markiewicz, R., and Adam, D., 2009, "Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers," *Géotechnique*, vol. 59, no. 3, pp. 229–236.

[5] Bourne-Webb, P. J., Amatya, B., Soga, K., Amis, T., Davidson, C., andPayne, P., 2009, "Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles," *Géotechnique*, vol. 59, no. 3, pp. 237–248.

[6] Murphy, K. D., McCartney, J. S., and Henry, K. S., 2015, "Evaluation of thermo-mechanical and thermal behavior of full-scale energy foundations," *Acta Geotech.*, vol. 10, no. 2, pp. 179–

195.

[7] Goode J. C., and McCartney, J. S., 2014, “Evaluation of Head Restraint Effects on Energy Foundations,” *Proc. GeoCongress 2014 (GSP 234), ASCE, Reston, VA, USA*, pp. 2685–2694.

[8] Ng, C. W. W., Shi, C. , Gunawan, A., Laloui, L., and Liu, H. L., 2015, “Centrifuge modelling of heating effects on energy pile performance in saturated sand,” *Can. Geotech. J.*, vol. 52, no. 8, pp. 1045–1057.

[9] Nguyen, V. T., and Tang, A. M., 2017, “Long-term thermo-mechanical behavior of energy pile in dry sand,” *Acta Geotech.*, vol. 12, no. 4, pp. 729–737.

[10] Yavari, N. Ã., Tang, A. M., Pereira, J. M., and Hassen, G. Ã., 2016, “Mechanical behaviour of a small-scale energy pile in saturated clay,” *Géotechnique*, vol. 66, pp. 1–10.

[11] Péron, H., Knellwolf, C., and Laloui, L., 2011, “A method for the geotechnical design of heat exchanger piles,” *Proc. Am. Soc. Civ. Eng. Geo-Frontiers,* vol. 397, no. 48, pp. 470–479.

[12] Knellwolf, C., Peron, H., and Laloui, L., 2011, “Geotechnical Analysis of Heat Exchanger Piles,” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 137, no. 10, pp. 890–902.

[13] Suryatriyastuti, M. E., Mroueh, H., and Burlon, S., 2014, “A load transfer approach for studying the cyclic behavior of thermo-active piles,” *Comput. Geotech.*, vol. 55, pp. 378–391.

[14] Bodas Freitas, T. M., Cruz Silva F., and Bourne-Webb, P. J., 2013, “The response of energy foundations under thermo-mechanical loading,” *18th Intl Conf Soil Mech. Geotech. Eng. Paris, Intl. Soc. Soil Mech. Geotech. Eng.*, pp. 3347–3350.

[15] Tsetoulidis, C., Naskos, A., and Georgiadis, K., 2016, “Numerical investigation of the mechanical behaviour of single energy piles and energy pile groups,” *Proc. 1st Int. Conf. Energy Geotech. Kiel, Ger.*, pp. 569–575.

[16] Jeong, S., Lim, H., Lee, J. K., and Kim, J., 2014, “Thermally induced mechanical response of energy piles in axially loaded pile groups,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 71, pp. 608–615.

[17] Salciarini, D., Ronchi, F., Cattoni, E., and Tamagnini, C., 2013, “Thermomechanical Effects Induced by Energy Piles Operation in a Small Piled Raft,” *Int. J. Geomech.*, vol. 15, no. 2, pp. 1–14,.

[18] Gawecka, K. A., Taborda, D. M. G., Potts, D. M., Cui, W., Zdravković, L., and Kasri, M. S. H., 2017, “Numerical modelling of thermo-active piles in London Clay,” *Proc. Inst. Civ. Eng. - Geotech. Eng.*, vol. 170, no. 3, pp. 201–219.

[19] Rotta Loria A. F.,.and Laloui, L., 2017, “Displacement interaction among energy piles bearing on stiff soil strata,” *Comput. Geotech.*, vol. 90, pp. 144–154.

[20] Bourne-Webb, P. J., Bodas Freitas, T. M., and Assunção, R. M. F., 2015, “Soil – pile thermal interactions in energy foundations,” *Géotechnique*, vol. 66, pp. 1–5.

[21] Amatya, B., Soga, K., Bourne-Webb, P. J., Amis, T., and Laloui, L., 2012, “Thermo-mechanical behaviour of energy piles,” *Géotechnique*, vol. 62, no. 6, pp. 503–519.

[22] Agar, J., Morgenstern, N., and Scott, J., 1986, “Thermal expansion and pore pressure generation in oil sands.” Canadian Geotechnical Journal, pp. 327–333.

[23] Cekerevac, C., and Laloui, L., 2004, “Experimental study of thermal effects on the mechanical behaviour of a clay,” *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, vol. 28, no. 3, pp. 209–228.

[24] Di Donna, A., Rotta Loria, A. F., and Laloui, L., 2016, “Numerical study of the response of a group of energy piles under different combinations of thermo-mechanical loads,” *Comput. Geotech.*, vol. 72, pp. 126–142.

[25] Γεωργιάδης, Κ. και Γεωργιάδης, Μ., 2009, *“Στοιχεία Εδαφομηχανικής,.”* Εκδόσεις ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.

ΣΥΜΒΟΛΗ ΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΤΟΥ CO_2 ΣΤΗΝ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Απόστολος Αρβανίτης[1]*, Νικόλαος Κούκουζας[2], Βασιλική Γεμενή[2], Πέτρος Κουτσοβίτης[2]

[1]* Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.), Αχαρναί, Αττική
e-mail: arvanitis@igme.gr
[2] Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (Ε.Κ.Ε.Τ.Α.) - Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων (Ι.Δ.Ε.Π.), Μαρούσι, Αττική

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η γεωλογική αποθήκευση του CO_2 σε κατάλληλους περατούς γεωλογικούς σχηματισμούς (αλμυρούς υδροφορείς, εξαντλημένους ταμιευτήρες πετρελαίου/φυσικού αερίου) μεγάλου βάθους (>800 m), που υπόκεινται αδιαπέρατων πετρωμάτων («στεγανό κάλυμμα»), θεωρείται ως ένας αποτελεσματικός τρόπος μείωσης των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα και άμβλυνσης των δυσμενών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Η εισπίεση και αποθήκευση του CO_2 μπορεί να συμβάλλει και στην αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού. Το CO_2 παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι του νερού (π.χ. μεγαλύτερη διασταλτικότητα/συμπιεστότητα, χαμηλότερο ιξώδες, μεγαλύτερη ταχύτητα ροής για συγκεκριμένη βαθμίδα πίεσης, αυξημένη κινητικότητα, διαφορετική συμπεριφορά της ειδικής ενθαλπίας σε συνάρτηση με την πίεση και τη θερμοκρασία, υψηλότεροι ρυθμοί απόληψης θερμότητας, μικρότερη δραστικότητα ως διαλύτη) και καθίσταται ελκυστικό για τη χρήση του ως κυκλοφορούντος ρευστού (εργαζόμενου μέσου, working fluid) σε γεωθερμικά συστήματα. Έχουν διατυπωθεί διάφορες προτάσεις χρήσης του CO_2 στην εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας, οι οποίες όμως βρίσκονται σε ερευνητικό και πρώιμο στάδιο: (α) χρήση του υπερκρίσιμου CO_2 ως κυκλοφορούντος ρευστού στα Βελτιωμένα Γεωθερμικά Συστήματα (EGS), τα οποία χαρακτηρίζονται από περιορισμένη διαπερατότητα και κυκλοφορία ρευστών και απαιτείται αρχικά η διέγερση υπαρχουσών διαρρήξεων ή η δημιουργία νέων για αύξηση της διαπερατότητας, (β) έγχυση του υπερκρίσιμου CO_2 σε βαθύ αλμυρό υδροφορέα και σχηματισμός «Γεωθερμικού Θυσάνου CO_2» (CPG), που απορροφά θερμότητα από τον ταμιευτήρα και αξιοποιείται ενεργειακά, (γ) υβριδική προσέγγιση απόληψης θερμικής ενέργειας δύο σταδίων (αρχικά άλμης και στη συνέχεια άλμης και CO_2) από βαθύ αλμυρό υδροφορέα, (δ) χρήση του CO_2 ως ρευστού υποστήριξης της πίεσης ώστε να δημιουργηθούν αρτεσιανές πιέσεις για παραγωγή CO_2 και άλμης, ως ρευστών απόληψης και μεταφοράς θερμότητας, και (ε) διάλυση του CO_2 στην άλμη του ταμιευτήρα και ενεργειακή αξιοποίηση της εμπλουτισμένης σε CO_2 θερμής άλμης. Στην παρούσα εργασία παρατίθενται οι προαναφερθείσες προτάσεις συνδυασμού γεωλογικής αποθήκευσης του CO_2 και αξιοποίησης του γεωθερμικού δυναμικού και σημειώνονται τα πλεονεκτήματά τους. Οι τεχνολογίες που βασίζονται στο CO_2 δίνουν τη δυνατότητα επέκτασης της χρήσης της γεωθερμικής ενέργειας, ενώ παράλληλα βοηθούν στη μείωση του κόστους της διαδικασίας δέσμευσης και αποθήκευσης του CO_2. Επιπλέον, μπορούν να αποτελέσουν γέφυρα ανάμεσα στη σημερινή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, που κυριαρχείται από τα ορυκτά καύσιμα, και σε μια μελλοντική ηλεκτροπαραγωγή, βασισμένη στις ΑΠΕ. Παράλληλα, μπορούν να συντελέσουν στη μεταστροφή του CO_2 από έναν επιζήμιο παράγοντα σε έναν πολύτιμο πόρο για το μέλλον.

Λέξεις Κλειδιά: *γεωλογική αποθήκευση CO_2, γεωθερμία, Βελτιωμένα Γεωθερμικά Συστήματα, γεωθερμικός θύσανος CO_2, απόληψη θερμότητας*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

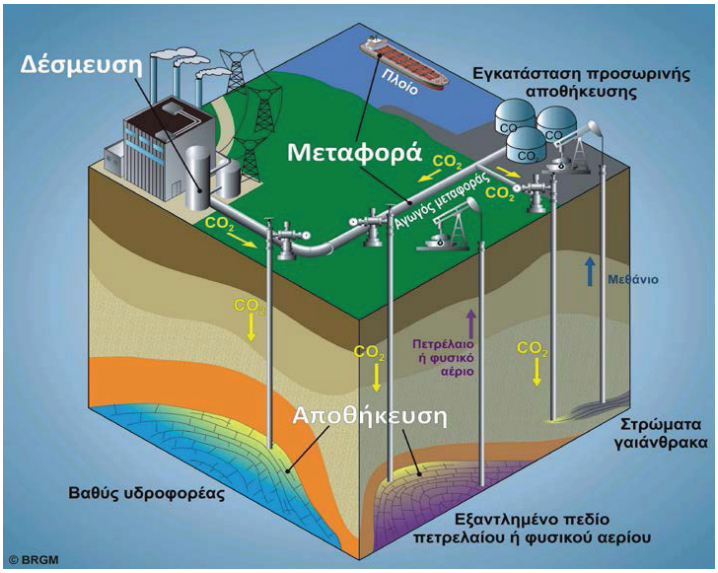
Από το 1850 και μετέπειτα, διαπιστώνεται μια ραγδαία αύξηση των εκπομπών CO_2 στην ατμόσφαιρα λόγω των ανθρώπινων δραστηριοτήτων (κυρίως από την καύση των ορυκτών καυσίμων), γεγονός που συντελεί στο «φαινόμενο του θερμοκηπίου» και την επακόλουθη κλιματική αλλαγή [1, 2]. Τόσο η τεχνολογία «Δέσμευσης και Αποθήκευσης του CO_2 (CO_2 Capture and Storage, CCS)» όσο και η ανάπτυξη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.) αποσκοπούν στη μείωση των εκπομπών του CO_2 στην ατμόσφαιρα, με την τεχνολογία CCS να συνιστά μια βραχυπρόθεσμη - μεσοπρόθεσμη λύση παρέχοντας τον απαραίτητο χρόνο για την ανάπτυξη των Α.Π.Ε. Η γεωθερμία αποτελεί μια καθαρή, ήπια, φιλική προς το περιβάλλον, σταθερή, συνεπής και αξιόπιστη Ανανεώσιμη Πηγή Ενέργειας, που μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στο ενεργειακό μίγμα. Τα τελευταία χρόνια, από το 2000 μέχρι σήμερα, έχουν διατυπωθεί διάφορες προτάσεις για την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας σε συνδυασμό με τη γεωλογική αποθήκευση του CO_2, επισημαίνοντας τα σχετικά πλεονεκτήματα.

2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΟΥ CO_2

Η γεωλογική αποθήκευση του CO_2 (CO_2 Geological Storage, CGS) αποτελεί τμήμα της αλυσίδας της τεχνολογίας «Δέσμευσης και Αποθήκευσης του CO_2 (CO_2 Capture and Storage, CCS)» [2]. Το CO_2, που παράγεται από μια βιομηχανία ή μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, δεσμεύεται με διάφορες τεχνικές (μετά την καύση, πριν την καύση, καύση με υψηλή συγκέντρωση O_2/CO_2), συμπιέζεται, αφυδατώνεται και μεταφέρεται με διαφόρους τρόπους (αγωγούς, βυτιοφόρα πλοία και φορτηγά μεγάλης χωρητικότητας, τρένα) στους χώρους αποθήκευσης (η μεταφορά με αγωγό είναι ο οικονομικότερος τρόπος, εξασφαλίζοντας συνεχή ροή μεγάλων ποσοτήτων υγρού ή υπερκρίσιμου CO_2). Το CO_2 αποθηκεύεται - μέσω μιας ή περισσοτέρων γεωτρήσεων εισπίεσης - σε κατάλληλους γεωλογικούς ταμιευτήρες, όπως: (α) εξαντλημένοι ταμιευτήρες πετρελαίου ή φυσικού αερίου, (β) υδροφορείς μεγάλου βάθους με ακατάλληλο αλμυρό νερό, (γ) βαθιά, μη εξορύσσιμα στρώματα γαιάνθρακα και (δ) άλλες επιλογές ήσσονος σημασίας, όπως βασάλτες, σχιστόλιθοι πετρελαίου, έγκοιλα (Εικόνα 1). Η πίεση έγχυσης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την πίεση στον ταμιευτήρα για να μετακινηθεί το υπάρχον ρευστό του ταμιευτήρα μακριά από το σημείο έγχυσης, χωρίς όμως αυτή να υπερβαίνει την τάση διάρρηξης των πετρωμάτων τόσο του ταμιευτήρα όσο και του υπερκείμενου σχηματισμού. Οι ταμιευτήρες υπόκεινται αδιαπέρατων πετρωμάτων («στεγανό κάλυμμα»), τα οποία εμποδίζουν τη μετανάστευση του CO_2 προς την επιφάνεια, ενώ βρίσκονται σε βάθος μεγαλύτερο των 800m προκειμένου οι τιμές πίεσης και θερμοκρασίας να διασφαλίζουν την αποθήκευση του CO_2 ως υπερκρίσιμου ρευστού ($T_{critical}$=31,1°C, $P_{critical}$=73,82 bar). Το υπερκρίσιμο CO_2 σχηματίζει μια φάση, που ξεχωρίζει από την υγρή φάση και στην οποία μπορεί να μεταβάλλεται συνεχώς είτε σε αέριο είτε σε υγρό CO_2, χωρίς όρια φάσεων. Ως υπερκρίσιμο ρευστό, ο όγκος του CO_2 είναι σημαντικά μικρότερος από αυτόν στην επιφάνεια ως αέριο (από 1.000m^3 στην επιφάνεια ελαττώνεται στα 2,7m^3 σε βάθος 2km), καθιστώντας ελκυστική την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων του. Βασική προϋπόθεση για την επιλογή των ταμιευτήρων αποθήκευσης είναι η ύπαρξη (α) επαρκούς πορώδους, διαπερατότητας και αποθηκευτικής ικανότητας, (β) υπερκείμενου αδιαπέρατου σχηματισμού, (γ) δομών παγίδευσης, (δ) βάθους >800m και (ε) ακατάλληλου προς χρήση νερού. Κατά την έγχυση του υπερκρίσιμου CO_2 σε βαθύ αλμυρό υδροφορέα και λόγω της μικρότερης πυκνότητάς του (γενικά ρ_{CO2}= 300-800 kg/m^3 για βάθη >800m) έναντι της άλμης (ρ_{brine}>1.000 kg/m^3) διαπιστώνεται κίνηση προς την οροφή του ταμιευτήρα και δημιουργία θυσάνου. Το CO_2 παγιδεύεται μέσα στον ταμιευτήρα με τους ακόλουθους μηχανισμούς: δομική παγίδευση (συσσώρευση κάτω από το πέτρωμα-κάλυμμα), υπολειμματική παγίδευση (ακινητοποίηση σε πολύ μικρούς πόρους), παγίδευση διάλυσης (διάλυση σε νερό) και ορυκτολογική παγίδευση (μέσω του σχηματισμού ορυκτών) [2, 3, 4, 5, 6].

Η ασφαλής αποθήκευση του CO_2 προϋποθέτει: (α) προσεκτική επιλογή της θέσης λαμβάνοντας υπόψη τη γεωλογική και τεκτονική δομή, (β) μοντελοποίηση-προσομοίωση της ροής του CO_2 (γ) εκτίμηση, ανάλυση και διαχείριση πιθανού κινδύνου διαρροής, (δ) σωστή εκτέλεση της έγχυσης και της συνολικής λειτουργίας, (ε) σύνταξη κατάλληλων σχεδίων παρακολούθησης και αποκατάστασης. Κατά την έγχυση ελέγχονται (α) η πίεση έγχυσης, (β) ο ρυθμός ροής, (γ) ο όγκος, η σύσταση και η επέκταση του εγχεόμενου CO_2, (δ) η ακεραιότητα της(ων) γεώτρησης(εων) και (ε) η ευστάθεια του εδάφους, ενώ γίνεται συνεχής σύγκριση με τα μοντέλα πρόβλεψης. Οι θέσεις αποθήκευσης παρακολουθούνται, βάσει ευέλικτου προγράμματος, για λόγους λειτουργικούς, ασφάλειας, περιβαλλοντικούς, κοινωνικούς και οικονομικούς, σε όλα τα στάδια της έγχυσης (πριν, κατά τη διάρκεια και μετά). Τα στοιχεία που παρακολουθούνται είναι η ακεραιότητα του πετρώματος-καλύμματος και της(ων) γεώτρησης(εων), η

ποσότητα του αποθηκευμένου CO_2 και η μετανάστευσή του από το σημείο έγχυσης, το ενδεχόμενο διαρροής στην επιφάνεια, πιθανές εδαφικές μετακινήσεις και η μικροσεισμικότητα. Εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές παρακολούθησης, τόσο στην ξηρά όσο και στη θάλασσα, όπως δειγματοληψίες και αναλύσεις νερών και αερίων από γεωτρήσεις, έδαφος και αέρα, γεωφυσικές διασκοπήσεις, παρακολούθηση και καταγραφή μικρομεταβολών βαρύτητας, μεταβολών των πιέσεων σε γεωτρήσεις και του pH στο υπόγειο νερό, εδαφικών παραμορφώσεων. Θεσπίζονται κριτήρια ασφάλειας με στόχο την αποτροπή (α) διαφυγής CO_2 από τον ταμιευτήρα μέσω γεωτρήσεων, ρηγμάτων, διαρρήξεων του πετρώματος-καλύμματος και spill-point ή λόγω υπέρβασης της τριχοειδούς πίεσης και (β) ανόδου αυτού στην επιφάνεια. Όμως, και στο ενδεχόμενο διαρροής υπάρχουν διορθωτικά μέτρα. Επιπτώσεις στον άνθρωπο υπάρχουν μόνον όταν το αέριο CO_2 αυξάνεται σε πολύ υψηλές συγκεντρώσεις σε κλειστά (μη αεριζόμενα) ή χαμηλά τοπογραφικά περιβάλλοντα. Από τη μελέτη «φυσικών αναλόγων» (natural analogues) προκύπτει ότι η κύρια επίπτωση διαφυγής CO_2 στα θαλάσσια οικοσυστήματα είναι η τοπική μείωση του pH για περιορισμένο χρονικό διάστημα, ενώ στα χερσαία οικοσυστήματα διαπιστώνεται περιορισμένη τοπική επίδραση στη βλάστηση, μεταβολή στην ποιότητα του υπόγειου νερού (μείωση pH, εμπλουτισμός νερών σε CO_2), πιθανή διαλυτοποίηση και μειωμένη δομική ακεραιότητα του πετρώματος υπό συγκεκριμένες συνθήκες και προϋποθέσεις [2, 4, 5, 6, 7, 8]. Σήμερα, η γεωλογική αποθήκευση του CO_2 εφαρμόζεται κυρίως σε πιλοτικά (έγχυση <100.000 t CO_2) και επιδεικτικά έργα αλλά και σε μερικά εμπορικής κλίμακας έργα σε διάφορες περιοχές της γης [5].



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση της δέσμευσης, μεταφοράς και γεωλογικής αποθήκευσης του CO_2 σε διάφορα είδη ταμιευτήρων [2]

3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΤΟΥ CO_2 ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η εισπίεση (έγχυση) και αποθήκευση του CO_2 σε βαθείς γεωλογικούς σχηματισμούς μπορεί να συμβάλλει στην αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού. Έχουν διατυπωθεί διάφορες προτάσεις χρήσης του υπερκρίσιμου CO_2 προς την κατεύθυνση αυτή, και πιο συγκεκριμένα: (α) ως κυκλοφορούντος ρευστού (εργαζόμενο μέσο, working fluid) σε Βελτιωμένα Γεωθερμικά Συστήματα (EGS), (β) ως μέσου για τη δημιουργία γεωθερμικού θυσάνου σε αλμυρούς υδροφορείς, (γ) ως ρευστού υποστήριξης της πίεσης σε γεωθερμικούς ταμιευτήρες και (δ) ως συστατικού διάλυσης μέσα σε θερμή άλμη. Το CO_2 παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι του νερού εξαιτίας ορισμένων θερμοδυναμικών και μηχανικών ιδιοτήτων. Όλα αυτά παρατίθενται αναλυτικά στη συνέχεια. Ήδη καταβάλλονται σημαντικές προσπάθειες για την υλοποίηση σχετικού επιδεικτικού έργου στις Η.Π.Α. στο εγγύς μέλλον.

3.1. Το υπερκρίσιμο CO_2 ως γεωθερμικό «εργαζόμενο μέσο» (working fluid) - Πλεονεκτήματα

Το υπερκρίσιμο CO_2 αποτελεί ένα ενδιαφέρον «εργαζόμενο μέσο» (κυκλοφορούν ρευστό, working fluid), το οποίο μπορεί να μεταφέρει θερμότητα από το υπέδαφος με σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι του νερού, εξαιτίας ορισμένων φυσικοχημικών του ιδιοτήτων [9]. Πιο συγκεκριμένα [9, 10, 11, 12]:
(α) Το CO_2 παρουσιάζει μεγαλύτερη διασταλτικότητα/συμπιεστότητα και συνεπώς μπορούν να δημιουργηθούν μεγάλες διαφορές πυκνότητας μεταξύ του ψυχρού υπερκρίσιμου CO_2 στη γεώτρηση έγχυσης και του θερμού CO_2 στη γεώτρηση παραγωγής (μεγαλύτερη ευαισθησία πυκνότητας στη θερμοκρασία), παρέχοντας μεγαλύτερη δύναμη άνωσης, με αποτέλεσμα την αισθητή μείωση της κατανάλωσης ενέργειας του συστήματος κυκλοφορίας του ρευστού.
(β) Ο μεγαλύτερος συντελεστής θερμικής διαστολής του CO_2 οδηγεί στο σχηματισμό ενός ισχυρού φαινομένου «θερμοσιφώνου» (ροή ρευστών λόγω διαφοράς θερμοκρασίας και πυκνότητας) περιορίζοντας σημαντικά (ή και εξαλείφοντας) τις απαιτήσεις ηλεκτρικού ρεύματος για άντληση.
(γ) Το υπερκρίσιμο CO_2 έχει χαμηλότερο ιξώδες από το νερό (περίπου 40% του νερού) και συνεπώς παρέχει μεγαλύτερες ταχύτητες ροής για συγκεκριμένη βαθμίδα πίεσης.
(δ) Κάτω από γεωλογικές συνθήκες βάθους, η κινητικότητα του υπερκρίσιμου CO_2, που περιγράφει την τάση να διατηρεί την ορμή του ενώ ρέει, είναι μεγαλύτερη από αυτή του νερού. Μεγαλύτερη κινητικότητα σημαίνει μεγαλύτερη ροή ρευστού, με αποτέλεσμα βελτιωμένη απόληψη θερμότητας.
(ε) Ο ρυθμός ροής μάζας ρευστού (κινητικότητα) για συγκεκριμένη κινητήρια δύναμη είναι ανάλογη του λόγου της πυκνότητας προς το ιξώδες ($m=\rho/\mu$). Για το νερό, ο λόγος αυτός είναι συνάρτηση κυρίως της θερμοκρασίας και ελάχιστα της πίεσης. Για το CO_2, η πυκνότητα και το ιξώδες εξαρτώνται σημαντικά τόσο από τη θερμοκρασία (T) όσο και από την πίεση (P). Ο λόγος ρ/μ για το CO_2 λαμβάνει μέγιστες τιμές σε μια περιοχή ενδιάμεσων τιμών θερμοκρασίας και πίεσης (για συνθήκες έγχυσης $T\leq50^oC$ ο λόγος για το CO_2 είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν του νερού, ενώ για $T\sim200^oC$ ο λόγος ρ/μ είναι μεγαλύτερος από αυτόν του νερού για υψηλές πιέσεις και μικρότερος για $P<150$ bar).
(στ) Η συμπίεση του CO_2 που ρέει προς τα κάτω σε μια γεώτρηση έγχυσης και η διαστολή του κατά την ανοδική ροή σε μια παραγωγική γεώτρηση μπορούν να οδηγήσουν σε μεταβολές της θερμοκρασίας κατά 10-25^{o}C. Το CO_2 θερμαίνεται κατά τη συμπίεση και ψύχεται κατά τη διαστολή. Αυτές οι επιπτώσεις είναι πρόσθετες των μεταβολών της θερμοκρασίας που προκαλούνται από την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ γεώτρησης και περιβαλλόντων σχηματισμών και τείνουν να οδηγήσουν σε μείωση της άνωσης.
(ζ) Με τη χρησιμοποίηση του CO_2 ως ρευστού μεταφοράς θερμότητας, οι ρυθμοί απόληψης θερμότητας είναι πολύ μεγαλύτεροι από αυτούς του νερού, γεγονός που συντελεί σε πολύ σημαντική επιτάχυνση στην ανάκτηση ενέργειας. Σε χαμηλές σχετικά θερμοκρασίες (π.χ. $T\leq200^oC$) και πιέσεις ταμιευτήρα, η επιτάχυνση ανάκτησης θερμότητας με τη χρήση του CO_2 είναι μεγαλύτερη έναντι του νερού, γεγονός που καθιστά το CO_2 ως ένα ελκυστικό ρευστό μεταφοράς θερμότητας όχι μόνο για τους υψηλής ενθαλπίας γεωθερμικούς πόρους αλλά και για τα χαμηλής θερμοκρασίας γεωθερμικά συστήματα.
(η) Το υπερκρίσιμο CO_2 είναι πολύ λιγότερο δραστικό ως διαλύτης (κακός διαλύτης) για τα ανόργανα συστατικά του ταμιευτήρα σε σχέση με το νερό/άλμη, γεγονός που μπορεί να περιορίσει ή να αποτρέψει πιθανά προβλήματα επικαθήσεων αλάτων (πυριτικών και ανθρακικών) σε σωληνώσεις, εναλλάκτες θερμότητας και λοιπό εξοπλισμό.

3.2. Χρήση του υπερκρίσιμου CO_2 σε Βελτιωμένα Γεωθερμικά Συστήματα (EGS)

Τα Βελτιωμένα Γεωθερμικά Συστήματα (Enhanced Geothermal Systems, EGS) αποβλέπουν στην απόσπαση γεωθερμικής ενέργειας από συστήματα που χαρακτηρίζονται από περιορισμένη διαπερατότητα και κυκλοφορία ρευστών και απαιτείται, αρχικά, η διέγερση υπαρχουσών διαρρήξεων ή η δημιουργία νέων για αύξηση της διαπερατότητας και, στη συνέχεια, η έναρξη και διατήρηση της κυκλοφορίας του ρευστού μέσα από αυτό το δίκτυο διαρρήξεων με τη βοήθεια ενός συστήματος γεωτρήσεων έγχυσης και παραγωγής, έτσι ώστε η γεωθερμική ενέργεια να μεταφέρεται στην επιφάνεια για ανθρώπινη χρήση και αξιοποίηση. Έχουν διαπιστωθεί κάποια προβλήματα σε σχέση με τα συστήματα EGS, όπως το κόστος, η επαγόμενη σεισμικότητα, το μικρό μέγεθος του ταμιευτήρα, δυσκολίες στην κυκλοφορία του νερού, απώλειες και χρήση σημαντικών ποσοτήτων νερού.

Το 2000, προτάθηκε η χρήση του υπερκρίσιμου CO_2 σε EGS (Εικόνα 2) λόγω των σημαντικών του πλεονεκτημάτων έναντι του νερού [10]. Πιο συγκεκριμένα [9, 10]:
(α) Η μεγαλύτερη διασταλτικότητα/συμπιεστότητα του υπερκρίσιμου CO_2 έναντι του νερού οδηγεί σε μεγάλη διαφορά πυκνότητας μεταξύ του ψυχρού (στη γεώτρηση έγχυσης) και του θερμού (στις γεωτρήσεις παραγωγής) υπερκρίσιμου CO_2, γεγονός που συντελεί στο φαινόμενο «θερμοσιφώνου» (φυσικό φαινόμενο της συνεχούς ροής ρευστού, λόγω διαφοράς πυκνότητας, από το θερμότερο προς το ψυχρότερο σημείο προκειμένου να επιτευχθεί εξομοίωση των θερμοκρασιών των δύο σημείων) και

τη δημιουργία ισχυρών δυνάμεων άνωσης, με αποτέλεσμα να ελαττώνεται σημαντικά η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (παρασιτικό φορτίο) για την κυκλοφορία του ρευστού με εξωτερική άντληση σε σύγκριση με τα EGS που βασίζονται στο νερό [9].

(β) Η αδυναμία του υπερκρίσιμου CO_2 να διαλύει και να μεταφέρει διάφορα ορυκτά από το γεωθερμικό ταμιευτήρα στην επιφάνεια περιορίζει σημαντικά και μπορεί να εξαλείψει προβλήματα επικαθήσεων αλάτων στον επιφανειακό εξοπλισμό [9, 10]. Έτσι, ταμιευτήρες με θερμοκρασίες άνω των 374^{o}C θα μπορούσαν να αναπτυχθούν χωρίς προβλήματα διάλυσης SiO_2, που παρατηρούνται στα EGS με βάση το νερό [10].

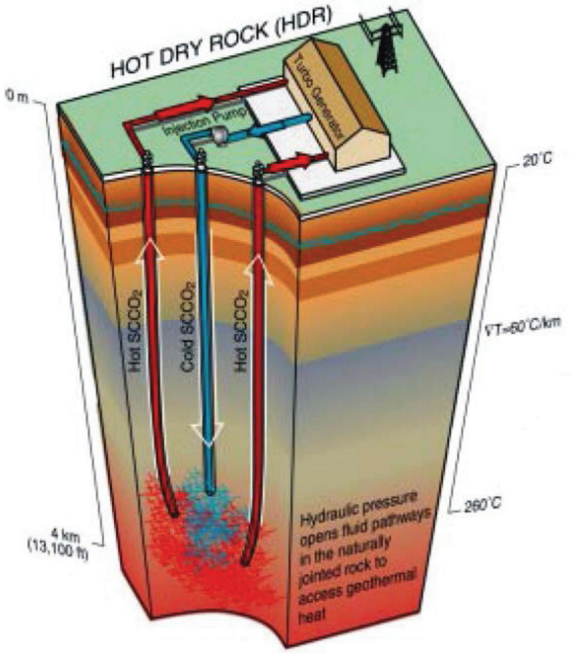
(γ) Επειδή το υπερκρίσιμο CO_2 έχει χαμηλότερο ιξώδες από το νερό, παρέχει μεγαλύτερες ταχύτητες ροής για συγκεκριμένη βαθμίδα πίεσης και, κάτω από γεωλογικές συνθήκες βάθους, η κινητικότητά του είναι μεγαλύτερη από αυτή του νερού, γεγονός που συνεπάγεται μεγαλύτερη ροή ρευστού και συνεπώς, καλύτερη απόληψη θερμότητας [9, 10].

(δ) Λόγω της ιδιόμορφης και περίπλοκης εξάρτησης της κινητικότητας του CO_2 με τη θερμοκρασία και την πίεση, είναι δυνατή η αύξηση του ρυθμού απόληψης της θερμότητας με την πάροδο του χρόνου για ορισμένες τιμές πίεσης του ταμιευτήρα λόγω της έντονης αύξησης στην κινητικότητα του ρευστού [13].

(ε) Εξαιτίας των πλεονεκτημάτων του CO_2 αναφορικά με την καλύτερη απόληψη θερμότητας σε συνθήκες χαμηλών σχετικά θερμοκρασιών και πιέσεων του ταμιευτήρα, δίνεται η δυνατότητα χρήσης του ως «εργαζόμενου μέσου» όχι μόνο σε γεωθερμικούς πόρους υψηλής θερμοκρασίας αλλά και σε χαμηλότερης, με σημαντικά οφέλη και μεγαλύτερη απόδοση στην αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας [10].

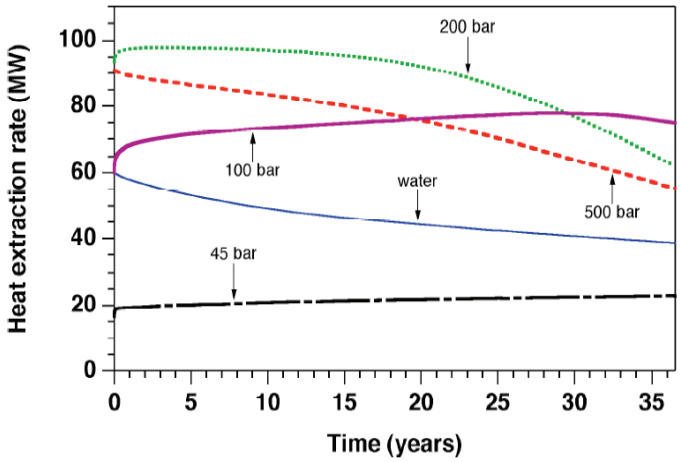
(στ) Με τη χρήση του υπερκρίσιμου CO_2 ως κυκλοφορούντος ρευστού σε EGS επιτυγχάνεται η γεωλογική αποθήκευση σημαντικών ποσοτήτων CO_2 σε μεγάλο βάθος και έτσι, ενώ οι απώλειες νερού σε ένα συμβατικό σύστημα αποτελούν μειονέκτημα, στην περίπτωση των EGS με βάση το CO_2 αυτό αποτελεί πλεονέκτημα, συντελώντας στην αποθήκευσή του [9, 10, 13].

(ζ) Με τη χρήση του CO_2, μεγάλες ποσότητες επιφανειακού νερού δεν καταναλώνονται για τη λειτουργία ενός EGS και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη άλλου είδους αναγκών (άρδευσης, ύδρευσης κλπ).



Εικόνα 2: Βελτιωμένο Γεωθερμικό Σύστημα (EGS), ή παλαιότερα γνωστό ως Hot Dry Rocks (HDR), που χρησιμοποιεί το υπερκρίσιμο CO_2 ($SCCO_2$) ως εργαζόμενο μέσο για την απόληψη και μεταφορά θερμότητας [10]

Εξετάζοντας την περίπτωση ενός μοντέλου ομοιογενούς διαρρηγμένου ταμιευτήρα 5 σημείων (διάταξη όπου στο κέντρο τετραγώνου έκτασης 1 km^2 βρίσκεται γεώτρηση έγχυσης και στις τέσσερις γωνίες του γεωτρήσεις παραγωγής) για συγκεκριμένη συνολική πτώση πίεσης μεταξύ των γεωτρήσεων έγχυσης και παραγωγής, αρχικές συνθήκες T=200°C και P=500 bar και καθορισμένα χαρακτηριστικά ταμιευτήρα, διαπιστώνεται ότι το CO_2 δημιουργεί αρχικά περίπου 4 φορές μεγαλύτερες ροές μάζας και 50% μεγαλύτερους ρυθμούς απόληψης σε σύγκριση με το νερό και αυτή η διαφορά ελαττώνεται με το χρόνο λόγω θερμικής «εξάντλησης» του ταμιευτήρα [10, 14]. Για πιέσεις $P>P_{crit}$(=73,82 bar), οι ρυθμοί απόληψης σε συστήματα με «εργαζόμενο μέσο» το CO_2 είναι πολύ μεγαλύτεροι από αυτά με νερό, ενώ για συνθήκες P=45 bar (υποκρίσιμο CO_2, χωρίς πρακτικό ενδιαφέρον) είναι χαμηλότεροι. Στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται προσομοιωμένοι ρυθμοί απόληψης θερμότητας για 36 έτη, με αρχική θερμοκρασία ταμιευτήρα T=200°C και πιέσεις P=500, 200, 100 και 45 bar, ενώ συγκριτικά σημειώνεται η προσομοιωμένη απόληψη θερμότητας για συστήματα με βάση το νερό, για τις ίδιες συνθήκες P και T και τις ίδιες παραμέτρους του ταμιευτήρα [13]. Η παραγωγική συμπεριφορά των EGS που λειτουργούν με το CO_2 είναι πιο ευαίσθητη στην πίεση του ταμιευτήρα σε σύγκριση με αυτά του νερού και για ορισμένες τιμές πίεσης ο ρυθμός απόληψης θερμότητας μπορεί να αυξάνει με το χρόνο λόγω αύξησης της κινητικότητας του ρευστού. Ερευνητικές εργασίες προσομοιώσεων έδειξαν ότι, για την ίδια τιμή διαπερατότητας, με την αύξηση του κενού των διαρρήξεων η θερμοκρασία παραγωγικής γεώτρησης σε EGS μειώνεται και η θερμοκρασία του παραγόμενου ρευστού ελαττώνεται πιο γρήγορα με την πάροδο του χρόνου, αφού λιγότερο υλικό του ταμιευτήρα έρχεται σε επαφή με το ρευστό. Η χαμηλότερη διαπερατότητα σε μοντέλα EGS οδηγεί σε μικρότερους ρυθμούς ροής μάζας του ρευστού και άρα χαμηλότερους ρυθμούς απόληψης θερμικής ενέργειας σε σύγκριση με EGS με παρόμοια κενά διαρρήξεων και μεγαλύτερη διαπερατότητα.



Εικόνα 3: Προσομοιωμένοι ρυθμοί απόληψης θερμότητας (MW_{th}) για EGS με βάση το CO_2 και για διαφορετικές πιέσεις ταμιευτήρα σε θερμοκρασία T=200°C. Η καμπύλη με την ένδειξη "water" δείχνει την παραγωγική συμπεριφορά ενός EGS με βάση το νερό, το οποίο δεν επηρεάζεται εύκολα από την πίεση του ταμιευτήρα [13]

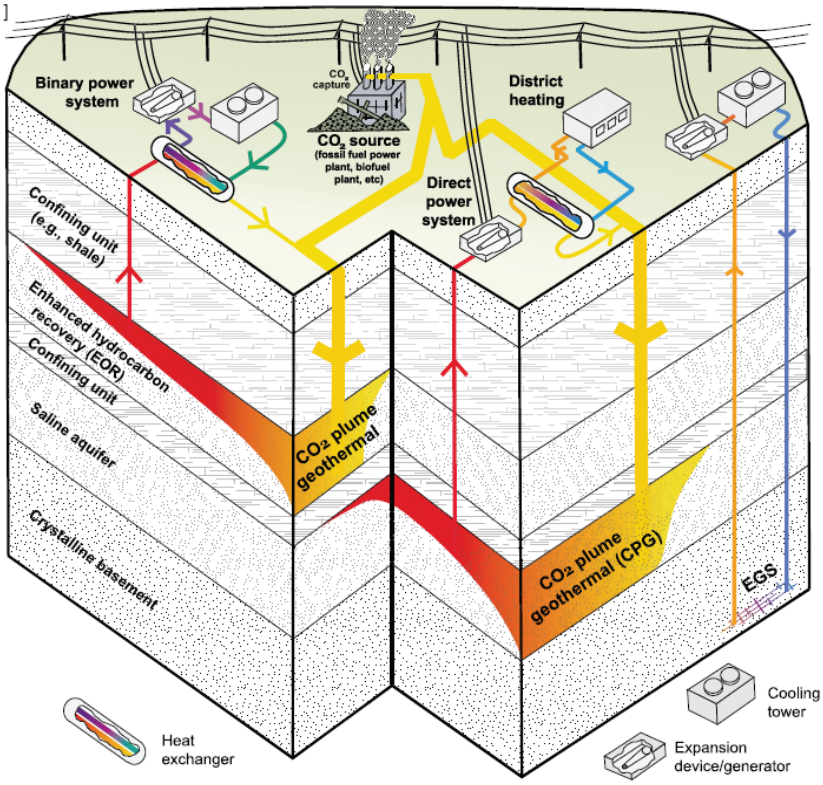
Τρισδιάστατες προσομοιώσεις της συμπεριφοράς έγχυσης/παραγωγής σε EGS με βάση το CO_2 έδειξαν ότι λόγω της μεγαλύτερης θερμικής διαστολής του CO_2, της διαφοράς πυκνότητας μεταξύ ψυχρού εγχεόμενου και θερμού παραγόμενου CO_2 και των ισχυρών επιδράσεων της βαρύτητας μπορεί να υπάρξει ροή ψυχρού πυκνού CO_2 κατά μήκος του πυθμένα του ταμιευτήρα. Αυτό το γεγονός μπορεί να αντιμετωπισθεί με την παραγωγή CO_2 μόνον μέχρι συγκεκριμένο βάθος, στην οροφή του ταμιευτήρα [13, 14].

Η ανάπτυξη του ταμιευτήρα σε EGS επιτυγχάνεται με κατάλληλη διέγερση των υπαρχόντων συστημάτων διαρρήξεων με υδραυλικά και/ή χημικά μέσα ή και τη δημιουργία νέων. Η διέγερση είναι συνήθως υδραυλική με χρήση νερού, αν και το CO_2 μπορεί να αποτελέσει μια ελκυστική εναλλακτική λύση [13]. Συνεπώς, για τη λειτουργία ενός EGS με βάση το CO_2 απαιτείται η απομάκρυνση του εναπομείναντος από τη διέγερση νερού από τον ταμιευτήρα, τουλάχιστον από την κεντρική εσωτερική

ζώνη του (πυρήνας) και τη σταδιακή αντικατάστασή του με το CO_2, οδηγώντας αφενός μεν στη δημιουργία 3 ζωνών (ζώνη 1: πυρήνας με υπερκρίσιμο CO_2, ζώνη 2: ενδιάμεση με μίγμα CO_2+νερού και ζώνη 3: εξωτερική με νερό και διαλελυμένο σ' αυτό CO_2) και αφετέρου σε μια διφασική ροή νερού(άλμης)-CO_2 με τελική παραγωγή ξηρού, άνυδρου CO_2. Οι χημικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ ρευστών και πετρωμάτων του ταμιευτήρα θα είναι διαφορετικές στις ζώνες αυτές [9, 14, 15, 16].

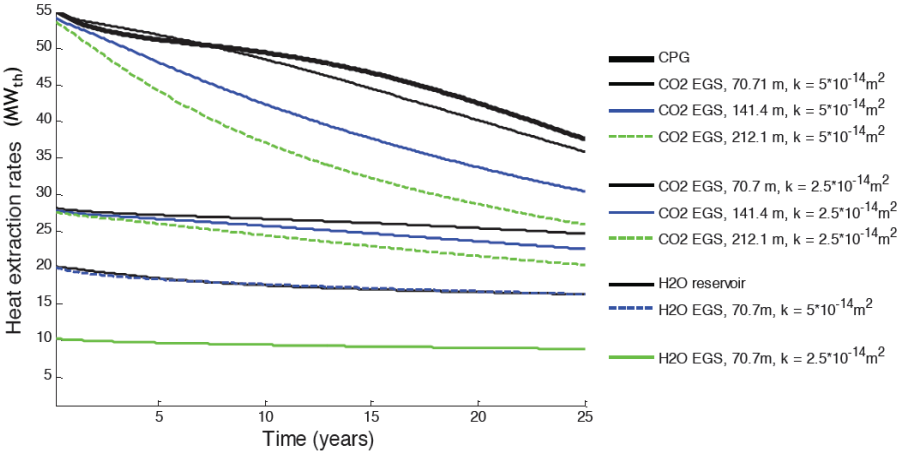
3.3. Γεωθερμικός Θύσανος CO_2 (CO_2 Plume Geothermal, CPG)

Γεωθερμικός Θύσανος CO_2 (CO_2 Plume Geothermal, CPG) δημιουργείται κατά την εισπίεση (έγχυση) υπερκρίσιμου CO_2 σε βαθείς, πορώδεις και υψηλής διαπερατότητας γεωλογικούς σχηματισμούς, που υπόκεινται αδιαπέρατων πετρωμάτων-καλυμμάτων. Το εγχεόμενο CO_2 εκτοπίζει το ρευστό του σχηματισμού (π.χ. άλμη), σχηματίζει έναν υπόγειο μεγάλο θύσανο και απορροφά θερμότητα από τον ταμιευτήρα. Ένα τμήμα του θερμού CO_2 οδηγείται στην επιφάνεια και αποστέλλεται είτε απευθείας σε στρόβιλο για ηλεκτροπαραγωγή είτε σε εναλλάκτη θερμότητας για ηλεκτροπαραγωγή με δυαδικό κύκλο ή/και άμεσες χρήσεις, ενώ στη συνέχεια επανεισάγεται στον ταμιευτήρα (σύστημα κλειστού βρόχου), ενδεχομένως μαζί με πρόσθετη ποσότητα προερχόμενη από κάποια πηγή εκπομπής CO_2 (Εικόνα 4) [11, 17, 18, 19, 20]. Σημειώνεται ότι για τα συστήματα CPG και EGS, οι ρυθμοί απόληψης θερμότητας ελαττώνονται με το χρόνο, καθώς η θερμότητα του ταμιευτήρα εξαντλείται και η θερμοκρασία στις παραγωγικές γεωτρήσεις μειώνεται, με διατήρηση σταθερών ρυθμών ροής μάζας [18, 21].



Εικόνα 4: Εφαρμογές γεωθερμικών συστημάτων με βάση το CO_2: (α) συστήματα CPG σε αλμυρούς υδροφορείς και για τη Βελτιωμένη Ανάκτηση Πετρελαίου (EOR) και (β) EGS. Περιλαμβάνονται μονάδες ηλεκτροπαραγωγής (άμεσες και δυαδικού κύκλου), εναλλάκτες θερμότητας, δευτερεύοντα ρευστά κυκλοφορίας, γεωτρήσεις παραγωγής και επανεισαγωγής, πηγές εκπομπών CO_2 και δίκτυα ηλεκτρικού ρεύματος. Η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ηλεκτροπαραγωγή, τηλεθέρμανση ή/και για τη λειτουργία ηλεκτρικών συμπιεστών κατά την αποθήκευση του CO_2 ή τη Βελτιωμένη Ανάκτηση Πετρελαίου (EOR) [21]

Η τεχνική CPG παρουσιάζει πλεονεκτήματα έναντι των συστημάτων EGS αφού (α) δεν βασίζεται στην υδραυλική διάρρηξη/διέγερση για βελτίωση της διαπερατότητας, αλλά χρησιμοποιεί υπάρχοντες, υψηλής διαπερατότητας και μεγάλου πορώδους γεωλογικούς ταμιευτήρες, αποφεύγοντας έτσι την πρόκληση μικροσεισμικότητας, και (β) τα μεγέθη των φυσικών ταμιευτήρων είναι πολύ μεγαλύτερα από εκείνα των ταμιευτήρων που δημιουργούνται με υδραυλική διάρρηξη [17, 19]. Τα συστήματα CPG παρέχουν μεγαλύτερους ρυθμούς απόληψης θερμότητας σε σύγκριση τόσο με τα υδροθερμικά συστήματα όσο και με τα EGS που έχουν ως βάση το νερό (Εικόνα 5), ακόμη και σε χαμηλότερες τιμές θερμοκρασίας και πίεσης, με την προϋπόθεση ότι στα βάθη αυτά οι θερμοκρασίες είναι επαρκείς και το CO_2 βρίσκεται σε υπερκρίσιμη μορφή [11, 19, 21]. Αριθμητικές προσομοιώσεις έδειξαν ότι για μέσες-χαμηλές τιμές διαπερατότητας του ταμιευτήρα ($k<2x10^{-14}$ m^2) το CO_2 παρέχει υψηλότερες αποδόσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ότι το νερό και η άλμη και χαμηλότερες για μεγαλύτερες τιμές διαπερατότητας ($k>5x10^{-14}$ m^2) [20]. Άλλες προσομοιώσεις έδειξαν ότι συστήματα CPG με θερμοκρασίες ταμιευτήρα 65,8 και 98,2°C παρέχουν την ίδια ηλεκτρική ισχύ με σύστημα νερού θερμοκρασίας 100 και 150°C αντίστοιχα, για τις ίδιες παραμέτρους ταμιευτήρα και τις ίδιες συνθήκες πιέσεων έγχυσης/παραγωγής [21]. Τα συστήματα CPG παρέχουν βιώσιμους γεωθερμικούς πόρους για ηλεκτροπαραγωγή ακόμη και σε περιοχές με σχετικά χαμηλές τιμές θερμοκρασίας και θερμικής ροής, αρκεί να υπάρχουν οι κατάλληλοι ταμιευτήρες [21]. Επιπλέον, εξαιτίας του φαινομένου «θερμοσίφωνα», που δημιουργείται - όπως προαναφέρθηκε - λόγω της μεγάλης διασταλτικότητας, διαφοράς πυκνότητας και κινητικότητας του υπερκρίσιμου CO_2, περιορίζονται στο ελάχιστο οι απαιτήσεις της παρασιτικής ηλεκτρικής ενέργειας για διατήρηση της κυκλοφορίας με άντληση. Με τον τρόπο αυτό, αυξάνεται σημαντικά η απόδοση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [18]. Ερευνητικές εργασίες υποδεικνύουν ότι τα συστήματα CPG παρέχουν καλύτερη και πιο εκτεταμένη απόληψη θερμότητας ακόμη και σε σχέση με τα EGS που χρησιμοποιούν ως εργαζόμενο μέσο το CO_2, λόγω και του μεγαλύτερου όγκου του σχηματισμού του ταμιευτήρα [11]. Σε σύστημα CPG, η θερμοκρασία στην παραγωγική γεώτρηση είναι πλησιέστερα προς την αρχική θερμοκρασία του ταμιευτήρα σε σχέση με τα EGS και διατηρείται για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Όλα τα παραπάνω ισχύουν για την ίδια τιμή διαπερατότητας στα συστήματα αυτά [11, 21]. Η διάρκεια ζωής μιας μονάδας ηλεκτροπαραγωγής είναι μεγαλύτερη σε σύστημα CPG καθώς η μείωση της θερμότητας του ταμιευτήρα είναι πιο αργή [18].



Εικόνα 5: Χρονοσειρές των ρυθμών απόληψης θερμότητας (MW_{th}) για συστήματα υδροθερμικά, CPG, EGS με βάση το H_2O και EGS με βάση το CO_2 για διάφορες τιμές απόστασης των διαρρήξεων και διαπερατότητας k [21]

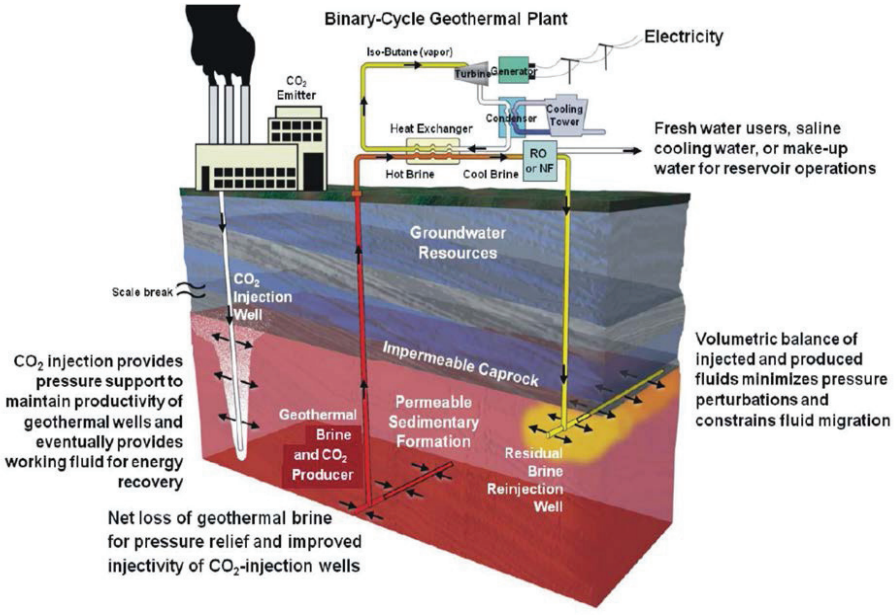
Από προσομοιώσεις προέκυψε ότι ένα ποσοστό του εγχεόμενου CO_2 αποθηκεύεται μόνιμα στον ταμιευτήρα. Το ποσοστό αυτό είναι μεγαλύτερο στα συστήματα CPG σε σχέση με τα EGS που βασίζονται στο CO_2 [17, 22]. Η ποσότητα του CO_2 που απαιτείται για τη λειτουργία ενός απλοποιημένου γεωλογικά συστήματος CPG είναι συνάρτηση διαφόρων παραμέτρων, όπως ο όγκος του ταμιευτήρα, η θερμοκρασία και το βάθος. Η ποσότητα αυξάνει με το πάχος του ταμιευτήρα, την απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων έγχυσης και παραγωγής και το βάθος του ταμιευτήρα, ενώ ελαττώνεται για θέσεις με υψηλότερες τιμές γεωθερμικής βαθμίδας. Η θερμότητα που αποσπάται

προέρχεται κυρίως από το πέτρωμα και τα ρευστά του ταμιευτήρα, κατά τη διάρκεια των αρχικών χρόνων της παραγωγής του ρευστού και της κυκλοφορίας, ενώ στη συνέχεια, λόγω της μείωσης της θερμότητας των σχηματισμών του ταμιευτήρα, αυξάνει η συνεισφορά της θερμότητας από τους περιβάλλοντες (υπερκείμενους και υποκείμενους, χαμηλής διαπερατότητας) γεωλογικούς σχηματισμούς και τη θερμική ροή. Ο ρυθμός παραγωγής του CO_2 σχεδιάζεται με βάση την επιθυμητή μακροβιότητα του γεωθερμικού ταμιευτήρα και τους ρυθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Από αριθμητικές προσομοιώσεις προέκυψε ότι για βέλτιστο ρυθμό κυκλοφορίας CO_2 με πεπερασμένη ποσότητα εγχεόμενου CO_2, ένα σύστημα CPG μπορεί να λειτουργεί για δεκαετίες με μικρή μείωση της θερμοκρασίας του παραγόμενου ρευστού [18]. Προκαταρκτικές μελέτες έχουν δείξει ότι η απόληψη θερμότητας από ένα γεωλογικό σχηματισμό αποθήκευσης, χρησιμοποιώντας το CO_2 ως ρευστό μεταφοράς θερμότητας, μπορεί να εξαλείψει περίπου το 10% της υπερπίεσης του ταμιευτήρα (λόγω της υπόγειας αποθήκευσης), συμβάλλοντας στην ελάττωση της πλευρικής επέκτασης της διαταραχής της πίεσης, ενώ μπορεί να γίνει περαιτέρω σημαντική διαχείρισή της με πρόσθετα σενάρια γεωτρήσεων, κυκλοφορίας ρευστού, απόληψης θερμότητας - άλμης και επανεισαγωγής [23].

3.3.1. Διάλυμα Αρνητικού Κορεσμού ("Negative Saturation" Solution)

Η έγχυση CO_2 με μεγάλο ρυθμό μπορεί να έχει κάποιες αρνητικές συνέπειες, όπως ξήρανση ταμιευτήρα και υπερπίεση. Οι Salimi and Wolf (2012) πρότειναν την έγχυση μέτριων ποσοτήτων μίγματος CO_2 και ψυχρού νερού (διάλυμα αρνητικού κορεσμού, NegSat) σε ένα γεωθερμικό ταμιευτήρα για να ξεπερασθεί το πρόβλημα της εμφάνισης και εξαφάνισης φάσης και γίνεται η υπόθεση πιθανής συνύπαρξης δύο φάσεων: μιας πλούσιας σε CO_2 και μιας πλούσιας σε νερό. Από εργασίες μοντελοποίησης και προσομοίωσης για γεωθερμικό ταμιευτήρα, κορεσμένο σε θερμό νερό, στον οποίο γίνεται έγχυση ψυχρού μίγματος CO_2+νερού, όπου το CO_2 συμπεριφέρεται ως μη ιδανικό ρευστό λόγω υψηλών τιμών πίεσης και θερμοκρασίας, και για περιπτώσεις ομοιογενούς και ετερογενούς διαπερατότητας διαπιστώθηκαν ότι στην περίπτωση της ετερογενούς διαπερατότητας ο μηχανισμός παγίδευσης του CO_2 είναι πιο αποδοτικός, αποδυναμώνονται σημαντικά οι επιδράσεις της βαρύτητας και οι ποσότητες της παραγόμενης θερμικής ενέργειας και του αποθηκευμένου CO_2 είναι μεγαλύτερες [22, 24].

3.4. Υβριδική ολοκληρωμένη προσέγγιση απόληψης θερμικής ενέργειας δύο σταδίων από βαθύ αλμυρό υδροφορέα



Εικόνα 6: Γεωθερμικό - CCS σύστημα, δύο σταδίων, σε έναν αλμυρό, διαπερατό ιζηματογενή σχηματισμό. Το σύστημα χρησιμοποιείται για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με δυαδικό κύκλο [25]

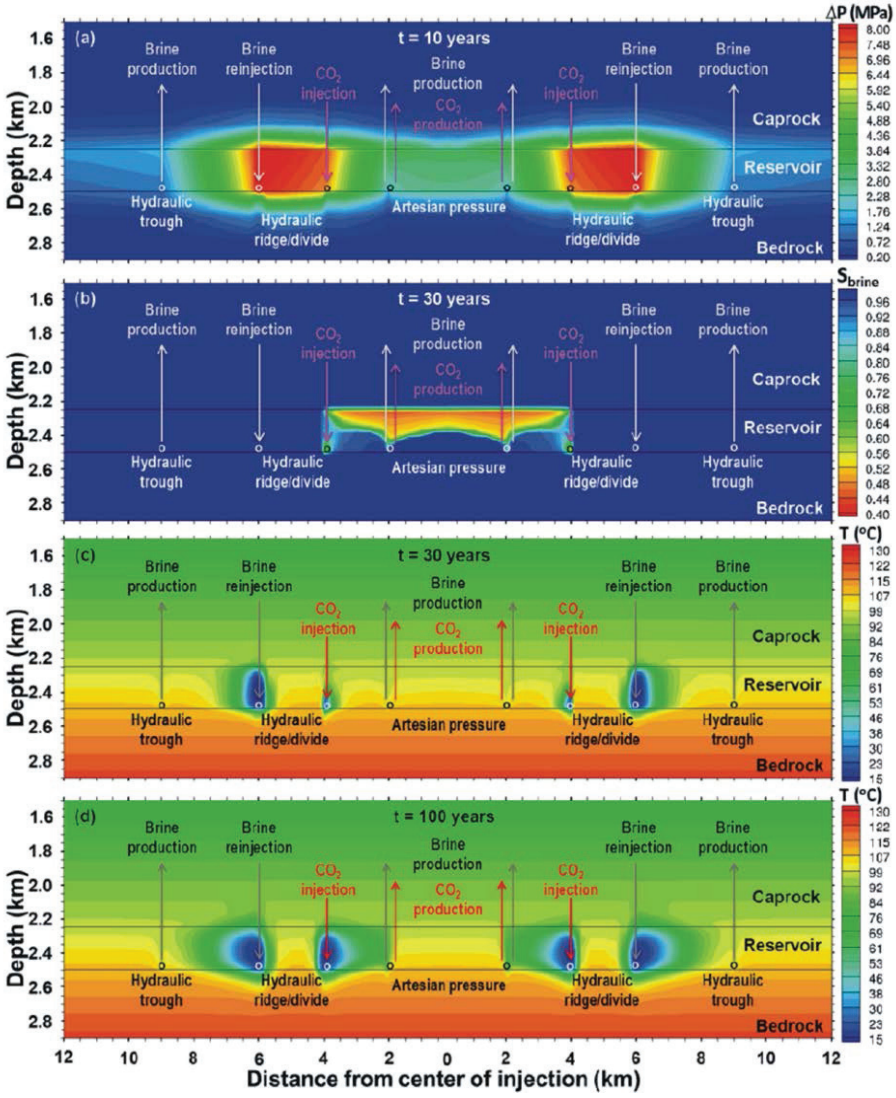
Οι Buscheck et al. (2012) εισήγαγαν μια υβριδική προσέγγιση, δύο σταδίων, για αποθήκευση CO_2 και παραγωγή γεωθερμικής ενέργειας από βαθείς, αλμυρούς υδροφορείς με χαμηλό περιβαλλοντικό κίνδυνο και μικρό κόστος. Μετά την έγχυση του CO_2, κατά το πρώτο στάδιο αυτής της υβριδικής προσέγγισης εξάγεται με άντληση η άλμη του σχηματισμού για «ανακούφιση» από την πίεση. Κατά το δεύτερο στάδιο και καθώς το CO_2 φτάνει στις παραγωγικές γεωτρήσεις, παράγονται μαζί άλμη και CO_2 ως εργαζόμενα μέσα. Η παραγόμενη άλμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως πρώτη ύλη παραγωγής γλυκού νερού με αφαλάτωση (αντίστροφη όσμωση), είτε ως αλμυρό νερό ψύξης, είτε ακόμη ως νερό συμπλήρωσης για έγχυση σε γειτονικό EGS. Ανάλογα με τη θερμοκρασία του σχηματισμού, η γεωθερμική ενέργεια που ανακτάται από την άλμη και το CO_2 μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια για την κάλυψη του κόστους της αλυσίδας CCS, ενώ είναι ωφέλιμη και για τη διαχείριση και αντιμετώπιση της ίδιας της αντίστροφης όσμωσης. Η προσέγγιση των Buscheck et al. (2012) έχει ως βάση την έννοια της έννοια της «Διαχείρισης Ενεργού Ταμιευτήρα CO_2 (Active CO_2 Reservoir Management, ACRM)», που συνδυάζει την απόληψη και μεταχείριση της άλμης καθώς και την επανεισαγωγή της υπολειμματικής άλμης με την έγχυση του CO_2 [25].

3.5. Χρήση του CO_2 ως ρευστού υποστήριξης πίεσης και εργαζόμενου μέσου

Το CO_2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ρευστό υποστήριξης της πίεσης ώστε να δημιουργούνται αρτεσιανές πιέσεις για την παραγωγή CO_2 και άλμης, προκειμένου αυτά τα ρευστά να χρησιμοποιηθούν ως εργαζόμενα μέσα για μεταφορά και απόληψη θερμότητας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την κατασκευή οριζόντιων γεωτρήσεων στον πυθμένα ταμιευτήρα, σε βάθος 2,5-5 km, δημιουργώντας τουλάχιστον 4 ομόκεντρους δακτυλίους παραγωγής και έγχυσης CO_2 και άλμης, που αποτελούνται από: (α) παραγωγούς (producers) άλμης/CO_2 εσωτερικού δακτυλίου, (β) εγχυτές (injectors) CO_2, (γ) επανεγχυτές (reinjectors) άλμης και (δ) παραγωγούς (producers) άλμης εξωτερικού δακτυλίου (Εικόνα 7). Στόχοι αυτής της διάταξης είναι: (α) η διατήρηση της πίεσης από εργασίες έγχυσης και η μεγιστοποίηση του οφέλους από την παραγωγή των ρευστών, (β) η ελαχιστοποίηση της απώλειας CO_2, (γ) η διαχείριση της υπερπίεσης προκειμένου να μειωθούν σχετικοί κίνδυνοι, όπως η επαγόμενη σεισμικότητα και η διαφυγή CO_2, (δ) ο καλύτερος έλεγχος του ρευστού και της ανάκτησης ενέργειας για βελτιωμένη αποτελεσματικότητα σάρωσης, (ε) ο διαχωρισμός των ζωνών παραγωγής CO_2 και άλμης, και (στ) η παροχή συμπληρωματικής υποστήριξης πίεσης και εργαζόμενων μέσων, τα οποία είναι χημικώς συμβατά με το σχηματισμό του ταμιευτήρα [26].

Η προαναφερθείσα διάταξη έχει τα ακόλουθα αποτελέσματα: (i) Δημιουργείται μια υδραυλική ράχη/χώρισμα (hydraulic ridge/divide), ως συνέπεια της ύπαρξης ζώνης υπερπίεσης μεταξύ των δακτυλίων έγχυσης CO_2 και άλμης, που περιορίζει την πλευρική μετανάστευση του CO_2 και διατηρεί συσσώρευση πίεσης από την έγχυση του CO_2, προκαλώντας έτσι την παραγωγή CO_2 στον εσωτερικό δακτύλιο και την παραγωγή μόνον άλμης στον εξωτερικό. (ii) Δημιουργούνται αρτεσιανές πιέσεις, οι οποίες προκαλούν μεγάλους ρυθμούς παραγωγής άλμης, που παράγουν σχεδόν αμέσως ηλεκτρική ενέργεια και παρέχουν σημαντικό μέρος της συνολικής ενέργειας. (iii) Εξαιτίας της διαφοράς πυκνότητας μεταξύ υπερκρίσιμου CO_2 και άλμης, η ύπαρξη μεσοδιαστημάτων παραγωγής (και έγχυσης) σε πολλαπλά βάθη μπορεί να επιτρέψει τον καλύτερο έλεγχο των σχετικών ρυθμών παραγωγής CO_2 και άλμης, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα της σάρωσης. (iv) Όταν το μέτωπο του CO_2 φτάνει στη γεώτρηση παραγωγής, η ηλεκτρική ενέργεια που βασίζεται στο CO_2 αυξάνει, ενώ η ενέργεια που βασίζεται στην άλμη ελαττώνεται. (v) Αρχικά, στον εσωτερικό δακτύλιο παράγεται άλμη, η οποία επανεισάγεται, και μετά την πάροδο 5-8 ετών αρχίζει η παραγωγή CO_2, η ποσότητα του οποίου αυξάνει με το χρόνο περιορίζοντας την παραγωγή της άλμης. (vi) Ο εξωτερικός δακτύλιος δημιουργεί μια υδραυλική τάφρο (hydraulic trough) για τον περιορισμό της πλευρικής επέκτασης της υπερπίεσης και τη δέσμευση τυχόν CO_2 που μπορεί να περάσει από την υδραυλική ράχη. (vii) Όλη η άλμη που παράγεται στον εξωτερικό δακτύλιο επανεισάγεται. (viii) Η προτιμησιακή ροή του CO_2 ελαττώνεται με το βάθος κι έτσι το τμήμα του παραγόμενου CO_2 που ανακυκλώνεται ελαττώνεται με το βάθος, ενώ η καθαρή αποθήκευση του CO_2 αυξάνει. (ix) Η αύξηση του βάθους του πυθμένα του ταμιευτήρα από τα 2,5 στα 5 km τετραπλασιάζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για μια περίοδο 100 ετών, ενώ τριπλασιάζονται οι πωλήσεις ηλεκτρικής ενέργειας ανά μετρικό τόνο αποθηκευμένου CO_2. (x) Η καθαρή αποθήκευση του CO_2 απελευθερώνει έναν ισοδύναμο όγκο άλμης συμπλήρωσης (make-up brine) για επανέγχυση με το πλεονέκτημα ότι προέρχεται από τον ίδιο σχηματισμό, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα χημικής ασυμβατότητας, που θα μπορούσε να προκύψει αν η άλμη προέρχονταν από διαφορετικό σχηματισμό. (xi) Η ετερογένεια των γεωλογικών σχηματισμών μπορεί να οδηγήσει είτε σε παραγωγή CO_2 νωρίτερα και να αυξήσει τη συμβολή της ενέργειας που βασίζεται στο CO_2 είτε να μειώσει την καθαρή αποθήκευση του CO_2. (xii) Στη διάταξη οριζόντιων γεωτρήσεων 5 δακτυλίων δημιουργείται πρόσθετος εσωτερικός δακτύλιος παραγωγής CO_2 στο ανώτερο τμήμα του ταμιευτήρα, ελαττώνοντας την υπερπίεση στο κέντρο του, αυξάνει η παραγωγή CO_2 και παράγεται

περισσότερη συνολική ενέργεια βασισμένη στην άλμη και το CO_2. Τα μέχρι σήμερα αποτελέσματα προσομοιώσεων και μοντελοποίησης έχουν δείξει ότι η προσέγγιση-πρόταση των οριζόντιων γεωτρήσεων, πολλαπλών δακτυλίων, με βάση την οποία το CO_2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την υποστήριξη της πίεσης και ως εργαζόμενο μέσο έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει την οικονομική βιωσιμότητα της παραγωγής γεωθερμικής ενέργειας σε ιζηματογενείς σχηματισμούς [26].

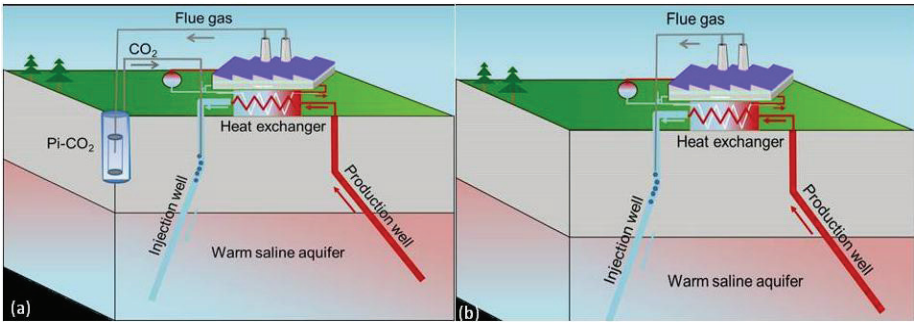


Εικόνα 7: Οριζόντιες γεωτρήσεις με διάταξη τεσσάρων δακτυλίων για βάθος πυθμένα ταμιευτήρα 2,5km: (a) υπερπίεση ΔP στα 10 χρόνια, (b) κορεσμός άλμης S_{brine} στα 30 χρόνια και (c, d) θερμοκρασία T στα 30 και 100 χρόνια [26]

3.6. Χρήση διαλελυμένου CO_2 σε αλμυρούς υδροφορείς

Μια νέα προσέγγιση για συνδυασμένη χρήση γεωλογικής αποθήκευσης του CO_2 και ανάκτησης γεωθερμικής ενέργειας επιχειρείται μέσω του Ευρωπαϊκού Έργου CO_2-DISSOLVED (CO2

Dependable **I**njection and **S**torage **S**ystem **O**ptimized for **L**ocal **V**alorization of the geothermal **E**nergy **D**elivered) [27]. Αυτή η νέα προσέγγιση περιλαμβάνει (Εικόνα 8): (α) δέσμευση του CO_2 με καινοτόμο τεχνολογία βασισμένη στη διάλυση του CO_2 στο νερό (τεχνολογία Pi-CO_2), (β) εξαγωγή της άλμης του υδροφορέα με ζεύγος γεωτρήσεων (παραγωγική και επανεισαγωγής), (γ) ανάκτηση της θερμότητας μέσω επιφανειακού συστήματος εναλλάκτη θερμότητας, (δ) επανέγχυση της ψυχθείσας άλμης μέσω της γεώτρησης επανεισαγωγής του ζεύγους γεωτρήσεων, η οποία θα είναι συνδεδεμένη με τη νέα μέθοδο δέσμευσης και διάλυσης του CO_2 (Pi-CO_2) [27]. Η μέθοδος δέσμευσης Pi-CO_2 χρησιμοποιεί το νερό ως φυσικό διαλύτη με κυκλοφορία νερού και αερίου εκπομπής μέσω ενός υπόγειου κλειστού κυκλώματος συστήματος μεταφοράς μάζας (MTS). Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ένας απλός (μοναδιαίος) απορροφητής Pi-CO_2 (ενσωμάτωση της γραμμής έγχυσης του CO_2 στην κεφαλή της γεώτρησης επανεισαγωγής) είτε πολλαπλοί, διαδοχικοί απορροφητές και διαδικασία συμπίεσης σε κλειστή (σφραγισμένη), βαθιά (600m), μεγάλης διαμέτρου γεώτρηση για πλήρη δέσμευση (κλειστού βρόχου κυκλοφορία νερού). Η έγχυση του οξινισμένου με CO_2 νερού μπορεί να δημιουργήσει κάποια προβλήματα διάβρωσης σε υλικά μαλακού (χαμηλού άνθρακα) χάλυβα και γι' αυτό είναι απαραίτητη η χρήση σύνθετων υλικών. Η χρησιμοποίηση του διαλυμένου CO_2 έναντι της υπερκρίσιμης φάσης του CO_2 παρουσιάζει σημαντικά οφέλη επειδή οι κίνδυνοι μετατόπισης της άλμης και διαφυγής του CO_2 είναι μικρότεροι και η ορυκτοποίηση μπορεί να γίνεται ταχύτερα. Η προκαταρκτική μοντελοποίηση και οι προσομοιώσεις δείχνουν ότι η προτεινόμενη έγχυση της εμπλουτισμένης με CO_2 ψυχθείσας άλμης ενισχύει τη διαφορά πυκνότητας, ώστε το εγχεόμενο νερό να βυθίζεται στα βαθύτερα τμήματα του ταμιευτήρα και να μετακινείται κατά μήκος του πυθμένα του (μετανάστευση μέρους αυτού προς τη γεώτρηση παραγωγής) με χαμηλή ή μηδενική τάση διαφυγής κατά μήκος ρηγμάτων ή άλλων διόδων ανόδου, ενισχύοντας την ασφάλεια της αποθήκευσης. Η έγχυση του διαλελυμένου CO_2 επιταχύνει την ορυκτοποίηση, αφού η οξινισμένη με διαλυμένο CO_2 άλμη είναι χημικά αντιδραστική με τις ορυκτολογικές φάσεις του υδροφορέα, μόλις εξέρχεται από τη γεώτρηση έγχυσης. Κύριο μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης είναι η ποσότητα του CO_2 που μπορεί να εγχυθεί, που περιορίζεται από τη διαλυτότητα του CO_2 μέσα στην άλμη. Αυτή η νέα πρόταση θεωρείται ως τοπική λύση, που περιορίζει σημαντικά το κόστος μεταφοράς του CO_2 και μπορεί να εφαρμοσθεί σε μικρές πηγές CO_2 (<150 kt/yr), υπό την προϋπόθεση ότι οι γεωλογικές συνθήκες είναι ευνοϊκές και υπάρχει γεωθερμικό δυναμικό. Ο εφικτός ρυθμός έγχυσης τείνει να ελαττωθεί με την πάροδο του χρόνου από την επίτευξη κορεσμού αλλά η αποθήκευση είναι ακόμη δυνατή πέραν των 30 ετών σε όλα τα σενάρια. Η υλοποίηση ενός επιδεικτικού έργου είναι ο κύριος στόχος [27, 28, 29, 30, 31, 32].



Εικόνα 8: Σχεδιασμός εγκατάστασης χρήσης του διαλελυμένου CO_2 σε θερμό αλμυρό υδροφορέα: (α) Πλήρης δέσμευση του CO_2 με τεχνολογία Pi-CO_2 (διαδοχικοί απορροφητές) σε γεώτρηση βάθους 600m, όταν το ποσοστό του CO_2 στο καυσαέριο είναι <80% και (b) Απλοποιημένη διάταξη Pi-CO_2 με χρήση μοναδιαίου απορροφητή, όταν το καυσαέριο έχει υψηλή συγκέντρωση CO_2 (>80%) [31, 32]

3.7. Άμεση δέσμευση ατμοσφαιρικού CO_2 με την αρωγή της γεωθερμίας και αποθήκευσή του

Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Έργου CarbFix2, προβάλλεται η ιδέα και η δοκιμή της επιτόπου δέσμευσης του CO_2 από τον ατμοσφαιρικό αέρα κοντά στη γεωθερμική μονάδα Hellisheidi της Ισλανδίας και της γεωλογικής αποθήκευσής του. Με την τεχνολογία άμεσης δέσμευσης αέρα (DAC), το CO_2 δεσμεύεται άμεσα από τον ατμοσφαιρικό αέρα με ένα πατενταρισμένο φίλτρο, το οποίο στη συνέχεια θερμαίνεται με θερμότητα χαμηλής βαθμίδας από τη γεωθερμική μονάδα για να απελευθερώσει καθαρό CO_2. Αυτό το CO_2 διοχετεύεται υπόγεια σε βάθος μεγαλύτερο των 700m, όπου αντιδρά με το βασαλτικό υπόβαθρο και μέσω της ορυκτοποίησης δεσμεύεται μόνιμα. Η τεχνολογία άμεσης δέσμευσης αέρα έχει εφαρμοσθεί κοντά στη Ζυρίχη, φιλτράροντας 900 t CO_2 [33].

4. ΠΙΘΑΝΕΣ ΘΕΣΕΙΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ CO_2 ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΤΟΠΙΚΕΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Μέσω της συμμετοχής Ελληνικών ερευνητικών φορέων (ΕΚΕΤΑ, ΙΓΜΕ) σε διάφορα Ευρωπαϊκά έργα (GESTCO$_2$, GeoCapacity κλπ), μελετήθηκαν θέσεις κατάλληλες για γεωλογική αποθήκευση του CO_2 και καταβλήθηκε προσπάθεια εκτίμησης της χωρητικότητάς τους. Ως πιθανοί χώροι γεωλογικής αποθήκευσης του CO_2 στην Ελλάδα έχουν προταθεί οι ακόλουθοι [4, 34, 35]:
(α) οι Μειοκαινικοί ψαμμιτικοί ταμιευτήρες υδρογονανθράκων (πετρελαίου και φυσικού αερίου), βάθους μεγαλύτερου των 1.600 m, στα πεδία Πρίνου και Νότ. Καβάλας, συνολικής χωρητικότητας 35 Mt CO_2
(β) οι ταμιευτήρες πετρελαίου στην Καλλιράχη, στην ευρύτερη υποθαλάσσια λεκάνη του Πρίνου, αποθηκευτικής ικανότητας 30 Mt CO_2
(γ) οι ταμιευτήρες φυσικού αερίου σε ασβεστόλιθους του Ανώτερου Ιουρασικού-Κατώτερου Κρητιδικού στην περιοχή της Επανομής, σε βάθος 2.600m, με χωρητικότητα 2 Mt CO_2
(δ) οι διαρρηγμένοι Κρητιδικοί-Ηωκαινικοί ασβεστόλιθοι στα πεδία υδρογονανθράκων (πετρελαίου και φυσικού αερίου) στο Κατάκολο, αποθηκευτικής ικανότητας 3,2 Mt CO_2
(ε) οι βαθείς Μειοκαινικοί αλμυροί υδροφορείς στην υποθαλάσσια λεκάνη του Πρίνου, βάθους 1.000-3.500m (μέσο βάθος 2.400m), έκτασης 800 km^2, με μέσο πάχος 260m, μέσο πορώδες 18% και χωρητικότητα 1.350 Mt CO_2
(στ) οι βαθείς υδροφορείς (900-2.400m) μέσα σε Ηωκαινικούς σχηματισμούς στην ευρύτερη χερσαία λεκάνη Θεσσαλονίκης, συμπεριλαμβανομένων τόσο των δομών παγίδευσης Λουδία και Αλεξάνδρειας όσο και των βαθύτερων ψαμμιτικών σχηματισμών, με μέσο πορώδες 8-10% και συνολική αποθηκευτική ικανότητα 640 Mt CO_2
(ζ) οι ιζηματογενείς σχηματισμοί της Μεσοελληνικής Αύλακας, με μέσο βάθους 1.000m, μέση τιμή πορώδους 10%, μέσο πάχος 300m και αποθηκευτική ικανότητα 216 Mt CO_2.

Στη χερσαία λεκάνη Θεσσαλονίκης καθώς και στη Μεσοελληνική αύλακα, όπου υπάρχει η δυνατότητα γεωλογικής αποθήκευσης CO_2 σε αλμυρούς υδροφορείς, θερμομετρήσεις στο εσωτερικό βαθιών γεωτρήσεων έρευνας υδρογονανθράκων έχουν δώσει τα ακόλουθα αποτελέσματα:
(α) Λεκάνη Θεσσαλονίκης: Η θερμοκρασία των 65^{o}C (διόρθωση Horner) καταγράφηκε στη γεώτρηση ALEXANDRIA-1 σε βάθος 1.705m, μέσα στο οφιολιθικό υπόβαθρο. Στη γεώτρηση LOUDIAS-1 διαπιστώθηκαν θερμοκρασίες των 74 και 83^{o}C σε βάθη 1.520 και 2.614m αντίστοιχα σε Ηωκαινικά-Ολιγοκαινικά ιζήματα. Θερμοκρασίες των 65, 76 και 79,5^{o}C έχουν διαπιστωθεί σε βάθη 2.446, 3.629 και 2.745m, μέσα σε Παλαιογενή (Ηωκαινικά-Ολιγοκαινικά) ιζήματα, στις γεωτρήσεις KORYFI-1, KLEIDI-1 και AEGINIO-1 αντίστοιχα [36, 37].
(β) Μεσοελληνική Αύλακα: Στη γεώτρηση NEAPOLIS-2, έχει μετρηθεί θερμοκρασία των 49^{o}C (μη διορθωμένη τιμή) σε βάθος 1.126m, στους σχηματισμούς του Σενωνίου. Στη γεώτρηση NEAPOLIS-1, η θερμοκρασία των 50^{o}C έχει διαπιστωθεί στα 600m, στην οροφή των ασβεστολίθων του Σενωνίου [36]. Όμως, σε ερευνητική γεώτρηση που ανορύχθηκε από το ΙΓΜΕ, το 1998, σε απόσταση 30m από αυτήν, καταγράφηκε θερμοκρασία μόλις 23^{o}C σε βάθος 605m [38].
Η λεκάνη του Πρίνου είναι υποθαλάσσια, οπότε και τα διαθέσιμα θερμομετρικά στοιχεία των εκεί γεωτρήσεων έρευνας υδρογονανθράκων δεν έχουν σημασία, αφού δεν μπορεί να γίνει αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού. Ανατολικά αυτής, βρίσκεται η λεκάνη του Δέλτα Νέστου, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως η χερσαία προέκτασή της. Στη λεκάνη του Δέλτα Νέστου ανορύχθηκαν οι γεωτρήσεις έρευνας υδρογονανθράκων Ν-1, Ν-2 και Ν-3, στις οποίες καταγράφηκαν οι θερμοκρασίες των 115, 127 και 138^{o}C σε βάθη 2.970, 3.104 και 3.601m αντίστοιχα, μέσα στα Μειοκαινικά ιζήματα [36, 37] καθώς και η ερευνητική γεωθερμική γεώτρηση Ν-1G (ΒΔ του Ερατεινού Χρυσούπολης), βάθους 1.377 m, με καταγεγραμμένη θερμοκρασία 122^{o}C στον πυθμένα της, μέσα στο μεταμορφωμένο (γνευσιακό, αμφιβολιτικό) υπόβαθρο [39].

Στις περιπτώσεις των βαθιών αλμυρών υδροφορέων σε χερσαίες ιζηματογενείς λεκάνες, μπορεί να γίνει συνεκτίμηση της δυνατότητας αποθήκευσης του CO_2 σε συνδυασμό με την αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού, λαμβάνοντας υπόψη και εξετάζοντας σχετικές τεχνικές-προτάσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Center for Climate and Energy Solutions (C2ES), Historical Global CO_2 Emissions, http://www.c2es.org/facts-figures/international-emissions/historical

[2] Αρβανίτης, Α., και Χατζηγιάννης, Γ., 2013, Τι Σημαίνει στην Πραγματικότητα Γεωλογική Αποθήκευση του CO_2;, Απόδοση στα Ελληνικά της Αγγλικής Έκδοσης "What does CO_2 geological storage really mean?" του Ευρωπαϊκού Δικτύου CO_2GeoNet, ΕΚΒΑΑ-ΙΓΜΕΜ

[3] Κούκουζας, Ν., Στογιάννης, Π., Κλήμαντος, Π., και Κακαράς, Ε., 2005, «Αποθήκευση Διοξειδίου του Άνθρακα σε Υπόγειους Γεωλογικούς Ταμιευτήρες», Σύγχρονη Τεχνική Επιθεώρηση, 164, σελ. 52-57.

[4] Χατζηγιάννης, Γ., και Αρβανίτης, Α., 2008, «Γεωλογική Αποθήκευση του CO_2 και Αξιολόγηση της Δυνατότητας αυτής στην Ευρώπη», Ελληνική Γεώσφαιρα, 2(2), σελ. 15-21

[5] International Panel on Climate Change (IPCC), 2005, IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage, Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA

[6] International Energy Agency (IEA) - Greenhouse Gas R&D Programme, 2008, Geological Storage of Carbon Dioxide - Staying Safety Underground, http://www.co2crc.com.au/dls/external/geostoragesafe-IEA.pdf

[7] Det Norske Veritas (DNV), 2010, CO_2 Storage - Is It Safe? Towards Large-Scale Implementation of CCS, Research and Position Paper 06-2010

[8] Ziogou, F., Gegeni, V., Koukouzas, N., de Angelis, D., Libertini, S., Beaubien, S.E., Lombardi, S., West, J. M., Jones, D. G., Coombs, P., Barlow, T. S., Gwosdz, S., and Krüger, M., 2013, "Potential environmental impacts of CO_2 leakage from the study of natural analogue sites in Europe", Energy Procedia, 37, pp. 3521-3528

[9] Pruess, K., 2006, "Enhanced Geothermal Systems (EGS) Using CO_2 as Working Fluid - A Novel Approach for Generating Renewable Energy with Simultaneous Sequestration of Carbon", Geothermics, 35, pp. 351-367

[10] Brown, D., 2000, "A Hot Dry Rock Geothermal Energy Concept Utilizing Supercritical CO_2 Instead of Water", Proc. 25th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, pp. 233-238

[11] Randolph, J. B., and Saar, M. O., 2010, "Coupling Geothermal Energy Capture with Carbon Dioxide Sequestration in Naturally Permeable, Porous Geological Formations: A Comparison with Enhanced Geothermal Systems", GRC Transactions, 34, pp. 433-437

[12] Atrens, A. D., Gurgenci, H., and Rudolph, V., 2009, "CO_2 Thermosiphon for Competitive Geothermal Power Generation", Energy Fuels, 23, pp. 553-557

[13] Pruess, K., 2008, On the Production Behaviour of Enhanced Geothermal Systems with CO_2 as Working Fluid, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA

[14] Pruess, K., 2007, Enhanced Geothermal Systems (EGS) Comparing Water with CO_2 as Heat Transmission Fluids, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA

[15] Ueda, A., Kato, K., Ohsumi, T., Yajima, T., Ito, H., Kaieda, H., Metcalfe, R., and Takase, H., 2005, "Experimental Studies of CO_2-Rock Interaction at Elevated Temperatures Under Hydrothermal Conditions", Geochemical Journal, 39(5), pp. 417-425

[16] Apps, J., and Pruess, K., 2011, "Modelling Geochemical Processes in Enhanced Geothermal Systems with CO_2 as Heat Transfer Fluid", Proc. 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, SGP-TR-191, 8 p.

[17] Randolph, J. B., and Saar, M. O., 2011, "Coupling Carbon Dioxide Sequestration with Geothermal Energy Capture in Naturally Permeable, Porous Geological Formations: Implications for CO_2 Sequestration", Energy Procedia, 4, pp. 2206-2213

[18] Garapati, N., Randolph, J. B., and Saar, M. O., 2014, "Total Heat Energy Output From, Thermal Energy Contributions To, and Reservoir Development of CO_2 Plume Geothermal (CPG) Systems", Proc. 39th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, SGP-TR-202, 12 p.

[19] Randolph, J. B., and Saar, M. O., 2011, "Impact or Reservoir Permeability on the Choice of Subsurface Geothermal Heat Exchange Fluid: CO_2 versus Water and Native Brine", Geothermal Resources Council Transactions, 35, pp. 521-526

[20] Randolph, J. B., 2011, Coupling Geothermal Energy Capture with Carbon Dioxide Sequestration in Naturally Permeable, Porous Geological Formations - A Novel Approach for Expanding Geothermal Energy Utilization, Ph.D, Dissertation, University of Minnesota - Minneapolis, USA

[21] Randolph, J. B., and Saar, M. O., 2011, "Combining Geothermal Energy Capture with Geologic Carbon Dioxide Sequestration", Geophysical Research Letter, 38, L10401, 7 p.

[22] Salimi, H., and Wolf, K.-H., 2012, "Integration of Heat-Energy Recovery and Carbon Sequestration", International Journal of Greenhouse Gas Control, 6, pp. 56-68

[23] Randolph, J. B., Saar, M. O., and Bielickic, J., 2013, "Geothermal Energy Production at Geological CO_2 Sequestration Sites: Impact of Thermal Drawdown on Reservoir Pressure", Energy Procedia, 37, pp. 6625-6635

[24] Ahmed, W., 2012, CO_2 as a Working Fluid in Geothermal Power Plants: Literature Review, Summary and Outlook, Independent Study, Universität Stuttgart - Institut für Wasser- und Umwellsystemmodellierung

[25] Buscheck, T., Chen, M., Sun, Y., Hao, Y., and Elliot, T., 2012, Two-Stage, Integrated, Geothermal-CO_2 Storage Reservoirs: An Approach for Sustainable Energy Production, CO_2-Sequestration Security, and Reduced Environmental Risk, Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA, USA

[26] Buscheck, T.A., Chen, M., Lu, C., Sun, Y., Hao, Y., Celia, M.A., Elliot, T.R., Choi, H., and Bielicki, J.M., 2013, "Analysis of Operational Strategies for Utilizing CO_2 for Geothermal Energy Production", Proceedings, 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, SGP-TR-198, 12 p.

[27] Kervévan, C., Bugarel, F., Galiègue, X., Le Gallo, Y., May, F., O'Neil, K., and Sterpenich, J., 2013, "CO_2-Dissolved - A Novel Approach to Combining CCS and Geothermal Heat Recovery", Sustainable Earth Sciences 2013, EAGE, 30 Sept. - 4 Oct. 2013, Pau, France, A012, 5 p.

[28] Kervévan, C., 2013, "CO_2-DISSOLVED: Storing Industrial CO_2 Emissions While Producing Geothermal Energy for Local Use", GEO ENeRGY, 28, pp. 3

[29] http://co2-dissolved.brgm.fr/

[30] Kervévan, C., Beddelem, M.-H., and O'Neil K., 2014, "CO2-DISSOLVED: a Novel Concept Coupling Geological Storage of Dissolved CO_2 and Geothermal Heat Recovery - Part 1: Assessment of the Integration of an Innovative Low-cost, Water-based Capture Technology", Energy Procedia, 63, 4508-4518

[31] Kervévan, C., Beddelem, M.-H., Galiègue, X., Le Gallo, Y., May, F., O'Neil K., and Sterpenich. J., 2017, "Main Results of the CO2-DISSOLVED Project: First Step toward a Future Industrial Pilot Combining Geological Storage of Dissolved CO_2 and Geothermal Heat Recovery", Energy Procedia, 114, 4086-4098

[32] Kervévan, C., 2017, "CO_2-DISSOLVED: An Innovative CCS Approach Fitted to Small Industrial Emitters", Presentation, 12th CO2GeoNet Open Forum 2017, 8-11 May 2017, Venice, Italy, http://conference2017.co2geonet.com/media/28771/05_kervévan.pdf

[33] ThinkGeoEnergy ltd., 2017, "Capturing and Storing CO_2 – a Groundbreaking Project at the Hellisheidi Geothermal Plant, http://www.thinkgeoenergy.com/capturing-and-storing-co2-a-groundbreaking-project-at-the-hellisheidi-geothermal-plant/

[34] Hatziyannis, G. and Xenakis, M., 2003, Study area D: Greek Onshore and Offshore Tertiary Sedimentary Rocks, GESTCO$_2$, IGME, Athens

[35] EU GeoCapacity Consortium, 2009, Storage Capacity, WP2 Report, D16, pp. 144-147

[36] Karytsas, C., 1990, Inventory of Low-Enthalpy Geothermal Resources Discovered Through Deep Oil and Gas Exploration Wells, Final report for contract DG XVII 7030/ETD/89-6, Centre for Renewable Energy Sources, Pikermi, Greece.

[37] Société de Prospection et d' Études Géothermiques (S.P.E.G.), 1982, Evaluation du potentiel géothermique des basins Tertiaires du Nord de la Grèce, Commission des Communautés Européennes, Contrat n° EG-A-Y-106-F(G), Texte & Annexes

[38] Κουτσινός, Σ., Κολιός, Ν., Ατζέμογλου, Α., και Καρυδάκης, Γ., 2001, Γεωθερμική Έρευνα στους Νομούς Κοζάνης & Φλώρινας, Τεχνική Έκθεση, Ι.Γ.Μ.Ε., Θεσσαλονίκη

[39] Sotiropoulos, S., 1989, Final Geological Report of Geothermal Well Nestos-1G, Internal Report, DEP/EKY, Athens

Ενεργειακή πολιτική

ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΕΠΙ ΤΟΥ ΙΣΧΥΟΝΤΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ιωάννης Π. Χαλδέζος[1*], Σπυρίδων Κ. Καρύτσας[2] και Κωνσταντίνος Κ. Καρύτσας[2]

[1*]Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ)
19ο χλμ. Λ. Μαραθώνος, Πικέρμι, 19009, e-mail: ihaldezos@cres.gr
[2]Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η συνοπτική περιγραφή του ισχύοντος ελληνικού νομοθετικού πλαισίου σχετικά με την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας, καθώς και η παράθεση στοχευμένων προτάσεων για τη βελτίωσή του. Ειδικότερα, σε αυτήν την εργασία γίνεται αναφορά σε νομοθετήματα και υπουργικές αποφάσεις, που αφορούν κυρίως: α) την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, β) την τηλεθέρμανση/τηλεψύξη, γ) τις αγροτικές εφαρμογές, δ) τα ιαματικά λουτρά και ε) τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (ΓΑΘ).

Αξίζει να επισημανθεί ότι το πρώτο σε χρονική σειρά ελληνικό νομοθέτημα, που αναφέρεται στη γεωθερμία, είναι το υπ' αρ. 210/1973 (ΦΕΚ 277 Α), το οποίο τιτλοφορείται ως «Μεταλλευτικός Κώδικας» και όπου συγκεκριμένα στο Άρθρο 2 § 1(ιβ) αυτού γίνεται λόγος για τη γεωθερμική ενέργεια. Έκτοτε από την έκδοση αυτού ακολούθησαν νόμοι, υπουργικές αποφάσεις, διατάξεις κ.λπ. με σκοπό τη δημιουργία των προϋποθέσεων για την ορθολογική αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού στην Ελλάδα.

Σήμερα, ο βασικός, ο θεμελιώδης και ο ισχύων νόμος για την έρευνα, την εκμετάλλευση και τη διαχείριση του γεωθερμικού δυναμικού στην Ελλάδα είναι ο Ν. 3175/2003. Επίσης, υπογραμμίζεται ότι ο εν λόγω νόμος αναφέρεται βασικά στην περίπτωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και της τηλεθέρμανσης μέσω της εκμετάλλευσης του γεωθερμικού δυναμικού. Παράλληλα, βάσει του προαναφερθέντος νόμου, σημειώνεται ότι η δυνατότητα για την αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού στην Ελλάδα αποσκοπεί άμεσα στην εξυπηρέτηση του γενικού συμφέροντος και προωθεί τη βιώσιμη ανάπτυξη, διότι η γεωθερμία είναι τεχνολογία ανανεώσιμης πηγής ενέργειας (ΑΠΕ).

Από την άλλη πλευρά τονίζεται πως η ανάγκη για τη βελτίωση του νομοθετικού πλαισίου στην Ελλάδα με στόχο την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας καθίσταται επιτακτική –πρωτίστως εν μέσω της οικονομικής κρίσης που διανύει η χώρα μας– λόγω του ότι η γεωθερμία μπορεί να διαδραματίσει κυρίαρχο ρόλο ως αξιοσημείωτη τεχνολογία ΑΠΕ, καθ' όσον αυτή αποτελεί φθηνή και ήπια πηγή ενέργειας με πλείστα άμεσα ή/και έμμεσα οφέλη.

Λέξεις Κλειδιά: *Ελληνικό νομοθετικό πλαίσιο γεωθερμίας, γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (ΓΑΘ), γεωθερμική ενέργεια, τηλεθέρμανση, ιαματικά λουτρά*

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην Ελλάδα υφίσταται νομοθετικό πλαίσιο για τη γεωθερμία και αποτελείται από πληθώρα νομοθετημάτων. Το πρώτο σε χρονική σειρά ελληνικό νομοθέτημα, που αναφέρεται στη γεωθερμία, είναι το υπ' αρ. 210/1973 (ΦΕΚ 277 Α) [1], το οποίο τιτλοφορείται ως «Μεταλλευτικός Κώδικας». Συγκεκριμένα, στο Άρθρο 2 § 1(ιβ) αυτού γίνεται λόγος για τη γεωθερμική ενέργεια. Έκτοτε από την έκδοση αυτού ακολούθησαν νόμοι, υπουργικές αποφάσεις, διατάξεις κ.λπ. με σκοπό τη δημιουργία των προϋποθέσεων για την ορθολογική αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού και της αβαθούς γεωθερμίας στη χώρα μας.

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι σύμφωνα με το ελληνικό νομοθετικό πλαίσιο ως γεωθερμικό δυναμικό ορίζεται το σύνολο των γηγενών φυσικών ατμών, των θερμών νερών (επιφανειακών ή υπογείων) και της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών, που υπερβαίνουν τους 25 ^{o}C [2]. Από την άλλη πλευρά η θερμότητα των γεωλογικών σχηματισμών και των υδάτων (επιφανειακών ή υπογείων), που δε χαρακτηρίζονται ως γεωθερμικό δυναμικό (δηλαδή $\theta \leq 25$ ^{o}C), ορίζεται ως αβαθής γεωθερμία.

Επισημαίνεται πως βάσει του συνδυασμού του Άρθρου 2 § 2 του Ν. 3468/2006 (ΦΕΚ 129 Α) [3], του Άρθρου 1 § 1 του Ν. 3175/2003 (ΦΕΚ 207 Α) [2] και του Άρθρου 2 του Ν. 2773/1999 (ΦΕΚ 286 Α) [4], καθώς και άλλων νομοθετημάτων η γεωθερμική ενέργεια ορίζεται σαφώς ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (ΑΠΕ).

1. ΤΟ ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται περιγραφή και ανάλυση του ισχύοντος ελληνικού νομοθετικού πλαισίου σχετικά με την εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας. Ειδικότερα, γίνεται αναφορά σε νομοθετήματα, που αφορούν κυρίως: α) την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, β) την τηλεθέρμανση/τηλεψύξη, γ) τις αγροτικές εφαρμογές, δ) τα ιαματικά λουτρά και ε) τις γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (ΓΑΘ).

1.1. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της εκμετάλλευσης του γεωθερμικού δυναμικού στην Ελλάδα αναφέρεται σε αρκετά νομοθετήματα [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9]. Σε αυτό το σημείο αναφέρεται ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της εκμετάλλευσης του γεωθερμικού δυναμικού μπορεί να γίνει από πεδία χαμηλής θερμοκρασίας (25-90 ^{o}C) [2] και από πεδία υψηλής θερμοκρασίας (> 90 ^{o}C) [2]. Σημειώνεται ότι σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία ως γεωθερμικό πεδίο ορίζεται ο ενιαίος μεταλλευτικός χώρος, που μέσα σε αυτόν εντοπίζεται αυτοτελές γεωθερμικό δυναμικό [2] ενώ προϊόν του γεωθερμικού πεδίου θεωρείται το εκμεταλλεύσιμο (αξιοποιήσιμο) θερμικό και ενεργειακό του περιεχόμενο [2]. Από την άλλη πλευρά αναφέρεται ότι τα γεωθερμικά πεδία διακρίνονται σε βεβαιωμένα και πιθανά. Βεβαιωμένα γεωθερμικά πεδία είναι αυτά που τα χαρακτηριστικά τους (θερμοκρασία κ.ά.) είναι πιστοποιημένα με υψηλό βαθμό αξιοπιστίας με ερευνητικές εργασίες (γεωτρήσεις κ.ά.) [2]. Παράλληλα, επισημαίνεται ότι πιθανά γεωθερμικά πεδία ορίζονται αυτά που τα χαρακτηριστικά τους εκτιμώνται από προκαταρκτικά ερευνητικά έργα [2].

Τονίζεται ότι στη χώρα μας το δικαίωμα έρευνας και διαχείρισης του γεωθερμικού δυναμικού και των γεωθερμικών πεδίων ανήκει μόνο στο Δημόσιο {Άρθρο 143 Νομοθετικού Διατάγματος 210/1973 (ΦΕΚ 277 Α) [1] και Άρθρο 3 § 2 Ν. 3175/2003 (ΦΕΚ 207 Α) [2]}. Για τα βεβαιωμένα ή πιθανά γεωθερμικά πεδία χαμηλής θερμοκρασίας το δικαίωμα του Δημοσίου για την έρευνα και τη διαχείριση του συνόλου ή τμημάτων του γεωθερμικού πεδίου εκμισθώνεται ύστερα από ανοικτό πλειοδοτικό διαγωνισμό με γραπτές σφραγισμένες προσφορές ή με διαδικασία υποβολής δεσμευτικών επενδυτικών προτάσεων ύστερα από πρόσκληση εκδήλωσης ενδιαφέροντος, ανάλογα με τα ειδικότερα χαρακτηριστικά μεγέθη του πεδίου (θερμοκρασία, έκταση κ.λπ.), καθώς και τις ειδικές συνθήκες και περιστάσεις που αφορούν την εκμίσθωσή του [10].

Από το Άρθρο 9 § 2 του Ν. 2773/1999 (ΦΕΚ 286 Α) [4] και σε συνδυασμό με πιο πρόσφατα νομοθετήματα συνάγεται ότι η άδεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χορηγείται από τον Υπουργό Περιβάλλοντος και Ενέργειας ύστερα από σχετική γνωμοδότηση της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ).

Σύμφωνα με τον Ν. 4001/2011 (ΦΕΚ 179 Α) [11] ο έλεγχος των εργασιών έρευνας και εκμετάλλευσης των γεωθερμικών πεδίων ασκείται και από τις επιθεωρήσεις μεταλλείων βάσει του Κανονισμού

Μεταλλευτικών Λατομικών Εργασιών (ΚΜΛΕ), του Κανονισμού Γεωθερμικών Εργασιών και του Μεταλλευτικού Κώδικα. Υπογραμμίζεται ότι για την άσκηση των ελέγχων αυτών οι αντίστοιχες επιθεωρήσεις δύνανται να ζητούν τη συνδρομή του Ινστιτούτου Γεωλογικών Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ).

1.2. Δίκτυα διανομής θερμικής ενέργειας (τηλεθέρμανση ή τηλεψύξη)

Σύμφωνα με τον Ν. 3175/2003 (ΦΕΚ 207 Α) [2] για την εγκατάσταση, διαχείριση και εκμετάλλευση δικτύου τηλεθέρμανσης ή τηλεψύξης σε τρίτους απαιτείται άδεια διανομής θερμικής ενέργειας, η οποία χορηγείται από τον Υπουργό Περιβάλλοντος και Ενέργειας ύστερα από γνωμοδότηση της ΡΑΕ. Αξίζει να σημειωθεί ότι η άδεια διανομής θερμικής ενέργειας χορηγείται μόνο σε νομικά πρόσωπα [2]. Αυτή έχει ισχύ για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και εξυπηρετεί συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή [2]. Τονίζεται ότι αν η θερμική ενέργεια παράγεται από εγκαταστάσεις συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας, η άδεια διανομής θερμικής ενέργειας χορηγείται μαζί με την άδεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, εφ' όσον υποβληθεί σχετική αίτηση για τη χορήγηση ενιαίας άδειας [2]. Για τη χορήγηση αδειών διανομής θερμικής ενέργειας, μεταξύ των άλλων, ισχύουν και οι διατάξεις του Άρθρου 28 του Ν. 2773/1999 (ΦΕΚ 286 Α) [4]. Επισημαίνεται ότι βάσει του Άρθρου 14 § 5 του Ν. 3175/2003 (ΦΕΚ 207 Α) [2], όταν η διανομή θερμικής ενέργειας τροφοδοτείται από γεωθερμική ενέργεια εφαρμόζεται η § 3, καθώς και οι σχετικές διατάξεις με την έρευνα και εκμετάλλευση του γεωθερμικού δυναμικού του Ν. 3175/2003 (ΦΕΚ 207 Α) [2].

1.3. Αγροτικές εφαρμογές

Βάσει των διατάξεων της Υπουργικής Απόφασης Δ9Β/Φ166/23880/ΓΔΦΠ4211 (ΦΕΚ 2450 Β) [12] καθορίζονται οι ειδικότεροι όροι της άδειας διανομής θερμικής ενέργειας από εκμετάλλευση γεωθερμικού δυναμικού χαμηλής θερμοκρασίας αποκλειστικά για αγροτικές εκμεταλλεύσεις. Για την έκδοση της εν λόγω άδειας απαιτείται η κατάθεση τεχνικοοικονομικής μελέτης συμπεριλαμβανομένου επ' αυτής χρονοδιαγράμματος ολοκλήρωσης εργασιών, καθώς και η κατάθεση μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων [12]. Παράλληλα, σημειώνεται ότι για κάθε εκμισθούμενο δικαίωμα διαχείρισης γεωθερμικού πεδίου χαμηλής θερμοκρασίας δύναται να εκδοθεί μία και μόνη άδεια διανομής θερμικής ενέργειας για αποκλειστική χρήση σε αγροτικές εκμεταλλεύσεις [12]. Ο δικαιούχος της άδειας διανομής θερμικής ενέργειας ορίζεται ο μισθωτής του πεδίου [12]. Στην περίπτωση που η εκμετάλλευση γεωθερμικού πεδίου χαμηλής θερμοκρασίας αφορά αποκλειστικά σε διανομή θερμικής ενέργειας για αγροτικές εκμεταλλεύσεις, η άδεια διανομής θερμικής ενέργειας χορηγείται από τον Υπουργό Περιβάλλοντος και Ενέργειας μετά από γνώμη της οικείας Περιφέρειας. Με απόφαση του Υπουργού Περιβάλλοντος και Ενέργειας καθορίζονται οι ειδικότεροι όροι της άδειας διανομής θερμικής ενέργειας, οι οποίοι πρέπει, μεταξύ άλλων, να διασφαλίζουν την εξυπηρέτηση του δημόσιου συμφέροντος, την υποχρέωση τήρησης διαφανών όρων συναλλαγής, τον καθορισμό της μεθοδολογίας για τον υπολογισμό των τιμολογίων, την τήρηση των όρων ασφαλείας και την προστασία του περιβάλλοντος, τον τρόπο ελέγχου της τήρησης των όρων της άδειας, τη διαδικασία ανάκλησης αυτής και την παροχή τυχόν εγγυήσεων [12].

1.4. Ιαματικά λουτρά

Για τα ιαματικά λουτρά σημαντικότερος είναι ο Ν. 3498/2006 (ΦΕΚ 230 Α) [13], ο οποίος αναφέρεται στην ανάπτυξη του ιαματικού τουρισμού και περιέχει πολλές διατάξεις που έχουν εφαρμογή στις περιπτώσεις χρήσης ή άλλης αξιοποίησης ιαματικών φυσικών πόρων, καθώς και σε κέντρα υδροθεραπείας, θαλασσοθεραπείας, φυσικής αποκατάστασης, αναζωογόνησης κ.λπ. Ως ιαματική πηγή ορίζεται η φυσική ανάβλυση ή άντληση ιαματικού φυσικού πόρου με τεχνικό έργο, όπως από γεώτρηση, φρέαρ, τάφρο ή σήραγγα (φυσική ή τεχνητή) ή φυσική δημιουργία ιαματικού πηλού˙ ενώ ως ιαματικοί φυσικοί πόροι θεωρούνται τα φυσικά νερά (ψυχρά ή θερμά), οι ατμοί, τα φυσικά αέρια ή οι πηλοί, που έχουν ιαματικές ιδιότητες, αναγνωρισμένες σύμφωνα με τις διατάξεις του Ν. 3498/2006 (ΦΕΚ 230 Α) [13].

Έπειτα από τρία έτη από την έκδοση του Ν. 3498/2006 (ΦΕΚ 230 Α) [13] εκδόθηκε η Υπουργική Απόφαση 9833/2009 (ΦΕΚ 1055 Β) [14], η οποία σε υψηλό βαθμό έθεσε τους όρους και τις προϋποθέσεις λειτουργίας των μονάδων ιαματικής θεραπείας, των κέντρων ιαματικού τουρισμού και των κέντρων θαλασσοθεραπείας.

Αξίζει να επισημανθεί ότι τα νομοθετήματα για την έρευνα ή την εκμετάλλευση του γεωθερμικού δυναμικού δεν έχουν εφαρμογή στους ιαματικούς φυσικούς πόρους [13].

1.5. Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας (ΓΑΘ)

Πρώτη αναφορά στην αβαθή γεωθερμία, δηλαδή το είδος της γεωθερμίας την οποία αξιοποιούν οι ΓΑΘ και η οποία σύμφωνα με τη ελληνική νομοθεσία δεν ανήκει στο γεωθερμικό δυναμικό, γίνεται στον Ν. 3175/2003 (ΦΕΚ 207 Α) [2]. Τα σημαντικότερα σημεία του νόμου αυτού, τα οποία αφορούν τις ΓΑΘ είναι το Άρθρο 2 § 1(α) και το Άρθρο 11 § 1 και § 2.

Η ισχύουσα Υπουργική Απόφαση η οποία αναφέρεται στο Άρθρο 11 § 2 του Ν. 3175/2003 είναι η Υπουργική Απόφαση Δ9Β,Δ/Φ166/οικ13068/ΓΔΦΠ2488 του 2009 (ΦΕΚ 1249 Β) «Άδειες εγκατάστασης για ίδια χρήση ενεργειακών συστημάτων θέρμανσης - ψύξης χώρων μέσω εκμετάλλευσης της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, επιφανειακών και υπογείων, που δε χαρακτηρίζονται γεωθερμικό δυναμικό» [15]. Σκοπός της εν λόγω Υπουργικής Απόφασης είναι ο καθορισμός των όρων, προϋποθέσεων, απαιτούμενων δικαιολογητικών και της διαδικασίας έκδοσης άδειας υπέρ του κυρίου ενός ακινήτου για ίδια χρήση ενεργειακών συστημάτων θέρμανσης ή/και ψύξης κάθε χώρου του ακινήτου μέσω της εκμετάλλευσης της θερμότητας των γεωλογικών σχηματισμών και των νερών, επιφανειακών και υπόγειων, που δε χαρακτηρίζονται ως γεωθερμικό δυναμικό (Άρθρο 1). Ειδική αναφορά θα πρέπει να γίνει στο Άρθρο 3 της Υπουργικής Απόφασης, το οποίο ορίζει ότι η άδεια εκδίδεται από τη Διεύθυνση Ανάπτυξης της Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης [βάσει του Ν. 3852/2010 (ΦΕΚ 87 Α) [16] οι αρμοδιότητες της Νομαρχιακής Αυτοδιοίκησης αποτελούν εφεξής αρμοδιότητες της αντίστοιχης Περιφέρειας] στην αρμοδιότητα της οποίας υπάγεται το ακίνητο, υπέρ του ιδιοκτήτη ή επικαρπωτή του ακινήτου. Επίσης, στο Άρθρο 4 ορίζονται οι περιοριστικοί όροι οι οποίοι πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν, σχετικά με την εγκατάσταση και τη λειτουργία του συστήματος. Οι περιοριστικοί όροι αφορούν την περίπτωση ανόρυξης γεώτρησης ή κατασκευής ορύγματος, τη χρήση επιφανειακών ή υπογείων υδάτων και την πιστοποίηση των αντλιών θερμότητας και των συστημάτων. Μεταξύ των περιοριστικών όρων αναφέρονται οι ελάχιστες αποστάσεις της γεώτρησης από τα όρια της ιδιοκτησίας, από γειτονικά κτίρια άλλης ιδιοκτησίας, από την απαλλοτριωμένη σιδηροδρομική ζώνη, τους κύριους αγωγούς φυσικού αερίου, τους κύριους υπόγειους αγωγούς (ύδατος, αποχέτευσης κ.λπ.) και από καλώδια διανομής μέσης / υψηλής τάσης.

Σημαντικός για την ανάπτυξη των ΑΠΕ γενικότερα, αλλά και των ΓΑΘ πιο συγκεκριμένα, είναι ο Ν. 3851/2010 (ΦΕΚ 85 Α) [17]. Σύμφωνα με το Άρθρο 10 § 2 του εν λόγω νόμου, πριν από την έναρξη ανέγερσης όλων των νέων κτιρίων θα πρέπει να εκπονείται μελέτη σχετικά με την εγκατάσταση τουλάχιστον ενός εναλλακτικού συστήματος ενέργειας. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται και οι αντλίες θερμότητας των οποίων ο εποχιακός συντελεστής απόδοσης ["seasonal performance factor" (SPF)] είναι μεγαλύτερος από 1,15x1/η, με το «η» να ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής ακαθάριστης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προς την κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με την Οδηγία 2009/28/ΕΚ. Επίσης, βάσει του Άρθρου 10 § 3 του συγκεκριμένου νόμου, για τα κτίρια για τα οποία κατατίθεται αίτηση χορήγησης οικοδομικής άδειας μετά την 01/01/2011 είναι υποχρεωτική η κάλυψη μέρους των αναγκών σε ζεστό νερό χρήσης από ηλιοθερμικά συστήματα (τουλάχιστον το 60% των ετήσιων αναγκών). Όμως, η υποχρέωση αυτή δεν ισχύει σε περίπτωση που οι ανάγκες καλύπτονται από άλλα συστήματα μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται και οι αντλίες θερμότητας με SPF που συμφωνεί με τα όσα ορίζονται στην § 2 του ίδιου Άρθρου.

Αναφορά θα πρέπει να γίνει και στη σχετική νομοθεσία, η οποία αφορά τα συνδεόμενα με την ενέργεια προϊόντα (μεταξύ των οποίων και οι αντλίες θερμότητας) σχετικά με: α) τον καθορισμό απαιτήσεων οικολογικού σχεδιασμού και β) την ένδειξη της κατανάλωσης ενέργειας και λοιπών πόρων. Το Προεδρικό Διάταγμα 7/2011 (ΦΕΚ 14 Α) [18] εναρμονίζει την εθνική νομοθεσία με την Οδηγία 2009/125/ΕΚ [19] και τροποποιεί το Προεδρικό Διάταγμα 32/2010 (ΦΕΚ 70 Α) [20], το οποίο είχε σχετικό αντικείμενο. Η Υπουργική Απόφαση 12400/1108 του 2011 (ΦΕΚ 2301 Β) [21] εναρμονίζει την εθνική νομοθεσία με την Οδηγία 2010/30/ΕΕ [22], η οποία αφορά την ένδειξη της κατανάλωσης ενέργειας και λοιπών πόρων από τα συνδεόμενα με την ενέργεια προϊόντα μέσω της επισήμανσης και της παροχής ομοιόμορφων πληροφοριών σχετικά με αυτά.

Στον Ν. 4062/2012 (ΦΕΚ 70 Α) [23], ο οποίος εναρμονίζει το εθνικό δίκαιο ως προς την Οδηγία 2009/28/ΕΚ [24], είναι η πρώτη φορά που οι αντλίες θερμότητας, οι οποίες αξιοποιούν τη γεωθερμική, αεροθερμική ή υδροθερμική ενέργεια, αναγνωρίζονται και επισήμως ως ΑΠΕ. Στο Άρθρο 16 § 1 του νόμου αυτού αναφέρεται ότι η ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ για θέρμανση και ψύξη συνυπολογίζεται στον υπολογισμό του μεριδίου ενέργειας ΑΠΕ· ενώ στην § 3 του ίδιου Άρθρου καθορίζεται το τι ακριβώς υπολογίζεται ως ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ για θέρμανση και ψύξη. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι στην ποσότητα της ενέργειας αυτής συμποσείται, μεταξύ των άλλων, και η γεωθερμική ενέργεια, η οποία δεσμεύεται από αντλίες θερμότητας, υπό την

προϋπόθεση ότι η τελική χρήσιμη ενέργεια υπερβαίνει κατά πολύ την πρωτογενή ενέργεια, που απαιτείται για τη λειτουργία των αντλιών θερμότητας. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι στο Παράρτημα 2 του νόμου αυτού παρουσιάζεται η μέθοδος υπολογισμού της ποσότητας της θερμικής ενέργειας που δεσμεύεται από αντλίες θερμότητας και μπορεί να θεωρηθεί ενέργεια από ΑΠΕ για τους σκοπούς του παρόντος νόμου.

Ο Ν. 4122/2013 (ΦΕΚ 42 Α) [25], ο οποίος εναρμονίζει την ελληνική νομοθεσία με την Οδηγία 2010/31/ΕΕ [26], ορίζει στο Άρθρο 2 § 9 ότι αντλία θερμότητας είναι: «Μηχάνημα, συσκευή ή εγκατάσταση που μεταφέρει θερμότητα από το φυσικό περιβάλλον, όπως ο αέρας, το νερό ή το έδαφος, σε κτίρια με την αναστροφή της φυσικής ροής της θερμότητας, κατά τρόπο ώστε να ρέει από χαμηλότερη σε υψηλότερη θερμοκρασία· για τις αναστρέψιμες αντλίες θερμότητας, μπορεί επίσης να μεταφέρει θερμότητα από το κτίριο στο φυσικό περιβάλλον». Με τον προαναφερθέντα νόμο καταργείται ο ορισμός που δινόταν για την αντλία θερμότητας από τον Ν. 3661/2008 (ΦΕΚ 89 Α) [27], μέσω του οποίου η ελληνική νομοθεσία εναρμονιζόταν με την Οδηγία 2002/91/ΕΚ [28].

Η Απόφαση 2013/114/ΕΕ [29] καθορίζει τις κατευθυντήριες γραμμές προς τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με τον υπολογισμό της ενέργειας από ΑΠΕ, την οποία παρέχουν διαφορετικές τεχνολογίες αντλιών θερμότητας, σύμφωνα με το Άρθρο 5 της Οδηγίας 2009/28/ΕΚ (το οποίο αντιστοιχεί στο Άρθρο 16 του Ν. 4062/2012). Ειδικότερα, μέσα από την Οδηγία αυτή ο βαθμός απόδοσης του συστήματος «η» (ο οποίος αναφέρεται και παραπάνω) καθορίζεται σε 0,455 (ή 45,5%), τιμή η οποία πρέπει να χρησιμοποιείται μέχρι το 2020. Επίσης, ο SPF καθορίζεται στο 3,2 για γεωθερμικές αντλίες εδάφους – αέρα και στο 3,5 για γεωθερμικές αντλίες εδάφους – νερού. Οι τιμές αυτές ισχύουν τόσο για τα θερμότερα, τα μεσαία και τα ψυχρότερα κλίματα. Οι προαναφερθείσες τιμές του «η» και του SPF χρησιμεύουν: α) για τον υπολογισμό της ποσότητας ενέργειας από ΑΠΕ την οποία παρέχουν οι αντλίες θερμότητας, καθώς και β) για τον καθορισμό των ελάχιστων επιδόσεων των αντλιών θερμότητας, ώστε η ενέργεια που παράγουν να είναι δυνατόν να θεωρηθεί ενέργεια από ΑΠΕ. Σύμφωνα με αυτά ο ελάχιστος SPF για ηλεκτροκίνητες αντλίες θερμότητας πρέπει να έχει την τιμή 2,5, προκειμένου η ενέργεια που παράγουν οι εν λόγω αντλίες θερμότητας να είναι δυνατόν να θεωρείται –σύμφωνα με την Οδηγία– ενέργεια από ΑΠΕ.

2. ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ ΑΛΛΩΝ ΧΩΡΩΝ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Για τη δημιουργία του κατάλληλου περιβάλλοντος για τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων σχετικά με τη γεωθερμική ενέργεια απαιτείται ένα νομικό πλαίσιο, το οποίο θα διέπεται από σαφήνεια, συνοχή, πληρότητα και σταθερότητα· ενώ τα παρεχόμενα κίνητρα, οι νομοθετικές ρυθμίσεις και οι διοικητικές δομές θα πρέπει να διέπονται από συνέχεια και δυνατότητα προβλέψεων [31][32]. Ακολούθως παρουσιάζονται οι βασικότερες προτάσεις για τη βελτίωση του νομοθετικού πλαισίου, σχετικά με τη χρήση της γεωθερμικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την τηλεθέρμανση και τις χρήσεις αβαθούς γεωθερμίας, όπως αυτές έχουν παρουσιαστεί σε σχετικές μελέτες και αναφορές [31] [32] [33] [34] [35] [36] [37] [38].

- Σαφής ορισμός της γεωθερμικής ενέργειας.
- Διαχωρισμός των γεωθερμικών πόρων βάσει παραμέτρων όπως το βάθος, η θερμοκρασία, ο ρυθμός ροής, η τελική χρήση και η ισχύς/μέγεθος του συστήματος, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να κατευθυνθεί η διαδικασία αδειοδότησης.
- Σαφής ορισμός του ιδιοκτήτη του γεωθερμικού πόρου, καθώς και καθορισμός των δικαιωμάτων πρόσβασης σε αυτόν.
- Η νομοθεσία θα πρέπει να δίνει στο κράτος το δικαίωμα χρήσης του πόρου και παροχής αδειών για την έρευνα, ανάπτυξη και παραγωγή γεωθερμικής ενέργειας.
- Ύπαρξη συστήματος αδειοδότησης για την έρευνα και την εκμετάλλευση των γεωθερμικών πόρων. Ορισμός συγκεκριμένης αρχής που θα συντονίζει την έκδοση όλων ή των περισσότερων αδειών (περιβαλλοντικών, λειτουργίας κ.λπ.) και συγκεκριμένο χρονικό όριο για την έκδοση των αδειών. Διαφάνεια και πληρότητα των κριτηρίων βάσει των οποίων εξετάζεται η αίτηση.
- Η εγκατάσταση μικρών οικιακών συστημάτων θα πρέπει να γίνεται μέσω κατάθεσης μιας απλής υποβολής ενημέρωσης σε έναν αρμόδιο κυβερνητικό φορέα, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η παρακολούθηση σε εθνικό επίπεδο, χωρίς να απαιτείται άδεια έρευνας/εγκατάστασης.

- Η αδειοδότηση θα πρέπει να προσφέρει τα αποκλειστικά δικαιώματα έρευνας και εκμετάλλευσης για καθορισμένη περιοχή και καθορισμένο χρονικό διάστημα. Οι άδειες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δε θα πρέπει να έχουν ισχύ μικρότερη από την ελάχιστη διάρκεια ζωής μίας γεωθερμικής γεώτρησης, ενώ θα πρέπει να δίνεται δυνατότητα ανανέωσης της άδειας για μικρότερες περιόδους, βάσει της παραγωγικής ικανότητας και των σχετικών επιπτώσεων σε άλλους φυσικούς πόρους.
- Το κόστος κτήσης άδειας έρευνας γεωθερμικών πόρων θα πρέπει να είναι χαμηλότερο από το αντίστοιχο κόστος άδειας έρευνας για πετρέλαιο και ορυκτά, έτσι ώστε να αντανακλάται η αναλογικά χαμηλότερη οικονομική απόδοση και η προώθηση ενός εθνικού σχεδίου δράσης για τις ΑΠΕ. Ο αιτών θα πρέπει να επιβαρύνεται ανάλογα με την πολυπλοκότητα, το κόστος και τις ενδεχόμενες επιπτώσεις του προτεινόμενου έργου.
- Εξορθολογισμός, όσο αυτό είναι εφικτό, των διοικητικών διαδικασιών για αδειοδότηση, με σκοπό να μειωθεί η πολυπλοκότητα, να εξοικονομηθούν χρήματα και χρόνος και να ενθαρρυνθεί η ανάπτυξη.
- Όσον αφορά τις γεωθερμικές διαδικασίες θα πρέπει οι διοικητικές διαδικασίες, η οργάνωση και οι αντίστοιχες ευθύνες των διοικητικών αρχών σε εθνικό, περιφερειακό και τοπικό επίπεδο να είναι συντονισμένες και να καθορίζονται με σαφήνεια.
- Ύπαρξη μίας εθνικής γεωθερμικής αρχής ή ενός ανεξάρτητου σώματος υπεύθυνου για την προώθηση και την ανάπτυξη του γεωθερμικού τομέα.
- Η νομοθεσία θα πρέπει να στοχεύει στην προστασία του περιβάλλοντος και να θέτει προτεραιότητες για τη χρήση του υπεδάφους. Θα πρέπει να δίνεται προτεραιότητα στη γεωθερμία έναντι άλλων χρήσεων όπως: α) τα μη συμβατικά ορυκτά καύσιμα (π.χ.: ασφαλτούχος άμμος, ασφαλτούχοι σχιστόλιθοι), β) τη δέσμευση και την αποθήκευση άνθρακα (CCS) και γ) την αποθήκευση πυρηνικών αποβλήτων.
- Οι εθνικές αρχές θα πρέπει να υιοθετήσουν μια εθνική στρατηγική για την αξιολόγηση του γεωθερμικού δυναμικού, τον καθορισμό στόχων και την αύξηση της ενημέρωσης του κοινού. Η εθνική στρατηγική για την ανάπτυξη της γεωθερμίας θα πρέπει να συνοδεύεται από κάποια μορφή οικονομικής στήριξης.
- Συλλογή δεδομένων από τις μονάδες που λειτουργούν σε μία κεντρική γεωθερμική βάση δεδομένων και χρήση αυτών με σκοπό την παρακολούθηση της προόδου της αγοράς και την παροχή αδειών για έρευνα και εκμετάλλευση, συμβάλλοντας έτσι σε μια εθνική στρατηγική ανάπτυξης της γεωθερμίας. Τα δεδομένα αυτά θα πρέπει να είναι διαθέσιμα και εύκολα προσβάσιμα.

Σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της γεωθερμίας μπορούν να παίξουν και τα διαφορετικά οικονομικά κίνητρα τα οποία μπορούν να εισαχθούν μέσω νομοθεσίας, πολιτικών ή προγραμμάτων, ώστε να υποστηρίξουν τη συμμετοχή του ιδιωτικού τομέα. Επιπλέον, στην περίπτωση των οικονομικών κινήτρων σημαντικά στοιχεία είναι η σταθερότητα και η δυνατότητα προβλέψεων. Για παράδειγμα στη Γερμανία τα τιμολόγια τροφοδότησης καθορίζονται για μία περίοδο 20 ετών (βάσει του “German Act for Renewable Energy Sources”), έτσι ώστε οι επενδυτές να μπορούν να υπολογίσουν με αξιοπιστία τις αποδόσεις για τα πρώτα 20 έτη λειτουργίας [31]. Σύμφωνα με τον Haraldsson [31] τα κύρια οικονομικά κίνητρα είναι τα ακόλουθα:

- Τιμολόγια τροφοδότησης (“feed-in tariff”), δηλαδή εγγυημένη τιμή στους παραγωγούς για την ηλεκτρική ενέργεια που έχει παραχθεί μέσω γεωθερμίας.
- Τυποποιημένο χαρτοφυλάκιο (“portfolio standards”), δηλαδή ένα συγκεκριμένο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας των εταιρειών παροχής ηλεκτρισμού να προέρχεται από συγκεκριμένες πηγές, όπως ΑΠΕ.
- Φορολογικές πιστώσεις (“tax credits”). Για παράδειγμα: φορολογική πίστωση για επενδύσεις σε ιδιοκτησίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ή/και διανομή γεωθερμικών πόρων ή που χρησιμοποιούν γεωθερμικούς πόρους. Άλλα παραδείγματα είναι: η έκπτωση φόρου, οι φοροαπαλλαγές, η επιταχυνόμενη απόσβεση και ο μηδενικός ΦΠΑ για πώληση ενέργειας ΑΠΕ.
- Δάνεια. Η κυβέρνηση μπορεί –μέσω ευνοϊκών επιτοκίων– να στηρίζει ή να παρέχει απευθείας δάνεια για τον γεωθερμικό τομέα.

- Ασφάλεια. Οι ερευνητικές γεωτρήσεις για γεωθερμικούς πόρους εμπεριέχουν κάποιον κίνδυνο. Η παροχή ασφάλειας μπορεί να παρέχει κάλυψη στους επενδυτές και ειδικά σε αυτούς που δε διαθέτουν αρκετά μεγάλα κεφάλαια, ώστε να καλύψουν οικονομικές αστοχίες οι οποίες σχετίζονται με αποτυχίες στις γεωτρήσεις. Για παράδειγμα: μπορεί ένα δάνειο να μετατρέπεται σε επιχορήγηση στην περίπτωση που οι προσπάθειες για την ανάπτυξη ενός νέου πεδίου αποτύχουν. Επίσης, μπορεί να υπάρξει και μακροχρόνια ασφάλεια, που να καλύπτει τον κίνδυνο μείωσης της παραγωγικής ικανότητας του γεωθερμικού πόρου.
- Μειωμένα τέλη για εισαγωγές με σκοπό την ελάφρυνση των επενδυτών, όσον αφορά τα τέλη για εισαγόμενα μηχανήματα και εξοπλισμό.
- Άμεση στήριξη. Άμεση οικονομική υποστήριξη μέσω επιχορηγήσεων, επιμερισμού του κόστους (κυρίως όσον αφορά τη διερεύνηση των πεδίων) και παροχή πληροφοριών για συγκεκριμένα πεδία με σκοπό τη μείωση των αβεβαιοτήτων και του κινδύνου.
- Τέλη άδειας και δικαιώματα. Ελαχιστοποίηση των τελών και δικαιωμάτων σε σχέση με αυτά που απαιτούνται για τους ορυκτούς πόρους.

Ειδική αναφορά μπορεί να γίνει σε νομοθετικές ρυθμίσεις, που έχουν εφαρμοσθεί στις ΗΠΑ και την Τουρκία, με σκοπό την ανάπτυξη των ΑΠΕ γενικότερα και της γεωθερμίας ειδικότερα. Οι Thorsteinsson και Tester (2010) [39] περιγράφουν πως το “US Energy Policy Act” του 2005 συνέβαλε στην ανάπτυξη της γεωθερμικής ενέργειας στις ΗΠΑ. Βάσει του νόμου αυτού υπήρξε απλοποίηση και εξορθολογισμός της διαδικασίας μίσθωσης εκτάσεων με γεωθερμικό δυναμικό, ενώ λήφθηκαν μέτρα ώστε να αντιμετωπισθούν οι καθυστερήσεις κατά την αδειοδότηση, έτσι ώστε να αποφευχθεί ένα σημαντικό εμπόδιο (“bottleneck”) του συστήματος. Επίσης, άλλαξε η κατανομή των δικαιωμάτων από τα καταβληθέντα γεωθερμικά μισθώματα, έτσι ώστε να υπάρξει μια πιο διαφανής διαδικασία και μια πιο δίκαιη κατανομή των δικαιωμάτων. Σημειώνεται ότι προηγουμένως τα δικαιώματα κατανέμονταν 50/50 μεταξύ πολιτείας και ομοσπονδιακής κυβέρνησης, όμως με την αλλαγή που έγινε δίνεται ¼ στην κομητεία, ½ στην πολιτεία και ¼ στην ομοσπονδιακή κυβέρνηση. Αυξάνοντας την παροχή οφελών για τις τοπικές κοινωνίες από την ανάπτυξη της γεωθερμίας δίνεται κίνητρο στις τοπικές κοινότητες να υποστηρίξουν νέα έργα. Ακόμη, συγκεκριμένα μέτρα πάρθηκαν για να δοθεί κίνητρο για την ανάπτυξη άμεσων χρήσεων. Συγκεκριμένα εδάφη μπορούν να χαρακτηριστούν για αξιοποίηση αποκλειστικά άμεσων χρήσεων μέσω μη ανταγωνιστικής διαδικασίας εκμίσθωσης. Έτσι, μειώνεται το κόστος κτήσης γης για την εκμετάλλευση μέσω άμεσων χρήσεων.

Οι Tükenmez και Demireli (2012) [40] αναφέρουν ότι στην Τουρκία, βάσει του “Electricity Market Law” (Φεβρουάριος 2001), το κόστος του αρχικού τέλους αδειοδότησης είναι 99% χαμηλότερο για τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ΑΠΕ σε σχέση με τους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας που δε χρησιμοποιούν ΑΠΕ. Επιπροσθέτως, οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που βασίζονται στις ΑΠΕ, εξαιρούνται από το ετήσιο τέλος αδειοδότησης για τα οκτώ πρώτα έτη της λειτουργίας τους (μειωμένα τέλη αδειοδότησης). Ο ίδιος νόμος αναγκάζει την Τουρκική Εταιρεία Μεταφοράς Ηλεκτρισμού και τις εταιρείες διανομής ηλεκτρικής ενέργειας να δίνουν προτεραιότητα στις μονάδες ΑΠΕ, όσον αφορά τη σύνδεση στο δίκτυο (προτεραιότητα σύνδεσης). Επίσης, με τροποποίηση στον συγκεκριμένο νόμο αποφασίσθηκε ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ΑΠΕ εξαιρείται έως 0,5 MW από την υποχρέωση λήψης άδειας παραγωγής (εξαίρεση υποχρέωσης λήψης άδειας). Οι ίδιοι συγγραφείς αναφέρουν ότι βάσει του “Law on the Utilization of Renewable Energy Resources for the Purpose of Generating Electricity” (Μάιος 2005) κάθε νομικό πρόσωπο με άδεια λιανικής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας είναι υποχρεωμένο να προμηθεύεται ένα ελάχιστο ποσοστό της ενέργειας αυτής από ενέργεια που έχει παραχθεί από ΑΠΕ. Επιπλέον, οι ανάγκες θερμικής ενέργειας στους δήμους και τις επαρχίες με επαρκείς γεωθερμικούς πόρους θα πρέπει να καλύπτονται κυρίως από γεωθερμικούς και θερμικούς ηλιακούς ενεργειακούς πόρους.

3. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ

Στην παρούσα ενότητα υλοποιείται παράθεση στοχευμένων προτάσεων για τη βελτίωση του υφιστάμενου ελληνικού νομοθετικού πλαισίου σχετικά με τη γεωθερμία.

Σε ό,τι αφορά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να απλοποιηθεί η διαδικασία αδειοδότητησης, δηλαδή να πραγματοποιηθεί εξορθολογισμός των διοικητικών διαδικασιών με σκοπό τη μείωση της πολυπλοκότητας και της γραφειοκρατίας, στοχεύοντας στην εξοικονόμηση χρόνου και χρήματος.

Από την άλλη πλευρά για την παροχή θέρμανσης, ψύξης και ζεστού νερού χρήσης στα κτίρια (οικίες, ξενοδοχειακές μονάδες, γραφεία, εκθεσιακά κέντρα κ.λπ.), καθώς και σε άλλους χώρους (κολυμβητήρια, θερμοκήπια κ.λπ.) πρέπει να γίνει σαφής ορισμός της αβαθούς γεωθερμίας στην ελληνική νομοθεσία. Επιπλέον, σχετικά με τον ορισμό του γεωθερμικού δυναμικού προτείνεται να μεταβληθεί το κατώτατο όριο των 25 ^{o}C σε 30 ^{o}C με σκοπό την περαιτέρω προώθηση των ΓΑΘ. Επιπροσθέτως, πρέπει να θεσπισθεί η επιδότηση στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας (€/kWh) για τη χρήση των ΓΑΘ, καθώς αυτές αποτελούν τεχνολογία αιχμής από όλες τις ΑΠΕ. Παράλληλα και σχετικά με τις ΓΑΘ προτείνονται τα ακόλουθα:

- Μείωση των ελαχίστων απαιτούμενων αποστάσεων της γεώτρησης από γειτονικές ιδιοκτησίες, υπόγειους αγωγούς, αγωγούς φυσικού αερίου, δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας κ.λπ.
- Εξορθολογισμός και απλοποίηση της διαδικασίας αδειοδότησης των συστημάτων ΓΑΘ και ειδικά των συστημάτων κλειστού τύπου.
- Δημιουργία διαδικασίας πιστοποίησης των εγκαταστατών και γεωτρυπανιστών· ορισμός φορέα υπεύθυνου για τη διαδικασία πιστοποίησης.
- Δυνατότητα ενεργειακής εκμετάλλευσης επιφανειακών υδάτων (θάλασσα, ποταμοί, λίμνες κ.λπ.) μέσω συστημάτων ΓΑΘ και από ιδιώτες.
- Δημιουργία μίας βάσης δεδομένων όπου θα καταγράφονται όλα τα εγκατεστημένα συστήματα ΓΑΘ και τα χαρακτηριστικά τους, με σκοπό τη δημιουργία ενός συνολικού σχεδίου ανάπτυξης της τεχνολογίας.

Όσον αφορά τις περιοχές όπου υπάρχουν αναγνωρισμένοι ιαματικοί φυσικοί πόροι με θερμοκρασία άνω των 30 ^{o}C, αλλά δεν υπάρχει ορισμένο γεωθερμικό πεδίο ή περιοχή γεωθερμικού ενδιαφέροντος, προτείνεται να ορίζονται αυτοδίκαια ως περιοχές γεωθερμικού ενδιαφέροντος οι εκτάσεις που περιβάλλουν τους συγκεκριμένους ιαματικούς φυσικούς πόρους, βάσει των υδρογεωλογικών μελετών που κατατέθηκαν για την αναγνώρισή τους.

Στην περίπτωση που η εκμετάλλευση γεωθερμικού πεδίου τοπικού ενδιαφέροντος αφορά αποκλειστικά σε διανομή θερμικής ενέργειας για αγροτικές εκμεταλλεύσεις, η άδεια διανομής θερμικής ενέργειας προτείνεται να χορηγείται από τον Γενικό Γραμματέα της οικείας Αποκεντρωμένης Διοίκησης.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάγκη για τη βελτίωση του νομοθετικού πλαισίου στην Ελλάδα με σκοπό την εκμετάλλευση όλων των χρήσεων της γεωθερμίας καθίσταται επιτακτική πρωτίστως εν μέσω της οικονομικής κρίσης που διανύει η χώρα μας. Από την άλλη πλευρά αναφέρεται ότι το ελληνικό νομοθετικό πλαίσιο για την ανάπτυξη της γεωθερμίας έχει βελτιωθεί με την πάροδο του χρόνου· μολαταύτα απαιτούνται σε αυτό περαιτέρω βελτιώσεις και εξελίξεις.

Η αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού στην Ελλάδα θεωρείται απαραίτητη, καθώς η γεωθερμία μπορεί να παρέχει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την παροχή θέρμανσης / ψύξης / ζεστού νερού χρήσης στα κτίρια, καθώς και άλλες χρήσεις σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Τέλος, υπογραμμίζεται ότι η γεωθερμία είναι αξιοσημείωτη μορφή ΑΠΕ και η εκμετάλλευσή της έχει πλείστα οικονομικά, περιβαλλοντικά, ενεργειακά, αισθητικά και εργασιακά οφέλη σε σχέση με τα υπόλοιπα διαθέσιμα συμβατικά ή μη συμβατικά συστήματα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Νομοθετικό Διάταγμα 210/1973 (ΦΕΚ 277 Α)

[2] Νόμος 3175/2003 (ΦΕΚ 207 Α)

[3] Νόμος 3468/2006 (ΦΕΚ 129 Α)

[4] Νόμος 2773/1999 (ΦΕΚ 286 Α)

[5] Νόμος 2244/1994 (ΦΕΚ 168 Α)

[6] Υπουργική Απόφαση Δ9Β/Φ166/οικ20076/ΓΔΦΠ5258/329 (ΦΕΚ 1530 Β)

[7] Νόμος 3734/2009 (ΦΕΚ 8 Α)

[8] Υπουργική Απόφαση Δ9Δ,Β/Φ166/οικ18513/ΓΔΦΠ 3512 (ΦΕΚ 1819 Β)

[9] Νόμος 3982/2011 (ΦΕΚ 143 Α)

[10] Υπουργική Απόφαση Δ9Β,Δ/Φ166/οικ25158/ΓΔΦΠ4398 (ΦΕΚ 2647 Β)

[11] Νόμος 4001/2011 (ΦΕΚ 179 Α)

[12] Υπουργική Απόφαση Δ9Β/Φ166/23880/ΓΔΦΠ4211 (ΦΕΚ 2450 Β)

[13] Νόμος 3498/2006 (ΦΕΚ 230 Α)

[14] Υπουργική Απόφαση 9833/2009 (ΦΕΚ 1055 Β)

[15] Υπουργική Απόφαση Δ9Β,Δ/Φ166/οικ13068/ΓΔΦΠ2488 (ΦΕΚ 1249 Β)

[16] Νόμος 3852/2010 (ΦΕΚ 87 Α)

[17] Νόμος 3851/2010 (ΦΕΚ 85 Α)

[18] Προεδρικό Διάταγμα 7/2011 (ΦΕΚ 14 Α)

[19] Οδηγία 2009/125/ΕΚ

[20] Προεδρικό Διάταγμα 32/2010 (ΦΕΚ 70 Α)

[21] Υπουργική Απόφαση 12400/1108 του 2011 (ΦΕΚ 2301 Β)

[22] Οδηγία 2010/30/ΕΕ

[23] Νόμος 4062/2012 (ΦΕΚ 70 Α)

[24] Οδηγία 2009/28/ΕΚ

[25] Νόμος 4122/2013 (ΦΕΚ 42 Α)

[26] Οδηγία 2010/31/ΕΕ

[27] Νόμος 3661/2008 (ΦΕΚ 89 Α)

[28] Οδηγία 2002/91/ΕΚ

[29] Απόφαση 2013/114/ΕΕ

[30] Διορθωτικό στην Απόφαση 2013/114/ΕΕ

[31] Haraldsson, I. G. (2012). “Legal and regulatory framework-barrier or motivation for geothermal development?”. Short Course on Geothermal Development and Geothermal Wells, Santa Tecla, El Salvador, March 11-17 2012.

[32] Dumas, P., & Angelino, L. (2015). “GeoDH: Promote Geothermal District Heating Systems in Europe”. In Proceedings of the World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.

[33] Goodman, R., Pasquali, R., Kepinska, B., Sanner, B., Hámor, T., Reay, D., et al. (2009). “GTR-H: geothermal legislation in Europe”. In International Geothermal Days, Slovakia 2009, Conference and Summer School, Session VII: Geothermal legislation: Organizing good legal and economic support for geothermal energy development in Central European region, 7 p.

[34] Goodman, R., Pasquali, R., Dumas, P., Hámor, T., Jaudin, F., Kepinska, B., Reay, D., Rueter, H., Sanner, B., Van Heekeren, V., Bussmann, W., and Jones, G. (2010). “GTR-H – geothermal legislation in Europe”. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 8 p.

[35] GTR-H project (2009). “Geothermal regulation framework”. Final version November 2009.

[36] European Geothermal Energy Council. Key Issue 3: Regulations for geothermal energy. K4RES-H project.

[37] Dumas, P., Serdjuk, M., Kutschick R., Fraser, S., Reith, S., Koelbel T. (2013). “Report on geothermal regulations”. GEOELEC project. Deliverable 4.1. Sept 2013.

[38] Kępińska, B., Tomaszewska, B., Kasztelewicz, A., & Pająk, L. (2016). “Recommendations for the regulatory framework facilitating the geothermal district heating development in Europe”. Polityka Energetyczna (Energy Policy Journal), 19 (2), 109-118.

[39] Thorsteinsson, H. H., & Tester, J. W. (2010). “Barriers and enablers to geothermal district heating system development in the United States”. Energy Policy, 38(2), 803-813.

[40] Tükenmez, M., & Demireli, E. (2012). “Renewable energy policy in Turkey with the new legal regulations”. Renewable Energy, 39(1), 1-9.

MAESTRALE: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΓΑΛΑΖΙΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΣΤΗ ΜΕΣΟΓΕΙΟ

Τ. Ανδρεάδου[1], Α. Ι. Φωτιάδου[1*], Δ. Κονταξάκης[1], Κ.Β. Ιακώβου[1], Ηλ.Παπαγιαννόπουλος- Μιαούλης[1]

[1*] Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ 541 24 Θεσσαλονίκη, e-mail: angelikifotiadou@arch.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρά το πλήθος των ακαδημαϊκών και τεχνικών μελετών αλλά και εφαρμογών που έχουν υλοποιηθεί τα τελευταία χρόνια σχετικά με τις γαλάζιες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τόσο στις Βόρειες Ευρωπαϊκές Χώρες όσο και παγκοσμίως, στη περιοχή της Μεσογείου παρατηρείται ένα γενικότερο έλλειμμα πρωτοβουλιών και επιχειρησιακών σχεδίων πέρα κάποιων μεμονωμένων προσπαθειών. Οι δυνατότητες της Μεσόγειου και του υγρού στοιχείου/θάλασσας ως προς τις γαλάζιες ανανεώσιμες ενεργειακές λύσεις που μπορεί να προσφέρει, είναι πολλές και αναντίρρητες. Ωστόσο, η έλλειψη ενός ξεκάθαρου για όλες τις χώρες μέλη, ευρωπαϊκού νομικού πλαισίου, ενός συνολικού αναπτυξιακού σχεδιασμού και εκτεταμένων ερευνών σχετικά με την δυνατότητα ή μη της εφαρμογής των ήδη γνωστών τεχνολογιών και εντός Μεσογείου, αποτελούν θέματα τα οποία αποτρέπουν την ανάπτυξη. Σε αυτά τα ερωτήματα καλείται να δώσει απάντηση το πρόγραμμα MAESTRALE, το οποίο χρηματοδοτείται στο πλαίσιο του Άξονα Προτεραιότητας 1 - Καινοτομία του προγράμματος Interreg MED 2014-2020, με οκτώ συμμετέχουσες χώρες και Έλληνα εταίρο το Τμήμα των Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του ΑΠΘ. Κύριος στόχος του προγράμματος είναι να θέσει τα θεμέλια για μια στρατηγική ανάπτυξης της ωκεάνιας ενέργειας στην περιοχή της Μεσογείου. Με αφετηρία την έρευνα και καταγραφή υφιστάμενων και καινοτόμων τεχνολογιών, καθώς και των εμποδίων και των προοπτικών στα συμμετέχοντα κράτη, το MAESTRALE αποσκοπεί στη διεύρυνση της ανταλλαγής γνώσης μεταξύ επιστημόνων, φορέων χάραξης πολιτικής, επιχειρηματιών και πολιτών, καθώς και στην προώθηση δράσεων και επενδύσεων για τη γαλάζια ανάπτυξη. Αναλυτικότερα, οι εταίροι του προγράμματος θα συνεργαστούν για να εντοπίσουν προοπτικές ανάπτυξης της ωκεάνιας ενέργειας με βάση το εκάστοτε φυσικό, νομικό, τεχνολογικό, οικονομικό και κοινωνικό πλαίσιο, εξετάζοντας παράλληλα την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, την τεχνολογική καινοτομία, την αποδοχή από τους πολίτες και τις πιθανές συγκρούσεις με τα θαλάσσια οικοσυστήματα. Μέσα από την δημιουργία ενός δικτύου από Blue Energy Labs (BELs), ένα BEL από κάθε εταίρο-χώρα, με την συμμετοχή τοπικών επιχειρήσεων, δημόσιων αρχών και θεσμών που σχετίζονται με τη γνώση και τους πολίτες, θα τεθούν οι βάσεις για την υποστήριξη μελλοντικών πολιτικών σε σχέση με τη γαλάζια ενέργεια και τον σχεδιασμό συμπαγών στρατηγικών για τη γαλάζια ανάπτυξη. Παράλληλα, μέσω μιας σειράς πιλοτικών εφαρμογών (pilot projects) θα επιδιωχθεί η ευαισθητοποίηση των τοπικών ενδιαφερομένων (local stakeholders), η διευκόλυνση της κοινωνικής αποδοχής, ο περιορισμός της αβεβαιότητας και η ενίσχυση της βιωσιμότητας των παρεμβάσεων. Όλα τα παραπάνω θα θέσουν τις απαραίτητες βάσεις για την δημιουργία των κατάλληλων προϋποθέσεων για την καλύτερη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον, διατηρώντας παράλληλα τις περιβαλλοντικές και πολιτισμικές αξίες της εκάστοτε περιοχής.

Λέξεις Κλειδιά: *Γαλάζια Ενέργεια, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Κυματική Ενέργεια, Περιβαλλοντικός σχεδιασμός, Στρατηγική Ανάπτυξη*

1. ΜΕΣΟΓΕΙΟΣ, ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων τα τελευταία χρόνια και η προβλεπόμενη εξάλειψη των μέχρι σήμερα γνωστών πηγών ενέργειας (κάρβουνου, πετρελαίου κτλ.,), παράλληλα όμως και η ευαισθητοποίηση στα θέματα περιβαλλοντικής ρύπανσης, έχουν θέσει ως προτεραιότητα του σύγχρονου κόσμου, την αναζήτηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας, τις επονομαζόμενες ανανεώσιμες πήγες ενέργειας, οι οποίες από την μια ικανοποιούν τις ενεργειακές ανάγκες, από την άλλη προστατεύουν το περιβάλλον. Οι προσπάθειες αναζήτησης τέτοιων πηγών, επικεντρώθηκαν σε διάφορους τομείς, στην παραγωγή ενέργειας από τον ήλιο, τον αέρα, την δύναμη του νερού κ.α. Ωστόσο τα τελευταία μόλις χρόνια, άρχισε να αναπτύσσεται ένας καινούργιος τομέας, μια καινούργια πηγή ανανεώσιμης ενέργειας, η ενέργεια που προέρχεται από την θάλασσα ή αλλιώς «Γαλάζια» Ενέργεια.

Η ανακοίνωση της Ευρωπαϊκής Κοινότητας τον Ιανουάριο 2014 για τη "γαλάζια ενέργεια" υπογράμμιζε τις δυνατότητες των ευρωπαϊκών θαλασσών και ωκεανών ως πηγών καθαρής ενέργειας. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, η θαλάσσια ανανεώσιμη ενέργεια περιλαμβάνει τόσο την υπεράκτια αιολική ενέργεια όσο και την ενέργεια των ωκεανών και αναγνωρίζεται ως νέα κινητήρια δύναμη της οικονομίας της ΕΕ που δημιουργεί οικονομική ανάπτυξη και θέσεις εργασίας, εξασφαλίζει τον ενεργειακό εφοδιασμό και ενισχύει την ανταγωνιστικότητα μέσω της τεχνολογικής καινοτομίας. Ο τομέας της ενέργειας των ωκεανών επισημάνθηκε επίσης στη στρατηγική της Ευρωπαϊκής Κοινότητας για την γαλάζια ανάπτυξη ως μία από τις πέντε αναπτυσσόμενες περιοχές της «μπλε οικονομίας» που θα μπορούσαν να συμβάλουν στη δημιουργία θέσεων απασχόλησης στις παράκτιες περιοχές.

Μέχρι σήμερα, η χρήση της "γαλάζιας ενέργειας" στη λεκάνη της Μεσογείου βρίσκεται ακόμη σε εμβρυακή φάση σε σύγκριση με την κατάσταση σε άλλες θάλασσες / ωκεανούς και κατευθύνεται από μεμονομένα και πειραματικά έργα, στη δε Ελλαδα ειναι ανυπαρκτη. Η Μεσόγειος Θάλασσα χαρακτηρίζεται από περισσότερο ή λιγότερο κατάλληλες περιοχές για την ανάπτυξη της εκμετάλλευσης της "μπλε ενέργειας", θεωρούμενη σε όλες τις πηγές/μορφές της - κύματα, παλίρροιες, ρεύματα, αλατότητα και αποκλίσεις θερμοκρασίας μαζί με άλλες εναλλακτικές μορφές ενέργειας που σχετίζονται με τη χρήση υπεράκτιων των αιολικών πάρκων και της χρήσης της θαλάσσιας βιομάζας.

Ωστόσο ο χαρακτήρας της Μεσογείου θάλασσας είναι πολύ διαφορετικός από αυτόν των Βόρειων χωρών [1][2][3][4][5][6] Τα ιδιαίτερα γεωμορφολογικά, κλιματικά χαρακτηριστικά όσο και η διαρκής ιστορική παρουσία των παρακείμενων σε αυτή λαών της δίνουν ένα πολύπλευρο, ιδιαίτερο χαρακτήρα. Γεωμορφολογικά διαθέτει μακρά και ακανόνιστη ακτογραμμή και στενή σχετικά υφαλοκρηπίδα ενώ το μέσο βάθος των υδάτων της δεν ξεπερνά τα 1500 m. Η δε ιδιαίτερη γεωγραφική της θέση (κλειστή θάλασσα με δυο μόνο εξόδους υδάτων), της αποδίδει το ήπιο σχετικά κλίμα της. Ένα από τα σημαντικά στοιχεία που αφορούν στην ανάπτυξη και τη βιωσιμότητα της γαλάζιας ενέργειας είναι τα χαρακτηριστικά των ανέμων και των κυμάτων. Στη Μεσόγειο πνέουν έντονοι τοπικοί άνεμοι με υψηλότερη διακύμανση ανέμων στο Ιόνιο και στο κεντρικό Αιγαίο. Τα κύματα στη Μεσόγειο είναι πιο χαμηλά σε ύψος σε σχέση με αυτά του Ατλαντικού Ωκεανού και εξαρτώνται άμεσα στην δύναμη των ανέμων. Διαθέτουν, όμως σημαντικό ύψος συγκρινόμενα με άλλες περιοχές. Στην περιοχή της Μεσογείου παρατηρείται επίσης μεγάλη βιοποικιλότητα, με έναν σημαντικό αριθμό ενδημικών ειδών. Η ανάπτυξη οικονομικών και τουριστικών δραστηριοτήτων επηρεάζεται από τις θαλάσσιες και παράκτιες προστατευμένες ζώνες της, με τις μεγαλύτερες σε έκταση ζώνες να βρίσκονται στις υδάτινες ζώνες μεταξύ Ελλάδας και Τουρκίας. Σε έναν αρκετά μεγάλο βαθμό, οι τοπικές οικονομίες των χωρών της Μεσογείου στηρίζονται σε δραστηριότητες όπως ο τουρισμός, η αλιεία και οι θαλάσσιες μεταφορές. Ο τουρισμός αποτελεί το σημαντικότερο ίσως κομμάτι της οικονομίας της Μεσογείου λόγω των τοπίων και της ιστορικότητας της περιοχής με τη πλειοψηφία των τουριστών που την επισκέπτονται να προτιμούν παράκτιες ζώνες

Στο πλαίσιο του γενικού αυτού πλαισίου, δημιουργήθηκε το πρόγραμμα MAESTRALE του οποίου γενικός στόχος του είναι να θέσει τα θεμέλια για μια στρατηγική ανάπτυξης της ωκεάνιας ενέργειας στη Μεσόγειο. Πιο συγκεκριμένα, αποσκοπεί στη δημιουργία των κατάλληλων προϋποθέσεων για την καλύτερη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον της Μεσογείου, χωρίς να παραβλέπονται οι περιβαλλοντικές και πολιτισμικές αξίες της περιοχής. Στο πρόγραμμα συμμετέχουν φορείς και πανεπιστήμια από οκτώ χώρες (Ελλάδα, Ισπανία, Ιταλία, Κροατία, Κύπρο, Μάλτα, Πορτογαλία και Σλοβενία με Έλληνα εταίρο το τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης) κσι χρηματοδοτείται στο πλαίσιο του «Άξονα

Προτεραιότητας 1» του προγράμματος Interreg MED 2014-2020 και έχει περίοδο υλοποίησης από 1/11/2016 έως 31/10/2019.

Ωστόσο πριν προβούμε στην περαιτέρω ανάλυση του προγράμματος, θα ήταν σωστό να αναφέρουμε σε ποιες κατηγορίες διακρίνεται η Γαλάζια Ενέργεια, και ποιες είναι οι υφιστάμενες τεχνολογίες.

1.1. Υφιστάμενες μορφές Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας από τη θάλασσα και τεχνολογίες

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας από τη θάλασσα (ΘΑΠΕ) μπορούν να διακριθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- **Υπεράκτια αιολική ενέργεια**: Πρόκειται για την πλέον διαδεδομένη μορφή ΑΠΕ. Μια τυπική θαλάσσια ανεμογεννήτρια έχει δυνητική ισχύ 1,5 έως 5 MW [7].Το βάθος στο οποίο μπορούν να τοποθετηθούν εξαρτάται από τον τύπο της θεμελίωσης. Σε αρκετά μεγάλα βάθη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν πλωτές ανεμογεννήτριες ενώ η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μεταδίδεται μέσω υποθαλάσσιων καλωδίων σε σταθμό στη ξηρά.

- **Κυματική ενέργεια:** Τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρισμού με κυματική ενέργεια παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία: μπορούν να τοποθετηθούν κατά μήκος της ακτογραμμής, σε ρηχά ύδατα ή σε ανοιχτή θάλασσα, είναι πλωτά ή σταθερά, τοποθετημένα πάνω στην επιφάνεια της θάλασσας ή υποβρυχίως. Κάθε διαφορετική τεχνολογία χρησιμοποιεί διαφορετικό τρόπο άντλησης κυματικής ενέργειας, για αυτό το λόγο οι διάφοροι μετατροπείς μπορούν να λειτουργήσουν σε διαφορετικά βάθη και τοποθεσίες. Η κυματική ενέργεια χαρακτηρίζεται από τυχαία μεταβλητότητα της παρεχόμενης κινητικής ενέργειας, γι αυτό και δεν υπάρχουν αξιόπιστα μοντέλα πρόβλεψης της κίνησης των κυμάτων [1].

- **Παλιρροϊκή ενέργεια:** Οι δύο κυριότερες τεχνολογίες για την αξιοποίηση της παλιρροϊκής ενέργειας είναι τα παλιρροϊκά φράγματα (tidal barrage) και οι γεννήτριες παλιρροϊκού ρεύματος (tidal stream generator). Οι τελευταίες λειτουργούν με τρόπο παρεμφερή προς τις ανεμογεννήτριες, με τη διαφορά ότι λόγω της σημαντικά υψηλότερης πυκνότητας του νερού, η δυνητική ισχύς τους είναι μεγαλύτερη. Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα αυτής τεχνολογίας είναι ότι υπάρχει πάρα πολύ καλή πρόγνωση των θαλασσών ρευμάτων[1]. Προς το παρόν, όμως, μόνο το ένα τρίτο του παγκόσμιου δυναμικού παλιρροϊκής ενέργειας είναι εκμεταλλεύσιμο τεχνικά.

- **Ωκεάνια θερμική ενέργεια:** Αφορά στην αξιοποίηση της θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα σε επιφανειακά ή ρηχά ύδατα και σε ύδατα που βρίσκονται σε μεγαλύτερα βάθη για την παραγωγή ενέργειας.

- **Οσμωτική ενέργεια:** Αφορά την ανάκτηση ενέργειας από την ανάμειξη γλυκού και θαλασσινού νερού. Δύο είναι οι βασικές τεχνολογίες για την αξιοποίηση της οσμωτικής ενέργειας: Αντίστροφη Ηλεκτροδιάλυση (Reverse Electrodialysis) και Ώσμωση Παρατεταμένης Πίεσης (Pressure Retarded Osmosis). Μία από τις πιο ιδανικές τοποθεσίες για την εγκατάσταση τέτοιων τεχνολογιών αποτελούν τα δέλτα ποταμών. Θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στις πιθανές περιοχές εγκατάστασης καθώς υπάρχουν διάφορα νομικά και περιβαλλοντικά ζητήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη.

- **Θαλάσσια βιοκαύσιμα:** Η χρήση θαλάσσιας βιομάζας για την παραγωγή βιοκαυσίμων είναι μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση. Με την καλλιέργεια κατάλληλου είδος βιομάζας (πχ. άλγη) εκτός από την παραγωγή ενέργειας ταυτόχρονα θα μπορούσε να καταπολεμηθεί ευτροφισμός των υδάτων ή άλλων παρόμοιων φαινομένων του θαλάσσιου οικοσυστήματος. Η ανάπτυξή τους δεν επιβαρύνει τα θαλάσσια οικοσυστήματα. Μειονέκτημα αυτής της μεθόδου αποτελεί το ότι η επεξεργασίας τους προϋποθέτει την μεταφορά τους σε άλλη τοποθεσία μετά την συγκομιδή τους, αυξάνοντας έτσι σε ένα βαθμό το ενεργειακό αποτύπωμα. Πρόκληση θα είναι η μετατροπή της σε βιοκαύσιμο και παραγωγή ενέργειας να γίνεται παρακείμενα στα μέρη όπου συλλέγεται προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το κόστος παραγωγής ενέργειας.

2. ΣΤΟΧΟΙ ΤΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ MAESTRALE

Όπως προαναφέρθηκε, γενικός στόχος του προγράμματος MAESTRALE είναι να προωθήσει την ανάπτυξη της Γαλάζιας Ενέργειας στην περιοχή της Μεσογείου ως βασικό τομέα της βιώσιμης ανάπτυξης, ενισχύοντας τη δημιουργία και τη διακρατική δικτύωση των συμπλεγμάτων καινοτομίας. Μέλημά του είναι να θέσει τα θεμέλια για μια στρατηγική ανάπτυξη της θαλάσσιας ενέργειας στην περιοχή της Μεσογείου ως τομέα νευραλγικής σημασίας για τη βιώσιμη μεγέθυνση μέσω της δημιουργίας διεθνούς δικτύωσης καινοτόμων συνεργατικών σχηματισμών (clusters). Με βάση την έρευνα σχετικά με τις υπάρχουσες και καινοτόμες ΘΑΠΕ τεχνολογίες, τα εμπόδια και τις δυνατότητες εφαρμογής στις συμμετέχουσες χώρες, το MAESTRALE στοχεύει να διευρύνει την ανταλλαγή γνώσεων μεταξύ επιστημόνων, πολιτικών, επιχειρηματιών και πολιτών και να ενθαρρύνει αποτελεσματικά μέτρα και επενδύσεις για την Γαλάζια Ανάπτυξη. Φιλοδοξεί να παρέμβει στους παραπάνω τομείς αλλά και να καλύψει το έλλειμμα πρωτοβουλιών, επιχειρησιακών σχεδίων και λειτουργικών εγκαταστάσεων που παρατηρείται στη Μεσόγειο, παρά το διαρκώς εντεινόμενο ενδιαφέρον και το πλήθος των υφιστάμενων μελετών και εφαρμογών στον τομέα των ΘΑΠΕ τόσο σε ευρωπαϊκό, όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι Εταίροι του Έργου, συνεργάζονται για τον εντοπισμό των δυνατοτήτων εγκαθίδρυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας των θαλασσών στις συμμετέχουσες χώρες, αναλύοντας και διερευνώντας το υφιστάμενο φυσικό, νομικό, τεχνολογικό, οικονομικό και κοινωνικό τους πλαίσιο. Παράλληλα θέτουν ως μείζονα και πρώτιστα θέματα, τα οποία και θα λαμβάνονται υπόψιν καθ' όλη την διάρκεια και σε όλα τα επίπεδα ανάλυσης του προγράμματος για μια σωστή ανάπτυξη, την περιβαλλοντική βιωσιμότητα, την τεχνολογική καινοτομία, την αποδοχή των πολιτών και τις πιθανές συγκρούσεις με τα θαλάσσια οικοσυστήματα.

Οι ειδικοί στόχοι του MAESTRALE, μπορεί να θεωρηθεί ότι χωρίζονται σε τρία ορόσημα:

- **Μετάδοση γνώσης:** Με βάση την ανταλλαγή εμπειριών και γνώσεων μεταξύ των εταίρων και μεταξύ των φορέων της Νότιας και Βόρειας Ευρώπης (επιτόπιες εκδρομές σε επιχειρησιακές μονάδες), ειναι να πραγματοποιηθεί μια ολοκληρωμένη και εμπεριστατωμένη έρευνα σχετικά με τους κανονισμούς, τις υφιστάμενες και καινοτόμες τεχνολογίες, τις βέλτιστες πρακτικές και τα εμπόδια. Αυτά θα αποτελέσουν τις βασικές γνώσεις για την ανάπτυξη της Γαλάζιας Ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις διακρατικές κοινές πτυχές όσο και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των περιφερειακών περιοχών.
- **Blue Energy Labs (BEL)**: Δημιουργία ενός Διακρατικού δικτύου μεταξύ των βασικών παραγόντων/φορέων της Γαλάζιας Ενέργειας σε επίπεδο Μεσογείου / ΕΕ, συμπεριλαμβανομένων των δημόσιων αρχών, των ερευνητικών κέντρων, των ενεργειακών οργανισμών, των επιχειρήσεων και των ομάδων πολιτών. Τα BEL θα πραγματοποιηθούν σε κάθε συμμετέχουσα περιφέρεια για τη στήριξη της δημιουργίας εταιρικών σχέσεων δημόσιου και ιδιωτικού τομέα, τη διασφάλιση της ανταλλαγής γνώσεων και καινοτομίας μεταξύ των φορέων και θα αποτελέσουν τη βάση για συγκεκριμένες πρωτοβουλίες για μπλε ανάπτυξη.
- **Πιλοτικά έργα Γαλάζιας Ενέργειας στις περιφέρειες Μεσογείου**: Οι περιφερειακές BEL θα εκπονήσουν 2 ή περισσότερα πιλοτικά έργα γαλάζιων ενεργειακών μονάδων σε κάθε περιφερειακή περιοχή, παρέχοντας τις καλύτερες συνθήκες για τη διασφάλιση της σκοπιμότητας, της οικονομικής υποστήριξης, των τεχνολογικών μέσων, της κοινωνικής αποδοχής και της συμμετοχής διοικητικών στελεχών, επιχειρήσεων και ομάδων πολιτών. Τα έργα αυτά θα χρησιμεύσουν ως πρωτότυπα για καινοτόμες επιχειρήσεις και για περαιτέρω εξελίξεις στην ΕΕ.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Όλοι οι παραπάνω στόχοι θα μπορέσουν να πραγματοποιηθούν μέσα από την αλυσιδωτή εκπόνηση του πλάνου δράσης του προγράμματος MAESTRALE, το οποιο συνίσταται σε τρία διακριτά επίπεδα. Κάθε ένα από τα επίπεδα αυτά περιλαμβάνει σειρά ενεργειών και δράσεων τα οποία και θα εκτελούνται ιεραρχικά, δεδομένου ότι το αποτέλεσμα κάθε σταδίου αποτελεί την πηγή πληροφοριών και κατεύθυνσης του επόμενου. Η όλη μεθοδολογία μπορεί να διακριθεί στα ακόλουθα 3 κύρια στάδια και υπο- στάδια:

- **Μελέτη**
- **Δοκιμή**
- **Μεταφορά**

ΜΕΛΕΤΗ: Το πρώτο αυτό στάδιο αφορά τη βελτίωση της γνώσης σχετικά με τις προοπτικές της γαλάζιας ενέργειας και τις διαθέσιμες τεχνολογίες, προκειμένου να αναπτυχθεί μια κοινή στρατηγική για την ανάπτυξη των ΘΑΠΕ. Έχοντας ως βάση τα αποτελέσματα προηγούμενων μελετών (π.χ. τα προγράμματα EU-funded E-Wave, ENERCOAST, BLUENE, KIMERAA, IEE SI OCEAN, το 7ο ΠΠ CoCoNet και MARINET) και με βάση τις υφιστάμενες πλατφόρμες και τις συλλογές δεδομένων (π.χ. ευρωπαϊκή πλατφόρμα τεχνολογιών για τα βιοκαύσιμα, ευρωπαϊκή ένωση βιομάζας για τα φύκια, Ευρωπαϊκό φόρουμ βιώσιμων βιοκαυσίμων και σύμπλεγμα MED FaceCoast), το στάδιο αυτό αποσκοπεί στην επικαιροποίηση και διεύρυνση του γεωγραφικού ορίου των υφιστάμενων γνώσεων σχετικά με την τέχνη της ανάπτυξης της γαλάζιας ενέργειας στην περιοχή της Μεσογείου και στην Ευρώπη γενικά, τους ισχύοντες κανονισμούς (σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης και σε εθνικό επίπεδο) που διέπουν τον τομέα, συμπεριλαμβανομένων των διαθέσιμων ευκαιριών χρηματοδότησης, τους κύριους φορείς που εμπλέκονται (ή μπορούν να συμμετέχουν) στα σχέδια της Γαλάζιας Ενέργειας, την δυνατότητα ανάπτυξης της ενέργειας στις εμπλεκόμενες περιφέρειες και τα εμπόδια που ενδέχεται να εμφανιστούν, ώστε να παρασχεθεί μια αξιόπιστη ενημερωτική υποστήριξη στους πιθανούς επενδυτές και να τεθεί η βάση για τον ορισμό καινοτόμων συμπλεγμάτων σύμφωνα με τις τρέχουσες απαιτήσεις και ανάγκες της αγοράς

Αναλυτικότερα, στο στάδιο αυτό προβλέπονται τα παρακάτω:

- Περιεκτική, εκτενή έρευνα και καταγραφή της νομοθεσίας και των ευκαιριών χρηματοδότησης σε εθνικό επίπεδο για την υλοποίηση εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας από ΘΑΠΕ, συγκριτική ανάλυση των δεδομένων για την ανάδειξη των κοινών ζητημάτων/εμποδίων και οφελών και καταγραφή των ευκαιριών χρηματοδότησης σε ευρωπαϊκό επίπεδο.
- Σύνταξη καταλόγου των υφιστάμενων και καινοτόμων τεχνολογιών, των βέλτιστων πρακτικών εφαρμογής εγκαταστάσεων στον τομέα της γαλάζιας ενέργειας, με παραδείγματα επιτυχημένων πρωτοβουλιών στην Ευρώπη και έμφαση στην προοπτική μεταφοράς τους στη Μεσόγειο.
- Πραγματοποίηση επιτόπιων επισκέψεων σε υπάρχουσες «γαλάζιες εγκαταστάσεις» και ανάλυση των κύριων αποτελεσμάτων των επισκέψεων αυτών με έμφαση στη γνώση που αποκτήθηκε για την παραγωγή ενέργειας από άλγη, υπεράκτια αιολικά, κίνηση των κυμάτων και μετατροπή ωκεάνιας θερμικής ενέργειας.
- Δημιουργία μιας βάσης δεδομένων που θα συγκεντρώνει όλες τις πληροφορίες που είναι δυνητικά χρήσιμες για την εκτίμηση των προοπτικών ανάπτυξης της γαλάζιας ενέργειας, όπως χάρτες αιολικού δυναμικού και χάρτες θαλάσσιων ρευμάτων, αλλά και τη χωρική διάταξη των κύριων δρώντων και των λειτουργικών μονάδων παραγωγής ΘΑΠΕ στη μεσόγειο.
- Ανάλυση των προοπτικών της γαλάζιας ενέργειας στη Μεσόγειο σε συνεργασία με όλους τους εταίρους
- Ανάλυση ενεργειακού δυναμικού, συμπεριλαμβανομένου ενός καταλόγου / οδικού χάρτη πιθανών λύσεων.
- Κατάρτιση ενός χάρτη ενδιαφερομένων, που θα καταγράφει και θα αναλύει όλους τους εμπλεκόμενους στην ανάπτυξη της γαλάζιας ενέργειας στις συμμετέχουσες περιοχές.
- Επικοινωνία / διάδοση αποτελεσμάτων.

ΔΟΚΙΜΗ: Τα εργαλεία και οι μεθοδολογίες που δημιουργήθηκαν για την ανάλυση της προοπτικής ανάπτυξης της γαλάζιας ενέργειας στη Μεσόγειο, θα χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία μόνιμων δικτύων συντονισμού, των Blue Energy Labs (BELs), δηλαδή Εργαστηρίων Γαλάζιας Ενέργειας, σε κάθε μια από τις περιοχές που συμμετέχουν στο πρόγραμμα, τόσο σε διακρατικό όσο και σε περιφερειακό επίπεδο. Τα labs θα αποτελούν πλατφόρμα συνεργασίας και συνάντησης για τους κύριους δρώντες στον τομέα της γαλάζιας ενέργειας στη Μεσόγειο, δηλαδή επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται σε τοπικό η εθνικό επίπεδο, δημόσιες αρχές, εκπαιδευτικά ιδρύματα και, φυσικά, οι τοπικές κοινωνίες. Οι δραστηριότητές τους θα στοχεύουν στην υποστήριξη μελλοντικών πολιτικών σε σχέση με τη γαλάζια ενέργεια, το σχεδιασμό συμπαγών στρατηγικών για τη γαλάζια ανάπτυξη και την ανταλλαγή γνώσης και καινοτομίας. Μέσω συμπράξεων δημόσιου και ιδιωτικού τομέα, θα τεθούν τα θεμέλια για πρωτοβουλίες στον τομέα της γαλάζιας ανάπτυξης, ενώ η τακτική που θα ακολουθηθεί θα είναι η ανάπτυξη μιας ταυτότητας, με την από κοινού συνεργασία των φορέων σε pilot project, ώστε να ενδυναμωθεί η διάδοση και επικοινωνία του προγράμματος και των αποτελεσμάτων του. Για αυτό το λόγο θεωρείται απαραίτητη η προώθηση περιεχομένου πληροφόρησης σε τοπικό και διεθνές επίπεδο, σε μέσα κοινωνική δικτύωσης καθώς και σε άλλα ηλεκτρονικά μέσα (πχ ιστοσελίδα

Maestrale), ώστε να υπάρχει μια πιο σαφής και κατανοητή εικόνα σε όλους τους πρωταγωνιστές των BEL. Οι συνεργασίες για την ίδρυση, επιτήρηση και αξιολόγηση των τοπικών Blue Energy Labs θα καθορίζονται μέσα από ένα εγχειρίδιο το οποίο θα περιλαμβάνει το νομοθετικό πλαίσιο λειτουργίας τους.

Αυτοί οι οργανισμοί (1 διακρατικό και 10 τοπικοί BEL) θα εκτελούν δραστηριότητες με στόχο:

- δημιουργία / ανάπτυξη / ενίσχυση δικτύων συνεργασίας σε περιφερειακό, εθνικό και διακρατικό επίπεδο, με στόχο την προώθηση της ανάπτυξης του τομέα της γαλάζιας ενέργειας στην περιοχή της Μεσογείου
- να παράσχουν τη δημιουργία δυνατοτήτων και την κατάρτιση επί του θέματος της γαλάζιας ενέργειας
- καθορισμός προσαρμοσμένων υπηρεσιών για πιθανούς επενδυτές,
- Ανάπτυξη εφικτών pilot project γαλάζιας ενέργειας που θα υλοποιηθούν με βάση τα διαρθρωτικά ταμεία της ΕΕ ή / και τα εθνικά ταμεία. Οι δραστηριότητες αυτών των φορέων θα παρακολουθούνται για να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητά τους και οι διαδικασίες για τη λειτουργία τους θα συστηματοποιηθούν για τη μεταφορά και την κεφαλαιοποίηση. Όλοι οι εταίροι θα συμμετάσχουν στο διακρατικό BEL σύμφωνα με το ειδικό πεδίο δράσης τους (έρευνα & καινοτομία ή υποστήριξη των επιχειρήσεων).

Τα pilot projects που θα αναπτυχθούν, θα δράσουν ως πεδία δοκιμών και δραστηριότητες που θα υποστηρίζουν την εφαρμογή των καινοτόμων και επικερδών ΘΑΠΕ τεχνολογιών στην περιοχή της Μεσογείου. Σε κάθε συνεργαζόμενη περιοχή, μέσω των BEL, φορείς στρατηγικής σημασίας θα συνεργασθούν επί των pilot projects, ώστε να επιλεχθούν τα κατάλληλα τεχνολογικά μοντέλα για να ξεπεραστούν τυχόν υφιστάμενα εμπόδια κατά την πραγματοποίησή τους. Κάθε BEL θα εκπονήσει δύο ή περισσότερα πιλοτικά πρότζεκτ για μονάδες παραγωγής γαλάζιας ενέργειας, όπου μέρος του project θα είναι η εκπόνηση μελέτης βιωσιμότητας και business plan ώστε να μπορεί να εξασφαλιστεί η μελλοντική κατασκευή και εφαρμογή των μονάδων παραγωγής γαλάζιας ενέργειας. Αυτές θα χρηματοδοτηθούν από το Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης (ΕΤΠΑ). Τα πιλοτικά πρότζεκτ θα λειτουργήσουν ως **πρωτότυπα**/**παραδείγματα** για καινοτόμες start-up επιχειρήσεις.

Ως προς τους επικοινωνιακούς στόχους που έχουν τεθεί είναι να συμφωνήσουν οι πολίτες των τοπικών κοινωνιών για τα οφέλη των ΘΑΠΕ για λόγους περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, κλιματική αλλαγή αλλά και ενεργειακή αυτονομία. Φυσικά, θα πρέπει να ενεργοποιηθούν και οι τοπικές δημόσιες αρχές να συμβάλουν στην πραγματοποίηση των pilot project μετά το πέρας του προγράμματος ώστε να εκταμιευτούν πόροι από το ΕΤΠΑ.

- Ανάπτυξη ικανοτήτων (ευαισθητοποίηση, κλιματική αλλαγή, ενεργειακή αυτονομία)
- Μελέτες σκοπιμότητας και επιχειρηματικό σχέδιο 20 πιλοτικών έργων
- Επικοινωνία / διάδοση 10 γεγονότα ανοιχτής ημέρας)

ΜΕΤΑΦΟΡΑ: Αυτή η δραστηριότητα στοχεύει στη διάθεση ιδεών, μεθόδων και εργαλείων που αναπτύσσονται από το MAESTRALE για άλλους οργανισμούς MED και ΕΕ, πρόθυμοι να μεταφέρουν τα αποτελέσματα των έργων και τις επιτυχημένες εμπειρίες τους. Αυτός ο στόχος θα επιδιωχθεί μέσω 2 ειδών δραστηριοτήτων:

- μια κοινή ανάλυση, σύγκριση και αξιολόγηση των εμπειριών που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο των Περιφερειακών BEL, οι οποίες θα οδηγήσουν στην παραγωγή ενός άκρως επιχειρησιακού εργαλείου για την ανάπτυξη cluster γαλάζιας ενέργειας και επιχειρηματικών σχεδίων με υψηλό δυναμικό αγοράς, συμπεριλαμβανομένων διαδικασιών για τη δημιουργία και την εφαρμογή Περιφερειακών εργαστήριων και την ανάπτυξη εταιρικών σχέσεων μεταξύ επιχειρήσεων, φορέων R&I και φορέων δημόσιας διοίκησης
- διαδικασίες / εργαλεία για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση της ιδέας του έργου, τον προσδιορισμό των επιχειρηματικών υπηρεσιών που απαιτούνται για την ανάπτυξη του έργου και την επιτυχή εφαρμογή του , δραστηριότητες δικτύωσης με άλλα προγράμματα της ΕΕ που αποσκοπούν στην προώθηση της μεταφοράς της «εργαλείων» που δημιουργήθηκαν στο πρόγραμμα και στη δημιουργία συνεργειών με παρόμοιες εμπειρίες σε όλη την Ευρώπη, προκειμένου να διευρυνθεί η διεθνής κοινότητα των ενδιαφερομένων.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το πρόγραμμα βρίσκεται επί του παρόντος στον πρώτο χρόνο εργασιών του, κατά συνέπεια τα μέχρι τώρα αποτελέσματα περιορίζονται στο πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας του. Ήδη, από την ανάλυση και την καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης, προκύπτουν ορισμένοι προβληματισμοί, των οποίων η αντιμετώπιση θα θέσει τις βάσεις για την σωστή και ισόρροπη ανάπτυξη του έργου στο σύνολο. Ειδικότερα, τόσο από τις επιτόπιες επισκέψεις όσο και από την ανάλυση των υπαρχουσών τεχνολογιών στον τομέα, διαπιστώθηκε πως υπάρχουν πλήθος δοκιμασμένων και καινοτόμων γαλάζιων τεχνολογιών που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στη Μεσόγειο. Η γεωμορφολογία της εκάστοτε περιοχής της Μεσογείου, ωστόσο, δημιουργεί συγκεκριμένες δυνατότητες και περιορισμούς ως προς τις εγκαταστάσεις και τις τεχνολογίες που μπορούν να εφαρμοσθούν. Συνεπώς, χρειάζεται μια ενδελεχής καταγραφή των τοπικών χαρακτηριστικών των περιοχών όπου πρόκειται να προταθεί η οποιαδήποτε εγκατάσταση, όπως η ισχύς των ανέμων, το μέγεθος των κυμάτων, τα θαλάσσια ρεύματα κ.ο.κ., ώστε να προσδιοριστούν εν συνεχεία οι τεχνολογίες εκείνες που μπορούν να εισαχθούν με επιτυχία σε κάθε περιοχή-χώρα. Δεύτερον, δεν υπάρχει προς το παρόν σαφές ρυθμιστικό πλαίσιο σε εθνικό επίπεδο για τις ΘΑΠΕ, ενώ οι όποιες αναφορές στην υφιστάμενη νομοθεσία είναι αποσπασματικές και περιορισμένες. Αυτό με τη σειρά του δημιουργεί αρνητικό επενδυτικό κλίμα και αποτελεί τροχοπέδη για την ανάπτυξη της γαλάζιας ενέργειας στη χώρα. Ως εκ τούτου, η νομοθεσία πρέπει να προσαρμοστεί κατάλληλα, ώστε να διευκολυνθεί η εισαγωγή των νέων τεχνολογιών, αλλά και να εξασφαλιστεί η προστασία του περιβάλλοντος και των υφιστάμενων χρήσεων. Τέλος, λόγω της σημασίας του τουρισμού και της αλιείας για τις παράκτιες κοινότητες της Ελλάδας και της Μεσογείου, η κοινωνική αποδοχή του όποιου σχετικού εγχειρήματος δε μπορεί να θεωρείται εξασφαλισμένη. Επομένως, πρόκειται για μια κρίσιμη παράμετρο, που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στο πλαίσιο οποιουδήποτε σχεδιασμού για την εισαγωγή της γαλάζιας ενέργειας στην περιοχή. Στις ακόλουθες παραγράφους γίνεται αναλυτική παρουσίαση του υπάρχοντος εθνικού νομοθετικού και κοινωνικού πλαισίου και των καινοτόμων «γαλάζιων» τεχνολογιών που θα μπορούσαν να εγκατασταθούν στην Μεσόγειο. Θα πρέπει να τονισθεί ότι τα παραδείγματα αυτά είναι ενδεικτικά για το σύνολο της Μεσογείου και όχι δεσμευτικά για τον ελληνικό θαλάσσιο χώρο, αλλά ούτε και τα μόνα· υπάρχουν ποικίλες άλλες τεχνολογίες που είναι επίσης εφαρμόσιμες. Άλλωστε, όπως προαναφέρθηκε, πριν από οποιαδήποτε επιλογή εγκατάστασης απαιτείται η ανάλυση των τοπικών γεωμορφολογικών, κλιματικών και θαλάσσιων χαρακτηριστικών.

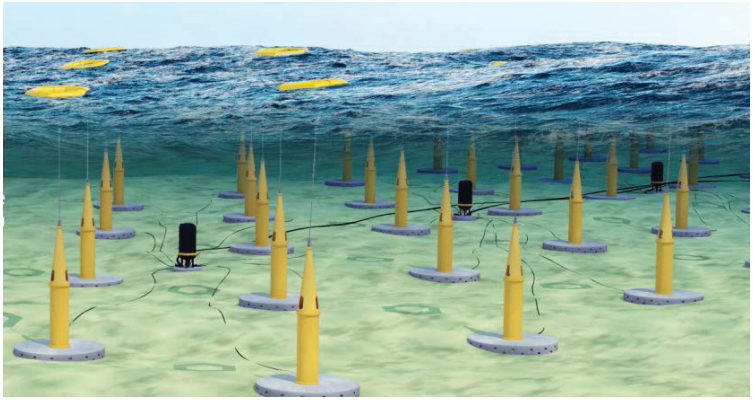
4.1. Παραδείγματα τεχνολογιών

Η πλωτή γεννήτρια SeaTwirl [8] μοιάζει με μια ελπιδοφόρα εγκατάσταση παραγωγής μπλε ενέργειας. Το σχετικά χαμηλό της ύψος, 30 μέτρων, η μικρή απόσταση της από την ακτή (3 μέτρα) απαιτεί μόνο τρεις στερεώσεις στο θαλάσσιο βυθό της δίνουν ένα συντριπτικό πλεονέκτημα σε σχέση με άλλες εγκαταστάσεις.



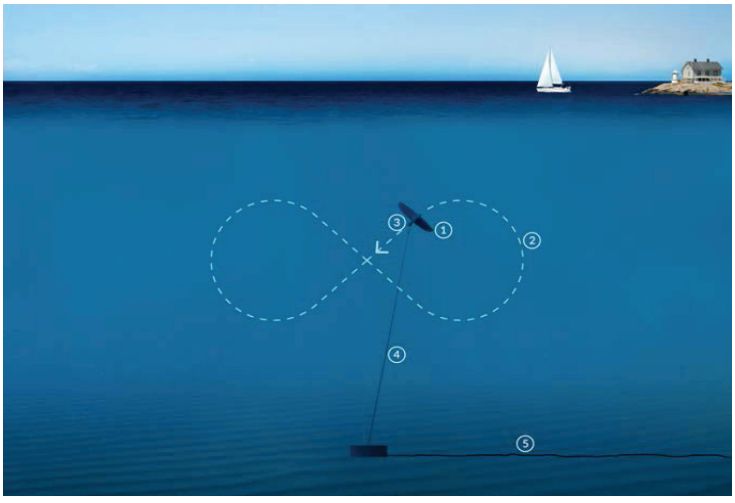
Εικόνα 1: Εγκατάσταση πλωτής ενέργειας Seatwirl

Ο σημαντήρας της εταιρείας Waves4Power [9], αποτελεί στην ουσία μια τεράστια αντλία νερού. Τον σημαντήρα διαπερνά κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, ένας επιμήκης σωλήνας (σωλήνας επιτάχυνσης). Η εισχώρηση του νερού μετακινεί ένα έμβολο που βρίσκεται στο εσωτερικό του σωλήνα και συνδέεται με έναν μετατροπέα ενέργειας. Ο σημαντήρας "αγκυρώνεται" στον πυθμένα με ένα σύστημα που επιτρέπει τις κατακόρυφες κινήσεις. Η μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στη στεριά γίνεται μέσω ενός κεντρικού σημείου συλλογής και μετά διανέμεται προς την ξηρά. Πλεονέκτημα αυτού του τύπου γεννήτριας είναι το σημαντικά χαμηλότερο βάρος της συγκρινόμενο με παραπλήσιες τεχνολογίες ενώ η όλη κατασκευή έχει χαμηλό κόστος συντήρησης.



Εικόνα 2: Διάταξη πάρκου σημαντήρων τύπου Seabased

Ο σημαντήρας Seabased [10] χρησιμοποιεί επίσης την κυματική κίνηση για να παράγει ενέργεια. Ο σημαντήρας συνδέεται σημειακά με μια γραμμική γεννήτρια η οποία είναι στερεωμένη στο βυθό της θάλασσας. Η κίνηση των σημαντήρων μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια στις γεννήτριες. Η παραγόμενη ενέργεια μεταφέρεται σε έναν υποβρύχιο μετασχηματιστή και στη συνέχεια, το παραγόμενο ρεύμα μεταφέρεται στη στεριά. Ανάλογα με το μέγεθος του "πάρκου" παραγωγής, εγκαθίσταται και ο κατάλληλος μετασχηματιστής. Οι κατασκευές μπορούν να τοποθετηθούν σε βάθος έως και 30 μέτρων, και με τη μεταξύ τους απόσταση έως και 25 μέτρων. Καθώς ο βυθός της Μεσογείου είναι αρκετά ανομοιογενής τίθενται περιορισμοί όσον αφορά τις περιοχές τοποθέτησης τους.



Εικόνα 3: Κίνηση και διάταξη παλιρροϊκού αετού Minesto

Η Minesto "Deep Green" [11] αφορά σε γεννήτρια παλιρροϊκής ενέργειας (παλιρροϊκός αετός), η οποία τοποθετείται υποβρυχίως ή σε πλωτές πλατφόρμες με περιθώριο ασφάλειας από την επιφάνεια της θάλασσας ώστε να μη παρεμποδίζονται οι θαλάσσιες κυκλοφορίες. Με σχήμα χαρταετού, "πετούν" ακολουθώντας τη ροή των θαλάσσιων ρευμάτων, με συνεχόμενη κίνηση, η οποία καθορίζεται μέσω λογισμικού. Η τεχνολογία Deep Green θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε περισσότερες τοποθεσίες από ότι άλλου τύπου γεννητριών, καθώς μπορεί να εκμεταλλευτεί βραδύτερα παλιρροϊκά ρεύματα (ταχύτητα μεγαλύτερη από 1m/s). Μπορεί να είναι μια πολύ επιθυμητή εγκατάσταση κοντά σε τουριστικές περιοχές, όπως στην πραγματικότητα δεν μπορεί να γίνει ορατή από την ξηρά ή από το επίπεδο της στάθμης της θάλασσας.

4.2. Νομοθετικό πλαίσιο

Ένα από τα μεγαλύτερα εμπόδια για την ανάπτυξη της γαλάζιας ενέργειας στην Ελλάδα και τη Μεσόγειο γενικότερα είναι η έλλειψη ενός σαφούς νομοθετικού πλαισίου. Καθώς πρόκειται για έναν αναδυόμενο τομέα έρευνας και επιχειρηματικής δράσης, απαιτείται ρυθμιστικό πλαίσιο που θα δημιουργεί θετικό επενδυτικό κλίμα, αλλά ταυτόχρονα θα περιορίζει τις συγκρούσεις με τις υφιστάμενες χρήσεις του θαλάσσιου χώρου. Παράλληλα θα διασφαλίζει την προστασία του περιβάλλοντος και του τοπίου, ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα υποβάθμισης ούτως ώστε ο κλάδος να αναπτυχθεί εξ αρχής ως ένας κλάδος φιλικός προς το περιβάλλον. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει επισημάνει τον κομβικό ρόλο της γαλάζιας ενέργειας για τη μελλοντική ενεργειακή ασφάλεια της Ένωσης, τις δυνατότητες συμβολής στην επίτευξη των στόχων όσον αφορά τη συμμετοχή των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα και τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αλλά και τις προοπτικές τόνωσης της οικονομίας μέσω της δημιουργίας χιλιάδων θέσεων εργασίας για εξειδικευμένο επιστημονικό προσωπικό. Μολονότι δεν έχει ακόμα προχωρήσει στη θέσπιση κανόνων, έχει ήδη εκπονήσει ένα σχέδιο δράσης για τη γαλάζια ενέργεια με στόχο τη διευκόλυνση της ανάπτυξης του τομέα στην Ευρώπη και με ορίζοντα το 2020.

Η ανάπτυξη της γαλάζιας ενέργειας στην Ελλάδα, από την άλλη μεριά, επηρεάζεται και ενημερώνεται κυρίως από τη νομοθεσία που ρυθμίζει την παραγωγή και τη διάθεση ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά, τις κατευθύνσεις χωροταξικού σχεδιασμού εθνικού και περιφερειακού επιπέδου και τη νομοθεσία για τον αιγιαλό.

Το θεσμικό πλαίσιο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην Ελλάδα καθορίζεται από το Ν.2244/94, ο οποίος προσφέρει ισχυρά οικονομικά κίνητρα για την ανάπτυξη των ΑΠΕ στην Ελλάδα μέσω της προσέλκυσης ιδιωτικών κεφαλαίων και καθιστά δυνατή την παραγωγή και διανομή ηλεκτρικού ρεύματος από ανεξάρτητους παραγωγούς, εφόσον αυτό προέρχεται από ΑΠΕ. Με τον Ν.2773/99 απελευθερώνεται και ρυθμίζεται η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ ταυτόχρονα διαμορφώνεται ευνοϊκό καθεστώς για τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ, καθώς δίνεται προτεραιότητα στην απορρόφηση της παραγόμενης από ΑΠΕ ενέργειας σε σύγκριση με τις συμβατικές εγκαταστάσεις (άρθρα 35-37). Ο Ν.3468/2006 εναρμονίζει την ελληνική νομοθεσία με την Οδηγία 2001/77/ΕΚ, εισάγει σοβαρά κίνητρα για την εκμετάλλευση των ΑΠΕ και ορίζει τις άδειες (παραγωγής, εγκατάστασης, λειτουργίας, κατασκευής) και εγκρίσεις (περιβαλλοντικοί όροι, έργα μικρής κλίμακας από το αρμόδιο τμήμα πολεοδομικού σχεδιασμού) που απαιτούνται (ή δεν απαιτούνται) για κάθε εγκατάσταση, ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ της μονάδας. Αξίζει να σημειωθεί ότι ανεξάρτητα από την κατηγορία του έργου, απαιτείται η έγκριση περιβαλλοντικών όρων εάν βρίσκεται εντός περιοχής Ramsar ή Natura 2000, σε εθνικό πάρκο ή σε αισθητικό δάσος. Τέλος, με τον Ν.3851/2010, καταβάλλεται προσπάθεια περαιτέρω απλούστευσης και συντόμευσης της διαδικασίας χορήγησης αδειών για νέα έργα ΑΠΕ, μεταξύ άλλων με την άμεση χορήγηση αδειών από τη ΡΑΕ, τη θέσπιση δεσμευτικών και συντομότερων προθεσμιών για τη δημόσια διοίκηση και τη μείωση των γραφειοκρατικών διαδικασιών.

Ο χωροταξικός σχεδιασμός διακρίνεται σε εθνικού και περιφερειακού επιπέδου. Ο πρώτος συνίσταται στο Γενικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης (ΓΠΧΣΑΑ) και στα Ειδικά Πλαίσια Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης (ΕΠΧΣΑΑ). Κύριος σκοπός του ΓΠΧΣΑΑ είναι ο προσδιορισμός στρατηγικών κατευθύνσεων για την ολοκληρωμένη χωρική ανάπτυξη και την αειφόρο οργάνωση του εθνικού χώρου για μια περίοδο 15 ετών (άρθρο 1). Ένας από τους βασικούς στόχους που τίθενται στο πλαίσιο της αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής είναι η προώθηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας, ιδίως δε ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (άρθρο 2). Οι γενικές κατευθύνσεις, που δίνονται από το ΓΠΧΣΑΑ, εξειδικεύονται από τα ΕΠΧΣΑΑ για τις Υδατοκαλλιέργειες, τον Τουρισμό και τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Ασφαλώς, ο μεγαλύτερος όγκος των κατευθύνσεων για την ανάπτυξη εγκαταστάσεων ΑΠΕ εντοπίζεται στο τελευταίο. Σε ότι αφορά την ανάπτυξη της γαλάζιας ενέργειας, το άρθρο 10 του ΕΠΧΣΑΑ για τις ΑΠΕ ορίζει ειδικά

κριτήρια για την τοποθέτηση αιολικών πάρκων στις θαλάσσιες περιοχές και στις ακατοίκητες νησίδες. Προβλέπεται ότι η τοποθέτηση αιολικών πάρκων επιτρέπεται σε θαλάσσιες περιοχές όπου μπορεί να εξαχθεί αιολική ενέργεια και δεν υπόκεινται σε κανένα ιδιαίτερο θεσμικό καθεστώς που να απαγορεύει την εγκατάσταση ανεμογεννητριών ή να μην είναι ζώνη χωρίς εμπόδια, όπως θαλάσσια πάρκα ή ναυτιλιακές γραμμές. Ελάχιστες αποστάσεις από σημεία ενδιαφέροντος προβλέπονται προκειμένου να διασφαλιστεί η λειτουργικότητα και η αποτελεσματικότητα των εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας. Το άρθρο 20 σχετικά με την τοποθέτηση εγκαταστάσεων για νέες μορφές προβλέπει ότι για τον ορισμό των κριτηρίων χωροθέτησης για τις νέες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που βρίσκονται ακόμη σε πειραματικό στάδιο, όπως η ενέργεια από τη θάλασσα θα πραγματοποιηθούν σχετικές μελέτες στο πλαίσιο του σχεδίου δράσης που συνοδεύει το ειδικό πλαίσιο. Οι κατευθύνσεις του χωροταξικού σχεδιασμού εθνικού επιπέδου συμπληρώνονται και εξειδικεύονται σε περιφερειακό επίπεδο με τα Περιφερειακά Πλαίσια Χωροταξικού Σχεδιασμού και Βιώσιμης Ανάπτυξης (ΠΠΧΣΑΑ).

Τέλος, σημειώνεται ότι ο Ν2971/01, που αφορά τη χρήση και παραχώρηση του αιγιαλού και της παραλίας και των παρακείμενων θαλάσσιων χώρων με τον αντίστοιχο βυθό και τον πυθμένα, καλύπτει την πλειονότητα των δράσεων που απαιτούνται για την εφαρμογή και ανάπτυξη της γαλάζιας ενέργειας. Παράλληλα, με τον Ν1278/ΦΕΚ Α 157/04.08.2014 όλα τα έργα, που εκτελούνται ολικώς η μερικώς στον αιγιαλό, στην όχθη, στην παραλία, την παρόχθια ζώνη, μέσα στη θάλασσα, στον πυθμένα της θάλασσας, στο υπέδαφος του βυθού καθώς και εκείνα που επιφέρουν διαμόρφωση ή αλλοίωση των χώρων αυτών, χαρακτηρίζονται λιμενικά έργα.

4.3. Κοινωνική αποδοχή

Η εμπειρία τόσο στην Ελλάδα, όσο και στο εξωτερικό, έχει αποδείξει ότι η κοινωνική αποδοχή αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την εξέλιξη οποιασδήποτε επένδυσης σε ΑΠΕ. Η γαλάζια ενέργεια κερδίζει έδαφος τα τελευταία χρόνια, επειδή, μεταξύ άλλων, η ανάπτυξη εγκαταστάσεων ΑΠΕ στον θαλάσσιο χώρο συναντά σημαντικά μικρότερες αντιδράσεις σε σχέση με τον χερσαίο. Αυτό, ωστόσο, δε σημαίνει ότι η κοινωνική αποδοχή είναι εξασφαλισμένη, ιδιαίτερα όταν υπάρχει ο φόβος ότι η εγκατάσταση ΑΠΕ ενδέχεται να πλήξει τις οικονομικές δραστηριότητες των παράκτιων κοινοτήτων. Ειδικότερα, οι κυριότερες αντιδράσεις σε ό,τι αφορά τη γαλάζια ενέργεια σχετίζονται με την οπτική όχληση και με συγκρούσεις που προκύπτουν μεταξύ των ΑΠΕ και υφιστάμενων χρήσεων του θαλάσσιου χώρου [1]. Καθώς πολλές από τις μορφές γαλάζιας ενέργειας βρίσκονται είτε σε πειραματικό, είτε σε πιλοτικό στάδιο και η μετάβασή τους στην εμπορική κλίμακα δεν έχει ακόμα ολοκληρωθεί, τα δεδομένα που μπορούμε να αντλήσουμε σε σχέση με την κοινωνική αποδοχή τους, προέρχονται κυρίως από την εμπειρία των υπεράκτιων αιολικών πάρκων.

Η ενδεχόμενη οπτική όχληση από μια εγκατάσταση ΑΠΕ προκαλεί πρωτίστως ανησυχία και αντιδράσεις στον τουριστικό κλάδο, αφού επηρεάζει άμεσα το τοπίο και κατά συνέπεια το τουριστικό προϊόν. Μελέτες σε Ευρώπη και Ηνωμένες Πολιτείες επισημαίνουν την ύπαρξη μιας αρνητικής σχέσης ανάμεσα στο ποσοστό των επισκεπτών που θα επέλεγε έναν διαφορετικό προορισμό και την απόσταση εγκατάστασης ανεμογεννητριών από την ακτή. Ταυτόχρονα, ωστόσο, αναδεικνύουν και τις ευκαιρίες ανάπτυξης ενός «πράσινου» τουρισμού, ο οποίος θα ενσωματώνει τις εγκαταστάσεις στο τουριστικό προϊόν [12][13][14]. Τα συμπεράσματα αυτά δεν ισχύουν αυταπόδεικτα για το ελληνικό θαλάσσιο χώρο και το σύνολο της Μεσογείου, κυρίως επειδή η φύση του τουριστικού προϊόντος και οι προσδοκίες των επισκεπτών διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή. Αυτό που συχνά αναζητούν οι επισκέπτες στην Ελλάδα είναι το παρθένο τοπίο και η επαφή με τη φύση. Επομένως, η οπτική όχληση από τις ανεμογεννήτριες είναι πιθανό να γίνεται αντιληπτή με διαφορετικό τρόπο απ' ό,τι στη Σκωτία ή τις ακτές του Ατλαντικού. Επιπλέον, οι περισσότερες χώρες της Μεσογείου, συμπεριλαμβανομένης της Ελλάδας, δεν έχουν προβεί μέχρι στιγμής στην κήρυξη Α.Ο.Ζ.. Ανεξαρτήτως των όποιων τεχνικών περιορισμών, λοιπόν, η μέγιστη απόσταση χωροθέτησης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου από την ακτή κυμαίνεται ανάλογα με το πλάτος της αιγιαλίτιδας ζώνης της κάθε χώρας μεταξύ 6 και 12 ναυτικών μιλίων, γεγονός που περιορίζει τις δυνατότητες απομάκρυνσής τους από τις ακτές.

Η αλιεία, από την άλλη πλευρά, αποτελεί μια από τις κυριότερες χρήσεις του θαλάσσιου χώρου. Αναπόφευκτα, η ανάπτυξη εγκαταστάσεων γαλάζιας ενέργειας προκαλεί συγκρούσεις ανάμεσα στις δύο χρήσεις και έχει άμεσες επιπτώσεις στον τρόπο διεξαγωγής της αλιευτικής δραστηριότητας. Σε ότι αφορά την υπεράκτια αιολική ενέργεια, οι ανεμογεννήτριες απέχουν συνήθως 500 έως 1000 μέτρα και τα πτερύγια του δρομέα τουλάχιστον 20 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας [15]. Αυτό επιτρέπει σε μικρά σκάφη να πλοηγηθούν εντός του αιολικού πάρκου, εφόσον ληφθούν κατάλληλες προφυλάξεις. Ωστόσο, πολλά κράτη επιλέγουν την καθολική απαγόρευση της διέλευσης για λόγους ασφαλείας τόσο των αιολικών εγκαταστάσεων, όσο και των ίδιων των σκαφών και των πληρωμάτων

τους [16]. Υπέρ της απόφασης αυτής συνηγορεί και η αυξημένη δυσκολία διεξαγωγής επιχειρήσεων έρευνας και διάσωσης σε περιοχές με αιολικές εγκαταστάσεις, ιδιαίτερα όταν επικρατούν δυσμενείς καιρικές συνθήκες και έντονοι άνεμοι. Η απαγόρευση της αλιείας εντός των ορίων ενός αιολικού πάρκου, ωστόσο, μοιραία οδηγεί σε εκτοπισμό της αλιευτικής δραστηριότητας.

Με αυτά τα δεδομένα και λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι ο τουρισμός και η αλιεία αποτελούν σημαντικές πηγές εσόδων για πολλές από τις παράκτιες κοινότητες της Ελλάδας και της Μεσογείου γενικότερα, το ζήτημα της κοινωνικής αποδοχής αναπόφευκτα θα αποτελέσει σημαντική παράμετρο σε οποιονδήποτε σχεδιασμό εισαγωγής της γαλάζιας ενέργειας στη Μεσόγειο.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παραπάνω ανάλυση καταδεικνύει τις μέχρι τώρα πολλαπλές παραμέτρους και αγκυλώσεις που παρουσιάζονται κατά την εξέλιξη του έργου. Η έλλειψη μιας μεμονωμένης σχετικής νομοθεσίας άλλα πολλών εμπλεκόμενων ανεξάρτητων νόμων αναφορικά με την εγκατάσταση γαλάζιων τεχνολογιών, οι πιθανές αντιδράσεις σε διάφορα επίπεδα του κοινωνικού σύνολου που μπορούν να προκύψουν αλλά και η έλλειψη ωριμότητας αποδοχής, γνώσης, εξοικείωσης και ενημέρωσης σχετικά με τις γαλάζιες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την τεχνολογία τους, είναι μερικά από τα προβλήματα που καλείται να αντιμετωπίσει σχετικά τουλάχιστον με την Ελλάδα το πρόγραμμα. Ωστόσο τα πολλαπλά ενεργειακά οφέλη, όπως αποδεικνύονται από υπάρχουσες εγκαταστάσεις σε βόρειες χώρες, το ενδιαφέρον που υπάρχει από την Ευρωπαϊκή Ένωση αλλά και το ενδιαφέρον που παρατηρείται από τους φορείς στην Ελλάδα, καθιστούν αναγκαία την προσπάθεια υλοποίησης αυτού του προγράμματος. Άλλωστε η Ελλάδα, που στο σύνολό της αποτελείται σε ένα μεγάλο μέρος από θάλασσα, μέσα από μια ορθή, περιβαλλοντική, φιλική προς τον τουρισμό και ισόρροπη ανάπτυξη ενός τέτοιου εγχειρήματος, δεν μπορεί παρά να βγει κερδισμένη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Soukissian, T., Denaxa, D., Karathanasi, F., Prospathopoulos, A., Sarantakos, K., Iona, A., Georgantas, K., and Mavrakos, S., 2017, "Marine Renewable Energy in the Mediterranean Sea: Status and Perspectives," Energies, 10(10), pp. 1512.

[2] https://www.britannica.com/place/Mediterranean-Sea

[3] http://www.newworldencyclopedia.org/entry/Mediterranean_Sea

[4] https://www.thoughtco.com/geography-of-the-mediterranean-sea-1435529

[5] http://www.wwf.gr/en/areas/marine

[6] https://el.wikipedia.org/wiki/Μεσόγειος_Θάλασσα

[7] http://www.nrel.gov/docs/fy06osti/39450.pdf

[8] https://seatwirl.com/

[9] https://www.waves4power.com

[10] http://www.seabased.com/en/technology

[11] https://minesto.com/our-technology

[12] Lilley, M., Firestone, J., and Kempton, W., 2010, "The Effect of Wind Power Installations on Coastal Tourism," Energies, 3(1), pp. 1-22.

[13] Scottish Government, 2008, "The Economic Impacts of Wind Farms on Scottish Tourism: A Report for the Scottish Government," Edinburgh, Scottish Government.

[14] Westerberg, V., Jacobsen, J., and Lifran, R., 2013, "The case for offshore wind farms, artificial reefs and sustainable tourism in the French Mediterranean," Tourism Management, 34, pp. 172-183.

[15] Snyder, B., and Kaiser, M., 2009, "Ecological and economic cost-benefit analysis of offshore wind energy," Renewable Energy, 34(6), pp. 1567-1578.

[16] Integrated Management Plan for the North Sea 2015, 2005, The Netherlands: Interdepartmental Directors' Consultative Committee North Sea.

[17] https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/policy/sea_basins/mediterranean_sea_el

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα1 https://minesto.com/sites/default/files/styles/two_column_width__no_scale/public/function_no-text_figures_only.png?itok=ePPnw7nt

Εικόνα 2 https://seatwirl.com/content/uploads/IMG_1684.jpg

Εικόνα 3 http://www.seabased.com/en/newsroom/gallery/category/2-park

ΕΜΠΟΔΙΑ ΚΑΙ ΕΥΚΑΙΡΙΕΣ ΓΙΑ ΕΝΤΑΞΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΑ

Αριστοτέλης Βαρθολομαίος[1]*, Νικόλαος Καλογήρου[1], Ευαγγελία Αθανασίου[1], Μαρία Παπαδοπούλου[2]

[1] Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ
[2] Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ
541 24 Θεσσαλονίκη, e-mail: avarth@arch.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια της ευρωπαϊκής ενεργειακής πολιτικής όλα τα νέα κτίρια θα πρέπει να καταναλώνουν σχεδόν μηδενική ενέργεια από το 2020 και έπειτα. Η έντονη αστικοποίηση της Ευρώπης καθιστά το ενεργειακό ζήτημα κατεξοχήν αστικό, αφού η επίτευξη σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης απαιτεί λύσεις που ξεπερνούν τα μεμονωμένα κτίρια και αντιμετωπίζουν την πολυπλοκότητα των σύγχρονων πόλεων. Μια τέτοια λύση είναι η αποτελεσματική προσαρμογή της αστικής μορφής στο τοπικό κλίμα, προϋπόθεση για την οποία αποτελεί η ύπαρξη ενός ολοκληρωμένου θεσμικού πλαισίου περιβαλλοντικού αστικού σχεδιασμού. Πως μπορεί να κατευθυνθεί ο σύνθετος κλιματικός σχεδιασμός με πολεοδομικά εργαλεία; Ποιές είναι οι ευκαιρίες και ποιά τα εμπόδια που παρουσιάζονται απέναντι στην ενσωμάτωση του κλίματος στην ελληνική πολεοδομία; Η παρούσα εργασία επιχειρεί να απαντήσει αυτά τα σύνθετα ερωτήματα.

Λέξεις Κλειδιά: NZEB, Πολεοδομικός σχεδιασμός, Κλιματικός αστικός σχεδιασμός, Ελληνική πολεοδομία, Βιοκλιματικός σχεδιασμός

1. ΜΕΣΟΓΕΙΟΣ, ΕΛΛΑΔΑ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων τα τελευταία χρόνια και η προβλεπόμενη εξάλειψη των μέχρι σήμερα γνωστών πηγών ενέργειας (κάρβουνου, πετρελαίου κτλ..), παράλληλα όμως και η ευαισθητοποίηση στα θέματα περιβαλλοντικής ρύπανσης, έχουν θέσει ως προτεραιότητα του σύγχρονου κόσμου, την αναζήτηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας, τις επονομαζόμενες ανανεώσιμες πήγες ενέργειας, οι οποίες από την μια ικανοποιούν τις ενεργειακές ανάγκες, από την άλλη προστατεύουν το περιβάλλον. Οι προσπάθειες αναζήτησης τέτοιων πηγών, επικεντρώθηκαν σε διάφορους τομείς, στην παραγωγή ενέργειας από τον ήλιο, τον αέρα, την δύναμη του νερού κ.α. Ωστόσο τα τελευταία μόλις χρόνια, άρχισε να αναπτύσσεται ένας καινούργιος τομέας, μια καινούργια πηγή ανανεώσιμης ενέργειας, η ενέργεια που προέρχεται από την θάλασσα ή αλλιώς «Γαλάζια» Ενέργεια.

Η ανακοίνωση της Ευρωπαϊκής Κοινότητας τον Ιανουάριο 2014 για τη "γαλάζια ενέργεια" υπογράμμιζε τις δυνατότητες των ευρωπαϊκών θαλασσών και ωκεανών ως πηγών καθαρής ενέργειας. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, η θαλάσσια ανανεώσιμη ενέργεια περιλαμβάνει τόσο την υπεράκτια αιολική ενέργεια όσο και την ενέργεια των ωκεανών και αναγνωρίζεται ως νέα κινητήρια δύναμη της οικονομίας της ΕΕ που δημιουργεί οικονομική ανάπτυξη και θέσεις εργασίας, εξασφαλίζει τον ενεργειακό εφοδιασμό και ενισχύει την ανταγωνιστικότητα μέσω της τεχνολογικής καινοτομίας. Ο τομέας της ενέργειας των ωκεανών επισημάνθηκε επίσης στη στρατηγική της Ευρωπαϊκής Κοινότητας για την γαλάζια ανάπτυξη ως μία από τις πέντε αναπτυσσόμενες περιοχές της «μπλε οικονομίας» που θα μπορούσαν να συμβάλουν στη δημιουργία θέσεων απασχόλησης στις παράκτιες περιοχές.

Μέχρι σήμερα, η χρήση της "γαλάζιας ενέργειας" στη λεκάνη της Μεσογείου βρίσκεται ακόμη σε εμβρυακή φάση σε σύγκριση με την κατάσταση σε άλλες θάλασσες / ωκεανούς και κατευθύνεται από μεμονομένα και πειραματικά έργα, στη δε Ελλαδα ειναι ανυπαρκτη. Η Μεσόγειος Θάλασσα χαρακτηρίζεται από περισσότερο ή λιγότερο κατάλληλες περιοχές για την ανάπτυξη της εκμετάλλευσης της "μπλε ενέργειας", θεωρούμενη σε όλες τις πηγές/μορφές της - κύματα, παλίρροιες, ρεύματα, αλατότητα και αποκλίσεις θερμοκρασίας μαζί με άλλες εναλλακτικές μορφές ενέργειας που σχετίζονται με τη χρήση υπεράκτιων των αιολικών πάρκων και της χρήσης της θαλάσσιας βιομάζας.

Ωστόσο ο χαρακτήρας της Μεσογείου θάλασσας είναι πολύ διαφορετικός από αυτόν των Βόρειων χωρών [1][2][3][4][5][6] Τα ιδιαίτερα γεωμορφολογικά, κλιματικά χαρακτηριστικά όσο και η διαρκής ιστορική παρουσία των παρακείμενων σε αυτή λαών της δίνουν ένα πολύπλευρο, ιδιαίτερο χαρακτήρα. Γεωμορφολογικά διαθέτει μακρά και ακανόνιστη ακτογραμμή και στενή σχετικά υφαλοκρηπίδα ενώ το μέσο βάθος των υδάτων της δεν ξεπερνά τα 1500 m. Η δε ιδιαίτερη γεωγραφική της θέση (κλειστή θάλασσα με δυο μόνο εξόδους υδάτων), της αποδίδει το ήπιο σχετικά κλίμα της. Ένα από τα σημαντικά στοιχεία που αφορούν στην ανάπτυξη και τη βιωσιμότητα της γαλάζιας ενέργειας είναι τα χαρακτηριστικά των ανέμων και των κυμάτων. Στη Μεσόγειο πνέουν έντονοι τοπικοί άνεμοι με υψηλότερη διακύμανση ανέμων στο Ιόνιο και στο κεντρικό Αιγαίο. Τα κύματα στη Μεσόγειο είναι πιο χαμηλά σε ύψος σε σχέση με αυτά του Ατλαντικού Ωκεανού και εξαρτώνται άμεσα στην δύναμη των ανέμων. Διαθέτουν, όμως σημαντικό ύψος συγκρινόμενα με άλλες περιοχές. Στην περιοχή της Μεσογείου παρατηρείται επίσης μεγάλη βιοποικιλότητα, με έναν σημαντικό αριθμό ενδημικών ειδών. Η ανάπτυξη οικονομικών και τουριστικών δραστηριοτήτων επηρεάζεται από τις θαλάσσιες και παράκτιες προστατευμένες ζώνες της, με τις μεγαλύτερες σε έκταση ζώνες να βρίσκονται στις υδάτινες ζώνες μεταξύ Ελλάδας και Τουρκίας. Σε έναν αρκετά μεγάλο βαθμό, οι τοπικές οικονομίες των χωρών της Μεσογείου στηρίζονται σε δραστηριότητες όπως ο τουρισμός, η αλιεία και οι θαλάσσιες μεταφορές. Ο τουρισμός αποτελεί το σημαντικότερο ίσως κομμάτι της οικονομίας της Μεσογείου λόγω των τοπίων και της ιστορικότητας της περιοχής με τη πλειοψηφία των τουριστών που την επισκέπτονται να προτιμούν παράκτιες ζώνες

Στο πλαίσιο του γενικού αυτού πλαισίου, δημιουργήθηκε το πρόγραμμα MAESTRALE του οποίου γενικός στόχος του είναι να θέσει τα θεμέλια για μια στρατηγική ανάπτυξης της ωκεάνιας ενέργειας στη Μεσόγειο. Πιο συγκεκριμένα, αποσκοπεί στη δημιουργία των κατάλληλων προϋποθέσεων για την καλύτερη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο θαλάσσιο περιβάλλον της Μεσογείου, χωρίς να παραβλέπονται οι περιβαλλοντικές και πολιτισμικές αξίες της περιοχής. Στο πρόγραμμα συμμετέχουν φορείς και πανεπιστήμια από οκτώ χώρες (Ελλάδα, Ισπανία, Ιταλία, Κροατία, Κύπρο, Μάλτα, Πορτογαλία και Σλοβενία με Έλληνα εταίρο το τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης) κσι χρηματοδοτείται στο πλαίσιο του «Άξονα

2. ΣΤΟΧΟΙ ΤΟΥ ΚΛΙΜΑΤΙΚΟΥ ΑΣΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της πόλης με τα οποία ασχολείται ο αστικός σχεδιασμός είναι η ίδια της η μορφή, δηλαδή το χωρικό πρότυπο των μεγάλων, αδρανών, μόνιμων φυσικών αντικειμένων που την αποτελούν [12]. Ο κλιματικός σχεδιασμός είναι μια σημαντική υποκατηγορία του περιβαλλοντικού σχεδιασμού και γενικότερα της βιώσιμης αστικής ανάπτυξης. Αποτελεί επίσης βασική προϋπόθεση για την ενίσχυση της αστικής ανθεκτικότητας απέναντι στην κλιματική αλλαγή και τις ενεργειακές και οικονομικές κρίσεις [13]. Ειδικότερα, ο κλιματικός αστικός σχεδιασμός στοχεύει [14,15]:

- Στον περιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια για θέρμανση, ψύξη και φωτισμό προσαρμόζοντας τη μορφή των κτιρίων και των οικισμών στο κλίμα και αξιοποιώντας το με παθητικά μέσα. Όταν η ενέργεια που δαπανάται προέρχεται από μη ανανεώσιμες πηγές όπως το πετρέλαιο, το αέριο και οι γαιάνθρακες τότε η ενεργειακή εξοικονόμηση μεταφράζεται και σε περιορισμό έκλυσης αερίων θερμοκηπίου.
- Στον περιορισμό της θερμικής δυσφορίας σε υπαίθριους χώρους τόσο κατά τη ψυχρή όσο και κατά τη θερμή περίοδο. Η βελτίωση του αστικού μικροκλίματος και η καταπολέμηση της Α.Θ.Ν. συνεισφέρουν στην ελάττωση των ψυκτικών φορτίων κατά τη θερμή περίοδο του έτους.
- Στην αποκατάσταση του φυσικού υδρολογικού κύκλου και τη βελτίωση της ποιότητας αέρα μέσα στα αστικά κέντρα. Η αποκατάσταση του υδρολογικού κύκλου μειώνει τις πιθανότητες για πλημμύρες σε αστικά περιβάλλοντα και αναζωογονεί το αστικό υπέδαφος με νερό και θρεπτικά στοιχεία. Η βελτίωση της ποιότητας αέρα, εκτός από τα οφέλη της στην ανθρώπινη υγεία, περιορίζει τα φαινόμενα του νέφους και της θερμοκρασιακής αναστροφής πάνω από τις πόλεις.
- Στη διαρκή προσαρμογή σε φυσικές και ανθρωπογενείς αλλαγές του τοπικού και παγκόσμιου κλίματος. Το τοπικό αλλά και το παγκόσμιο κλίμα δεν παραμένουν χρονικά αμετάβλητα αλλά υπόκεινται σε μια αργή αλλά σταθερή διαδικασία συνεχών μεταβολών με φυσικό τρόπο. Σε αυτή τη διαδικασία παρεμβαίνει η ανθρώπινη δραστηριότητα με αποτέλεσμα την τεχνητή παγκόσμια κλιματική αλλαγή. Η διαρκής προσαρμογή στις περιβαλλοντικές συνθήκες ενισχύει την αστική ανθεκτικότητα απέναντι σε βίαια καιρικά φαινόμενα και στην πιθανή άνοδο της στάθμης της θάλασσας λόγω κλιματικής αλλαγής.

Εύλογα τίθεται το εξής ερώτημα: Υπάρχει κάποια κλιματικά βέλτιστη αστική μορφή; Ο αστικός κλιματολόγος Mills [16] θεωρεί πως ο κλιματικά ιδεατός οικισμός αποτελεί μια ουτοπία. Αυτή η διαπίστωση συσχετίζεται κυρίως με την ίδια τη φύση του αστικού σχεδιασμού ο οποίος οφείλει να προσαρμόζεται στις τοπικές περιβαλλοντικές και κοινωνικές συνθήκες. Συνεπώς δεν υπάρχει μια απόλυτη σχεδιαστική «συνταγή», αλλά ένα εύρος αποδεκτών λύσεων που μεταβάλλεται με τις τοπικές συνθήκες και ανάγκες. Αυτό το εύρος λύσεων ο Oke [17] το αποκαλεί «ζώνη συμβατότητας». Παρακάτω παρατίθεται μια σύνοψη ορισμένων γενικών κατευθύνσεων για το ελληνικό κλίμα, όπως αυτές προέκυψαν από μια εκτενή διερεύνηση της σχετικής βιβλιογραφίας και από παραμετρικές ενεργειακές προσομοιώσεις διαφορετικών αστικών μορφών [14,15,18,19]:

1) Επίτευξη υψηλής συνεκτικότητας του αστικού ιστού. Η υψηλή συνεκτικότητα αφορά τη συμπαγή διάταξη του οικοδομικού όγκου έτσι ώστε να περιορίζονται οι ανεπιθύμητες απώλειες και τα κέρδη θερμότητας. Συνδέεται γενικά με υψηλές αστικές πυκνότητες αλλά όχι με έναν μονοσήμαντο τρόπο, καθώς αρκετοί παραδοσιακοί και προβιομηχανικοί οικισμοί με σχετικά χαμηλές πυκνότητες μπορούν να χαρακτηριστούν αρκετά συνεκτικοί. Επίσης αυτή η συνεκτικότητα δεν πρέπει να επιτυγχάνεται σε βάρος της παθητικής αξιοποίησης του κλίματος (πχ: δημιουργία μεγάλων εσωτερικών χώρων που φωτίζονται, θερμαίνονται και αερίζονται μόνο με τεχνητό τρόπο).
2) Μεγιστοποίηση της συνέργειας των κατευθύνσεων κλιματικού σχεδιασμού παράλληλα με προσαρμογή τους στους τοπικούς περιορισμούς. Δεν είναι απαραίτητη η υιοθέτηση κλιματικά ιδεατών αστικών μορφών οι οποίες μπορεί να είναι αυστηρές και άκαμπτες (πχ: σειρές στοιχισμένων και νότια προσανατολισμένων κτιρίων). Η τυπολογία του συμπαγούς οικοδομικού τετραγώνου, η οποία είναι ήδη κυρίαρχη στις ελληνικές πόλεις, προσφέρει αρκετά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα καθώς υπό προϋποθέσεις (νότιος προσανατολισμός, ορθή διαστασιολόγηση, ενιαίος εσωτερικός ακάλυπτος, έλεγχος της ογκοπλαστικής διαμόρφωσης των κτιρίων, τοπική σκίαση) μπορεί να συνδυάσει υψηλή συνεκτικότητα με σημαντικά χειμερινά ηλιακά κέρδη και θερινό σκιασμό.
3) Εξασφάλιση επαρκούς χειμερινού ηλιασμού κτιρίων και υπαίθριων χώρων. Επιτυγχάνεται μέ στρατηγικές όπως: (ι) μεγιστοποίηση των νότιων πλευρών των οικοδομικών τετραγώνων και των ανοιγμάτων των κτιρίων και (ιι) τήρηση ελάχιστων αποστάσεων σε υπαίθριους χώρους.

4) Μεγιστοποίηση του θερινού σκιασμού και της θερινής αποβολής θερμικής ακτινοβολίας και διατήρηση χαμηλών επιφανειακών θερμοκρασιών. Επιτυγχάνεται με στρατηγικές όπως: (i) ελαχιστοποίηση των ανατολικών-δυτικών όψεων και ανοιγμάτων των κτιρίων, (ii) δενδροφύτευση και φυτοκάλυψη αστικών και κτιριακών επιφανειών, (iii) τοπικές διατάξεις σκίασης, (iv) τήρηση ελάχιστων αποστάσεων ανάμεσα στα κτίρια [εκτός ανατολικών-δυτικών όψεων], (v) χρήση υλικών με κατάλληλες θερμοφυσικές και οπτικές ιδιότητες.

5) Μεγιστοποίηση αστικού εξαερισμού και φυσικού δροσισμού κτιρίων. Επιτυγχάνεται με στρατηγικές όπως: (i) δημιουργία διαδρόμων εξαερισμού και αύξηση ανεμοδιαπερατότητας του αστικού ιστού, (ii) εξασφάλιση οριζόντιου και κατακόρυφου εξαερισμού σε επίπεδο οικοδομικού τετραγώνου και (iii) εκτενείς δεντροφυτεύσεις.

6) Δημιουργία ευνοϊκών μικροκλιμάτων. Επιτυγχάνεται με στρατηγικές όπως: (i) δημιουργία δικτύου πράσινων υποδομών, (ii) τακτική χωροθέτηση πάρκων τσέπης, (iii) περιορισμό σκληρών υδατοστεγών επιστρώσεων, (iv) περιβαλλοντική αναβάθμιση ιδιωτικών υπαίθριων χώρων (πχ: ακάλυπτοι).

7) Περιορισμός ανθρωπογενών εκπομπών θερμότητας και ρύπων. Επιτυγχάνεται με στρατηγικές όπως: (i) περιορισμός μετακινήσεων με οχήματα και (ii) περιορισμός χρήσης ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού (πχ: εξωτερικές μονάδες κλιματιστικών).

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΗΣ ΑΣΤΙΚΗΣ ΜΟΡΦΗΣ ΜΕ ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ

Η προηγούμενη υποενότητα ανέδειξε τη συνθετική διάσταση του κλιματικού αστικού σχεδιασμού. Το βασικό συμπέρασμα ήταν πως δεν μπορεί να περιγραφεί με απόλυτο τρόπο μια γενική «βέλτιστη» αστική μορφή. Αντίθετα, η τοπική βελτιστοποίηση της αστικής μορφής είναι δυνατή μέσα από μια οργανική και σύνθετη διερεύνηση των περιβαλλοντικών της χαρακτηριστικών και των ιδιαίτερων τοπικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή μελέτης, είτε πρόκειται για ένα οικόπεδο είτε για μια ολόκληρη γειτονιά. Αυτή η συνθετική προσέγγιση προϋποθέτει μια στενή αλληλεπίδραση ανάμεσα στο σχεδιασμό και την ανάλυση του μικροπεριβάλλοντος, της θερμικής άνεσης και της ενεργειακής κατανάλωσης.

Συνεπώς ένα νέο σημαντικό ερώτημα που προκύπτει είναι το εξής: Αποτελεί η ενεργή πολεοδόμηση (masterplanning) μονόδρομο για την προσαρμογή της αστικής μορφής στο κλίμα ή είναι δυνατή η επίτευξη ενός περιβαλλοντικά ισοδύναμου αποτελέσματος μέσα από την κανονιστική ρύθμιση; Εάν η λεπτομερής ενεργή πολεοδόμηση αποτελεί πράγματι μοναδική λύση τότε ο κλιματικός αστικός σχεδιασμός θα τείνει να περιορίζεται στις γειτονιές και στους οικισμούς πειραματικού περιβαλλοντικού χαρακτήρα. Εάν όμως είναι δυνατή μια αποτελεσματική κανονιστική ρύθμιση του κλιματικού αστικού σχεδιασμού τότε αυτός μπορεί να γενικευθεί και να ξεπεράσει το μέχρι τώρα περιορισμένα όρια εφαρμογής.

Απόρροια της συνθετικότητας του κλιματικού σχεδιασμού είναι πως η εισαγωγή μεθόδων και εργαλείων από ξένα πολεοδομικά συστήματα και από χώρες με διαφορετικά κλίματα χωρίς να προηγείται μια διαδικασία προσαρμογής θα έχει μάλλον περιορισμένα αποτελέσματα. Αντίθετα, είναι αναγκαία η εξεύρεση καινοτόμων λύσεων ή η προσαρμογή δοκιμασμένων μεθόδων στα τοπικά περιβαλλοντικά δεδομένα όπως και στο υφιστάμενο θεσμικό πλαίσιο που ρυθμίζει τη δόμηση, την πολεοδόμηση και την ιδιοκτησία. Μια δεύτερη βασική παρατήρηση είναι πως ο κλιματικός σχεδιασμός δύσκολα μπορεί να ενεργοποιηθεί με αποσπασματικές ρυθμίσεις. Αντίθετα αυτές οφείλουν να εντάσσονται σε ένα συνολικό πλαίσιο περιβαλλοντικών μεταρρυθμίσεων ώστε να μεγιστοποιείται η μεταξύ τους συνέργεια. Μια επιπλέον παρατήρηση είναι πως ο κλιματικός σχεδιασμός δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί αποκλειστικά με γενικές ρυθμίσεις, αλλά αυτές οφείλουν να εξειδικεύονται και να προσαρμόζονται σε διαφορετικές τοπικές συνθήκες.

Στην εργαλειοθήκη της πολεοδομικής ρύθμισης εντοπίζονται οι εξής βασικές κατηγορίες εργαλείων: (ι) κατευθυντήριες οδηγίες, (ii) κανονισμοί, (iii) κίνητρα / αντικίνητρα, (iv) μηχανισμοί αξιολόγησης και (v) ιδιοκτησιακά δικαιώματα. Τα εργαλεία μπορούν επίσης να διαχωριστούν ανάλογα με το τρόπο εφαρμογής (περιγραφικά ή επιδόσεων), την ελαστικότητα (εντολών-και-ελέγχου, με δυνατότητα επιλογής, εθελοντικά), την εφικτότητα και την κλίμακα εφαρμογής [15]. Αυτές οι ιδιότητες των εργαλείων επιτρέπουν τη δημιουργία πρωτότυπων μηχανισμών ρύθμισης. Για παράδειγμα, οι οδηγίες συνήθως έχουν εθελοντικό χαρακτήρα, ωστόσο εάν συνδυαστούν με ένα πλαίσιο βαθμολόγησης ή με μια διαδικασία αξιολόγησης από μια επιτροπή αποκτούν ένα σημαντικό κανονιστικό χαρακτήρα. Όμοια, ένας κανονισμός μπορεί, αντί να περιγράφει μια επιθυμητή γεωμετρική συνθήκη, να επιβάλλει

την επιστημονικά τεκμηριωμένη επίτευξη του επιδιωκόμενου στόχου με χρήση κάποιων δεικτών ή μιας διαδικασίας αξιολόγησης.

Οι επιθυμητές ποιότητες των εργαλείων περιβαλλοντικού πολεοδομικού ελέγχου μπορούν να αναδειχθούν καλύτερα μέσα από το εξής υποθετικό παράδειγμα: Έστω μία περιοχή επέκτασης σχεδίου πόλης όπου βασικός στόχος είναι να επιτευχθεί μεγιστοποίηση του χειμερινού ηλιασμού. Θα μπορούσε να εφαρμοστεί ένας απλός γεωμετρικός κανονισμός σύμφωνα με τον οποίο ένα ποσοστό των οικοδομικών τετραγώνων ή των οικοπέδων πρέπει να προσανατολίζουν τη μεγάλη τους πλευρά στο Νότο και θα πρέπει να διαστασιολογούνται - όπως και οι δρόμοι - σύμφωνα με μια τυποποιημένη σχέση πλάτους των υπαίθριων χώρων προς ύψος των κτιρίων. Μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό πως μια τέτοια προσέγγιση, παρότι έχει εφαρμοστεί τοπικά σε περιοχές χαμηλής δόμησης σε Η.Π.Α., Αυστραλία και Νέα Ζηλανδία [15] είναι αρκετά άκαμπτη. Μια εναλλακτική λύση θα ήταν να περιγράφονται δικαιώματα πρόσβασης στο ηλιακό φως, τα οποία συνδέονται με την ιδιοκτησία ή την άδεια δόμησης. Στις Η.Π.Α., για παράδειγμα, πάνω από 40 πολιτείες έχουν θεσπίσει σχετικά δικαιώματα ενώ στο Η.Β. το δικαίωμα προστατεύεται θεσμικά από το 19^{ο} αιώνα [13]. Αυτή η λύση όμως εστιάζει στο οικόπεδο και στο κτίριο και όχι στην κλίμακα του αστικού ιστού όπου είναι το ζητούμενο.

Μια άλλη λύση θα ήταν η χρήση επίσημων κατευθυντήριων οδηγιών. Όμως οι οδηγίες, παρότι προσφέρουν μεγάλη ελαστικότητα, έχουν ένα εθελοντικό χαρακτήρα εφαρμογής. Η προσφορά κάποιων οικονομικών και αναπτυξιακών κινήτρων, όπως για παράδειγμα τα κίνητρα βιογειτονιάς της Φαένζα στην Ιταλία [20], θα μπορούσε να ενθαρρύνει την υιοθέτηση των οδηγιών, χωρίς ωστόσο να εξασφαλίζεται ένα ομοιόμορφο αποτέλεσμα. Εναλλακτικά ο βαθμός εφαρμογής των οδηγιών θα μπορούσε να τεκμηριώνεται επιστημονικά με προσομοιώσεις της προσπίπτουσας χειμερινής ηλιακής ακτινοβολίας στον αστικό ιστό όπως αυτός παράγεται από τη ρυμοτομία και τους γενικούς και ειδικούς κανονισμούς δόμησης. Η ρύθμιση της τρίτης διάστασης στο ρυμοτομικό σχέδιο θα μπορούσε να πραγματοποιείται με κάποιο εργαλείο όπως η «ηλιακή περιβάλλουσα» (Solar Envelope) [21] ή το «ενεργειακό στερεό» (Residential Solar Block Envelope) [15,19]. Οι οδηγίες θα μπορούσαν να καθορίζουν ένα ελάχιστο όριο συνολικής προσπίπτουσας χειμερινής ακτινοβολίας το οποίο θα εξασφάλιζε τη βιωσιμότητα των παθητικών και ενεργητικών ηλιακών συστημάτων. Η απόκλιση από το όριο θα μπορούσε να βαθμολογείται στα πλαίσια ενός τυποποιημένου συστήματος περιβαλλοντικής αξιολόγησης της μελέτης.

Το πλαίσιο αξιολόγησης συνεισφέρει στον αντικειμενικό έλεγχο του βαθμού εφαρμογής των οδηγιών, προσφέροντας παράλληλα μεγάλη ευελιξία στην υιοθέτηση περιβαλλοντικά ισοδύναμων λύσεων και άρα στην τοπική βελτιστοποίηση του σχεδιασμού. Δηλαδή, εάν σε μια περιοχή δεν είναι δυνατή η επίτευξη ενός περιβαλλοντικού στόχου (πχ: εκτενής αξιοποίηση της χειμερινής ηλιακής ακτινοβολίας), τότε έμφαση θα μπορούσε να δίνεται σε άλλες κατευθύνσεις περιβαλλοντικού σχεδιασμού (πχ: φυσικός δροσισμός και φωτισμός) οι οποίες θα βαθμολογούνταν στο ίδιο πλαίσιο αξιολόγησης. Αυτή η προσέγγιση συνδυάζει μια μεγάλη ελαστικότητα που είναι επιθυμητή στον περιβαλλοντικό σχεδιασμό με τυποποιημένες και κανονιστικές διαδικασίες περιβαλλοντικής αξιολόγησης που τεκμηριώνονται επιστημονικά με προσομοιώσεις. Σε αυτές τις αρχές κινούνται τα πλαίσια αξιολόγησης αστικής βιωσιμότητας που έχουν ήδη προαναφερθεί στην εισαγωγή. Επίσης σχετικός είναι ο Πράσινος Συντελεστής (Green Space Factor) ο οποίος σε ορισμένες πόλεις (πχ: Βερολίνο, Μάλμε, Σηάτλ, Στοκχόλμη) εφαρμόζεται με κανονιστική ισχύ. Ο Πράσινος Συντελεστής ρυθμίζει την περιβαλλοντική ποιότητα των ιδιωτικών υπαίθριων χώρων χρησιμοποιώντας ένα πλαίσιο βαθμολόγησης των προτεινόμενων περιβαλλοντικών παρεμβάσεων [22].

Μέσα από αυτό το σχετικά απλό παράδειγμα αναδεικνύονται τα επιθυμητά χαρακτηριστικά των εργαλείων ρύθμισης του κλιματικού αστικού σχεδιασμού που είναι τα εξής:

1) Σαφήνεια και απλότητα γενικών κανονισμών και κατευθύνσεων έτσι ώστε να αποτελούν ένα πρότυπο πάνω στο οποίο δομούνται οι εξειδικευμένες ρυθμίσεις που προσαρμόζονται στις τοπικές περιβαλλοντικές και αναπτυξιακές συνθήκες.

2) Αλληλεπίδραση ανάμεσα στο σχεδιασμό και στην περιβαλλοντική ανάλυση. Η αποτελεσματικότητα του κλιματικού αστικού σχεδιασμού οφείλει να τεκμηριώνεται επιστημονικά και να αξιολογείται σε κάθε μελέτη με κατάλληλα εργαλεία (πχ: προγράμματα προσομοιώσεων μικροκλίματος και ενεργειακής κατανάλωσης).

3) Επίτευξη ομοιόμορφου αποτελέσματος συνδυάζοντας δημιουργικότητα στο σχεδιασμό και αποτελεσματικότητα στον έλεγχο. Μπορεί να επιτευχθεί μέσα από ένα πλαίσιο βαθμολόγησης και περιβαλλοντικής τεκμηρίωσης του σχεδιασμού με κανονιστική ισχύ. Σε ένα τέτοιο πλαίσιο οι οδηγίες σχεδιασμού αποκτούν ένα κεντρικό ρόλο.

4) Προτίμηση, όπου είναι δυνατό, του προτύπου επιδόσεων (πχ: προδιαγραφές για παθητικό ηλιασμό, φυσικό δροσισμό και φωτισμό, επίτευξη επιπέδων θερμικής άνεσης, περιορισμός της Α.Θ.Ν.) αντί του περιγραφικού προτύπου (πχ: γεωμετρικοί περιορισμοί).

5) Συνολική αντιμετώπιση του παραγόμενου αστικού περιβάλλοντος στις τρεις διαστάσεις. Αστική ρυμοτομία, υπαίθριοι χώροι, και κτιριακοί όγκοι πρέπει ιδεατά να ρυθμίζονται από ένα ενιαίο πλαίσιο αρχών και όχι με αποσπασματικό τρόπο.

4. ΕΜΠΟΔΙΑ ΚΑΙ ΕΥΚΑΙΡΙΕΣ ΕΝΤΑΞΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΑ

Έχοντας πλέον αποσαφηνήσει τους στόχους του κλιματικού αστικού σχεδιασμού και τα επιθυμητά χαρακτηριστικά των μεθόδων ρύθμισής του η παρούσα μελέτη προχωρά στο επόμενο στάδιο που αξιολογεί τη δυνατότητα ενσωμάτωσης του κλίματος στην ελληνική πολεοδομία. Η ενσωμάτωση κλιματικών κριτηρίων στον ελληνικό πολεοδομικό σχεδιασμό είναι συνάρτηση πολλών παραγόντων όπως:

- Τα αρνητικά χαρακτηριστικά του ελληνικού πολεοδομικού συστήματος. Μια σειρά από καίρια διοικητικά, δομικά και θεσμικά προβλήματα που αγγίζουν όλες τις πτυχές του πολεοδομικού συστήματος στην Ελλάδα αποτελούν τροχοπέδη στην ένταξη του κλίματος στο σχεδιασμό των οικισμών και των κτιρίων. Συνοπτικά αυτά τα προβλήματα είναι: (i) Ο συνδυασμός υψηλού συγκεντρωτισμού με ένα συχνά δαιδαλώδες θεσμικό υπόβαθρο. (ii) Η άκαμπτη αντιμετώπιση των τοπικών συνθηκών όπως το κλίμα στα πλαίσια γενικών κανονιστικών ρυθμίσεων. (iii) Η γενική αδυναμία εφαρμοστικών και ελεγκτικών μηχανισμών η οποία αντανακλάται από το χάσμα ανάμεσα στο σχεδιασμό και την πολεοδομική πραγματικότητα. (iv) Ο πυροσβεστικός χαρακτήρας αλλεπάλληλων θεσμικών ρυθμίσεων απέναντι σε ένα προδιαμορφωμένο πολεοδομικό «status quo» που παράγεται από την αυθαίρετη και την εκτός σχεδίου δόμηση. (v) Οι περιορισμένες δυνατότητες προληπτικού σχεδιασμού της υπαίθρου και των περιαστικών περιοχών, (vi) Η μη έγκαιρη ολοκλήρωση του Εθνικού Κτηματολογίου και οι αργοί μηχανισμοί εξασφάλισης εκτάσεων για κοινόχρηστες/ κοινοφελείς χρήσεις και τακτοποίησης της ιδιοκτησίας στα πλαίσια των πράξεων εφαρμογής [23–28].

- Το επίπεδο της έρευνας πάνω στον κλιματικό αστικό σχεδιασμό και τις μεθόδους ρύθμισης της αστικής μορφής με κλιματικά κριτήρια. Η κάλυψη υφιστάμενων ερευνητικών κενών επιταχύνει τη διάδοση κατευθύνσεων καλών πρακτικών κλιματικού αστικού σχεδιασμού διεθνώς. Ειδικότερα σε εθνικό επίπεδο η έρευνα συνεισφέρει σημαντικά (i) στην εξειδίκευση των κατευθύνσεων κλιματικού σχεδιασμού στις διαφορετικές κλιματικές ζώνες, (ii) στην προσαρμογή των ελληνικών πόλεων στην παγκόσμια κλιματική αλλαγή και (iii) στην παραγωγή καινοτόμων μεθόδων ρύθμισης της αστικής μορφής που θα μπορούσαν να ενταχθούν ως πολεοδομικά εργαλεία στη σχετική νομοθεσία. Στην ενότητα της έρευνας και της καινοτομίας μπορούν να ενταχθούν οι πιλοτικές εφαρμογές κλιματικού αστικού σχεδιασμού. Στην Ελλάδα τα παραδείγματα είναι λιγοστά και συμπεριλαμβάνουν το «Ηλιακό Χωριό» στην Αττική, ένα βιοκλιματικό οικισμό περίπου 120 κατοικιών στην Καλαμάτα, ενω σχέδια έχουν εκπονηθεί για ανάλογους οικισμούς στη Νέα Ποντοκώμη της Κωζάνης και στον Ιασμό της Ροδόπης. Αξίζει να σημειωθεί πως ο τελευταίος θα υλοποιηθεί με χρήση ενός πλαισίου περιβαλλοντικής αξιολόγησης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του προγράμματος SD-Med [29].

- Τα διαθέσιμα εργαλεία ανάλυσης του τετράπτυχου κλίμα - αστική μορφή - θερμική άνεση - ενέργεια. Βασικά εργαλεία είναι τα λογισμικά προσομοιώσεων αστικού κλίματος, θερμικής άνεσης, ηλιακής ακτινοβολίας, κίνησης ανέμου, και κτιριακής ενεργειακής κατανάλωσης. Νέες πλατφόρμες ελεύθερου λογισμικού / λογισμικού ανοικτού κώδικα (πχ: Ladybug [30] και UMEP [31]) βελτιώνονται συνεχώς και πλέον προσφέρουν μεγάλες δυνατότητες για καθοδήγηση του κλιματικού σχεδιασμού με επιστημονικά δεδομένα. Το αποτέλεσμα είναι η σημαντική διευκόλυνση του κλιματικού σχεδιασμού, της ανάλυσης και του ελέγχου σε σχέση με το παρελθόν.

- Το επίπεδο εκπαίδευσης των μηχανικών (πχ: Αρχιτέκτονες, Πολιτικοί Μηχανικοί, Χωροτάκτες και Πολεοδόμοι, Μηχανολόγοι Μηχανικοί, Τοπογράφοι Μηχανικοί, Χημικοί Μηχανικοί) και συναφών ειδικοτήτων (πχ: Βιομετεωρολόγοι / Κλιματολόγοι, Φυσικοί Κτιρίων) πάνω στον περιβαλλοντικό σχεδιασμό κτιρίων, υπαίθριων χώρων και οικισμών. Η διάδοση της γνώσης του περιβαλλοντικού σχεδιασμού εγκαθιδρύει μια κοινή διεπιστημονική γλώσσα επικοινωνίας. Ένα θετικό βήμα που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα είναι η ανάπτυξη σχετικών Προγραμμάτων Μεταπτυχιακών Σπουδών (Π.Μ.Σ.), όπως, για παράδειγμα το Π.Μ.Σ. «Περιβαλλοντικός

Αρχιτεκτονικός Σχεδιασμός» του Α.Π.Θ. το Π.Μ.Σ. «Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Κτιρίων» του Ε.Α.Π. και το «MSc in Energy Building Design» του I.H.U.

- Οι αντιλήψεις και στάσεις των πολιτών απέναντι στον περιβαλλοντικό σχεδιασμό πόλεων και κτιρίων. Είναι απαραίτητη η ενημέρωση των πολιτών σχετικά με τις επιπτώσεις της Α.Θ.Ν. και της κλιματικής αλλαγής στη θερμική άνεση και την υγεία όπως και για τις δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια με παθητική αξιοποίηση του κλίματος. Δράσεις ενημέρωσης μπορούν να συνεισφέρουν στην αποδοχή και υποστήριξη μεγάλων περιβαλλοντικών θεσμικών μεταρρυθμίσεων για τις ελληνικές πόλεις.

- Οι τρέχουσες οικονομικές συνθήκες. Οι δυσμενείς οικονομικές συνθήκες των τελευταίων ετών έχουν περιορίσει σημαντικά τους ρυθμούς αστικής εξάπλωσης που παρατηρούνταν πριν το ξέσπασμα της κρίσης. Αφενός, αυτές οι συνθήκες αποτελούν ευκαιρία για πειραματισμό και για μεγάλες πολεοδομικές μεταρρυθμίσεις με περιβαλλοντικό περιεχόμενο. Αφετέρου, η υποστελέχωση των σχετικών υπηρεσιών περιορίζει σημαντικά τις δυνατότητες για ενίσχυση των αρμόδιων φορέων με ειδήμονες του κλιματικού σχεδιασμού που θα μπορούσαν να συνεισφέρουν σε αυτή τη διαδικασία. Παράλληλα, η οικονομική κρίση δυσχεραίνει την ομαλή χρηματοδότηση προγραμμάτων όπως το «Εξοικονομώ κατ' Οίκον» και των δράσεων του «Πράσινου Ταμείου».

- Το σύγχρονο ελληνικό αστικό τοπίο και το ιδιοκτησιακό καθεστώς στις ελληνικές πόλεις. Τα μεγάλα περιβαλλοντικά προβλήματα των ελληνικών πόλεων είναι αρκετά γνωστά [26] και οι δυνατότητες για ολοκληρωμένες παρεμβάσεις σε υφιστάμενους αστικούς ιστούς μάλλον περιορισμένες. Τη δυσκολία του εγχειρήματος των ολοκληρωμένων περιβαλλοντικών αστικών αναπλάσεων αυξάνει σημαντικά η οικονομική κρίση, ο μεγάλος αριθμός των μικροϊδιοκτητών και το μη-ολοκληρωμένο ακόμα Εθνικό Κτηματολόγιο. Συνεπώς είναι απαραίτητη η εξεύρεση καινοτόμων οικονομικών εργαλείων διαχείρισης της γης και της ιδιοκτησίας για την ενεργοποίηση των ολοκληρωμένων περιβαλλοντικών αναπλάσεων, όπως η παραγωγή μεθόδων ένταξης του μεγάλου πλήθους μικροϊδιοκτητών σε διαδικασίες περιβαλλοντικού συμμετοχικού σχεδιασμού.

- Οι ευκαιρίες και τα εμπόδια που προβάλλει η υφιστάμενη σχετική νομοθεσία απέναντι στην ενσωμάτωση κλιματικών κριτηρίων σχεδιασμού. Σε αυτή την τελευταία παράμετρο εστιάζει στη συνέχεια η παρούσα εργασία. Η εστίαση στη νομοθεσία γίνεται διότι μέσω αυτής κατοχυρώνονται θεσμικά οι μηχανισμοί που ενεργοποιούν τον κλιματικό σχεδιασμό. Ένας επιπλέον λόγος είναι ότι ενώ οι απαιτούμενες περιβαλλοντικές πολεοδομικές μεταρρυθμίσεις προϋποθέτουν ανάλογη πολιτική βούληση, η επιτυχία τους εξαρτάται τόσο από το περιεχόμενο τους όσο και από την αποτελεσματικότητα των μεθόδων σχεδιασμού και ελέγχου που προβλέπουν.

Η μελέτη εξετάζει μια σειρά από σχετικά νομοθετήματα, δηλαδή: το άρθρο 24 του Συντάγματος, τους βασικούς πολεοδομικούς Νόμους (Ν.Δ. 17.7.1923, Ν.1337/1983, Ν.2508/1997, Ν. 4269/2014 όπως τροποποιήθηκε από τον Ν.4447/2016), το Νέο Οικοδομικό Κανονισμό (Ν.Ο.Κ. - Ν. 4067/2012), τον «Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων» (Κ.Εν.Α.Κ. - Φ.Ε.Κ. 407/9.4.2010) ο οποίος εισάγει την ενεργειακή διάσταση στο σχεδιασμό των κτιρίων, τα Πολεοδομικά Σταθερότυπα (απόφαση 10788/ΦΕΚ285Δ/5.3.2004) και τη νομοθεσία που αφορά τις «Στρατηγικές Μελέτες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων» (Σ.Μ.Π.Ε. - Ν.1650/1986 όπως ενημερώθηκε από το Ν.3010/2002 και συμπληρώθηκε με την ΚΥΑ 15393/2332/2002 και την ΚΥΑ 107017/28-8-2006). Από την ανασκόπηση αυτών των νομοθετημάτων προκύπτουν οι ακόλουθες διαπιστώσεις.

4.1. Θέσπιση ενός περιβαλλοντικού «χάρτη-οδηγού» για τις ελληνικές πόλεις.

Μια βασική διαπίστωση είναι πως η περιβαλλοντικά βιώσιμη αστική ανάπτυξη δεν εκφράζεται σαν μια ευρέως αποδεκτή πολιτική θέση ή σαν κοινωνική απαίτηση μέσω του άρθρου 24 του Συντάγματος ενώ η ενσωμάτωσή της στα πολεοδομικά νομοθετήματα είναι αρκετά ασαφής. Σε επίπεδο νομοθεσίας, ο Ν.2508/1997 έδωσε ορθά έμφαση στην αστική βιωσιμότητα και τις αναπλάσεις και ενισχύοντας το στρατηγικό ρόλο του σχεδιασμού. Αντίθετα, ο Ν.4269/2014 δεν περιείχε καμία ουσιαστική καινοτομία σε θέματα αστικής βιωσιμότητας η οποία ως έννοια εμφανίστηκε μόνο στον τίτλο. Ο νέος Ν.4447/2016 επανεισάγει έναν ορισμό της βιώσιμης ανάπτυξης ο οποίος συνθέτει με έναν ασαφή τρόπο την οικονομική ανάπτυξη, την κοινωνική δικαιοσύνη και την προστασία του φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος. Επίσης, δεν περιέχει, όπως ο προηγούμενος Νόμος, καμία ουσιαστική περιβαλλοντική καινοτομία. Η ασάφεια που χαρακτηρίζει τον ορισμό και τον τρόπο θεσμικής ρύθμισης της αστικής βιωσιμότητας τα τελευταία χρόνια διαπιστώνεται επίσης από ένα μέρος του τεχνικού κόσμου [28] και αποτελεί ένα βασικό πρόβλημα καθορισμού προτεραιοτήτων.

Η ανάγκη για συνολική μεταρρύθμιση προκύπτει από την ανάγκη για: (i) αντιμετώπιση των εγγενών αδυναμιών της ελληνικής πολεοδομίας, (ii) αποσαφήνιση των προτεραιοτήτων στα πλαίσια της βιωσιμότητας και (iii) ενεργοποίηση του κλιματικού σχεδιασμού σε στις αστικές και κτιριακές κλίμακες. Μια σημαντική κίνηση που θα συνέβαλλε προς αυτή την κατεύθυνση θα ήταν η διατύπωση ενός αναπτυξιακού οράματος για τις ελληνικές πόλεις με σαφή περιβαλλοντικό χαρακτήρα. Σε αυτό το περιβαλλοντικό «χάρτη-οδηγό» για τις ελληνικές πόλεις θα μπορούσαν να διατυπώνονται με σαφήνεια γενικές αρχές για τη βιώσιμη αστική ανάπτυξη όπως και οι στόχοι και οι βασικές πολιτικές επίτευξης αυτών των στόχων. Ορισμένοι σημαντικοί στόχοι θα μπορούσαν να αφορούν τον προγραμματισμό περιβαλλοντικών αναπλάσεων, τη συστηματική ένταξη του κλιματικού σχεδιασμού στον έλεγχο της δόμησης και της αστικής ανάπτυξης, τη διάδοση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.) στις πόλεις και τη δημιουργία εξειδικευμένων οικονομικών και διοικητικών μηχανισμών οι οποίοι θα ενεργοποιούν αυτές τις διαδικασίες.

4.2. Παραγωγή επίσημων κατευθυντήριων οδηγιών για τον κλιματικό σχεδιασμό κτιρίων, υπαίθριων χώρων και οικισμών.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην ενότητα 3, οι κατευθυντήριες οδηγίες δεν περιορίζονται αποκλειστικά σε ένα αυστηρά ενημερωτικό ρόλο, αλλά αντίθετα μπορούν να κατέχουν μια κεντρική θέση στην πολεοδομική ρύθμιση, στην αξιολόγηση του παραγόμενου μελετητικού έργου και στην κατάρτιση των μηχανικών πάνω στον κλιματικό σχεδιασμό. Το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (Κ.Α.Π.Ε.) έχει παραγάγει κατά καιρούς αρκετές οδηγίες με ενημερωτικό περιεχόμενο. Παρομοίως, στα πλαίσια του προγράμματος «Βιοκλιματικές Αναβαθμίσεις Δημόσιων Ανοιχτών Χώρων» συντάχθηκαν σχετικές οδηγίες για την εκπόνηση μελετών για υπαίθριους χώρους. Στα πλαίσια του Κ.Εν.Α.Κ. παράχθηκαν αρκετές χρήσιμες τεχνικές οδηγίες όπως και εξειδικευμένες κατευθύνσεις βιοκλιματικού σχεδιασμού κτιρίων. Δυστυχώς, οι τελευταίες ουδέποτε οριστικοποιήθηκαν και επισημοποιήθηκαν ώστε να αποτελέσουν ένα ουσιαστικό εργαλείο αξιολόγησης των αρχιτεκτονικών και ενεργειακών μελετών.

Μια σημαντική παρατήρηση είναι πως ουδέποτε συντάχθηκαν οδηγίες κλιματικού σχεδιασμού για τις αστικές κλίμακες. Τα Πολεοδομικά Σταθερότυπα είναι ίσως το μόνο επίσημο έγγραφο που βρίσκεται πιο κοντά στη λογική των οδηγιών. Αυτά όμως παρέχουν μόνο γενικές κατευθύνσεις, όπως η επιδίωξη της συμπαγούς ανάπτυξης και σε αρκετές περιπτώσεις περιορίζονται στην περιγραφή των απολύτως απαραίτητων προγραμματικών μεγεθών (πχ: πληθυσμιακές πυκνότητες και ελάχιστα εμβαδά υπαίθριων χώρων ανά κάτοικο) χωρίς να προσφέρουν επαρκή επιστημονική τεκμηρίωση. Τα νέα Σταθερότυπα, των οποίων η σύνταξη προβλέπεται από το Ν.4269/2014, οφείλουν να χαρακτηρίζονται από μια ενισχυμένη περιβαλλοντική διάσταση. Σε κάθε περίπτωση τα Σταθερότυπα συμπληρώνουν τις οδηγίες σχεδιασμού με παραμέτρους που μπορούν να τυποποιηθούν και δεν τις υποκαθιστούν συνολικά.

Οι επίσημες οδηγίες θα μπορούσαν να αποκτήσουν έναν κεντρικό ρόλο διεπιστημονικής επικοινωνίας, έρευνας, εκπαίδευσης, αξιολόγησης και ρύθμισης του κλιματικού αστικού και αρχιτεκτονικού σχεδιασμού. Η διεπιστημονικότητα είναι απαραίτητη για να επιτευχθεί ο βασικός στόχος των οδηγιών, δηλαδή η εγκαθίδρυση αξιόπιστων, και αποτελεσματικών μεθοδολογιών κλιματικής ανάλυσης και σχεδιασμού όπως και μηχανισμών αξιολόγησης και ελέγχου της αστικής ανάπτυξης και της δόμησης. Οι επίσημες οδηγίες μπορούν, συνεπώς, να αποτελέσουν ένα σημείο αναφοράς το οποίο θα ενημερώνεται τακτικά με νέα επιστημονικά δεδομένα. Οι οδηγίες μπορούν να εξειδικεύονται στην κλίμακα του οικισμού, της γειτονιάς, του κτιρίου και των οικοδομικών λεπτομερειών, δημιουργώντας μια ολοκληρωμένη «γλώσσα προτύπων» (Pattern Language [32]) κλιματικού σχεδιασμού. Η ενίσχυση του κανονιστικού χαρακτήρα των οδηγιών μπορεί να πραγματοποιηθεί αρχικά με πιλοτικές εφαρμογές και έπειτα με θέσπιση μηχανισμών βαθμολόγησης και αξιολόγησης της εφαρμογής τους.

Την ανάπτυξη, τακτική ενημέρωση και διάχυση των οδηγιών θα μπορούσε να αναλάβει ένας κεντρικός φορέας, που μεταξύ άλλων, θα είναι επιφορτισμένος με σχετικά ερευνητικά και διοικητικά καθήκοντα. Ο ίδιος φορέας θα μπορούσε να αξιολογεί δειγματοληπτικά τις περιβαλλοντικές επιδόσεις του παραγόμενου πολεοδομικού και αρχιτεκτονικού έργου στην Ελλάδα και παράλληλα να διερευνά και να εφαρμόζει πιλοτικά καινοτόμα εργαλεία περιβαλλοντικού σχεδιασμού. Η δημοσιοποίηση αυτού του έργου θα μπορούσε να συμβάλλει θετικά στην επιτάχυνση των πολιτικών διεργασιών προς την κατεύθυνση μιας συνολικής περιβαλλοντικής θεσμικής μεταρρύθμισης.

4.3. Βελτίωση των μηχανισμών περιβαλλοντικής αξιολόγησης του πολεοδομικού σχεδιασμού.

Ο περιβαλλοντικός έλεγχος του πολεοδομικού σχεδιασμού παραμένει αρκετά αδύναμος σε ζητήματα αστικού κλίματος και κατανάλωσης ενέργειας. Ενώ τα Τοπικά Χωρικά Σχέδια (Τ.Χ.Σ.) που εισήγαγε ο Ν. 4269/2014 ελέγχονται από τις Σ.Μ.Π.Ε. δεν προβλέπεται κάποιος ανάλογος μηχανισμός για τα Ρυμοτομικά Σχέδια Εφαρμογής (Ρ.Σ.Ε.) που συνδέονται άμεσα με τα Τ.Χ.Σ. Δηλαδή ενώ ο μελετητής είναι επιφορτισμένος με τον έλεγχο της παραγόμενης αστικής μορφής (χάραξη ρυμοτομίας, καθορισμός χρήσεων γης και θέσπιση ειδικών όρων δόμησης) απουσιάζει κάποιο εργαλείο ελέγχου των περιβαλλοντικών επιδόσεών της.

Η καθοδήγηση των Τ.Χ.Σ. και Ρ.Σ.Ε. από κλιματικά δεδομένα και η περιβαλλοντική τους αξιολόγηση μπορεί να πραγματοποιείται στα πλαίσια των Σ.Μ.Π.Ε. που εκπονούνται παράλληλα. Εξειδικευμένες Σ.Μ.Π.Ε. θα μπορούσαν να εστιάζουν στα Ρ.Σ.Ε. ώστε να καλυφθεί το υφιστάμενο ρυθμιστικό κενό. Οι Σ.Μ.Π.Ε. θα μπορούσαν συνεπώς να αποκτήσουν ένα ουσιαστικό εξειδικευμένο ρόλο κλιματικής ανάλυσης και καθοδήγησης του πολεοδομικού σχεδιασμού. Αυτή η εξειδίκευση είναι αναγκαία για την αποφόρτιση των μελετών Τ.Χ.Σ. οι οποίες εξετάζουν ένα αρκετά ευρύ και ανομοιογενές φάσμα οικονομικών, κοινωνικών, ιδιοκτησιακών και περιβαλλοντικών παραμέτρων. Μέσω των Σ.Μ.Π.Ε. μπορεί επίσης να πραγματοποιείται η τοπική προσαρμογή των οδηγιών κλιματικού σχεδιασμού σύμφωνα με αποτελέσματα τοπικών μετρήσεων και προσομοιώσεων.

Ένα σημαντικό πρόβλημα είναι πως οι υφιστάμενες Σ.Μ.Π.Ε αντιμετωπίζουν το τοπικό κλίμα επιδερμικά, με αποτέλεσμα ζητήματα αστικού κλίματος, παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής, θερμικής άνεσης και ενεργειακής κατανάλωσης να μην εξετάζονται. Όπως προαναφέρθηκε στην προηγούμενη υποενότητα τόσο η εκπαίδευση των μηχανικών πάνω σε κλιματικά και ενεργειακά ζητήματα όσο και η τυποποίηση των μεθόδων περιβαλλοντικής ανάλυσης και αξιολόγησης του πολεοδομικού έργου μπορεί να καταπολεμήσει αυτό το πρόβλημα. Παράλληλα, η θέσπιση ενός πλαισίου περιβαλλοντικής αξιολόγησης των Τ.Χ.Σ. και των Ρ.Σ.Ε. με βαθμολογούμενα κριτήρια θα μπορούσε να προσφέρει ένα τυποποιημένο και αντικειμενικό μηχανισμό ελέγχου στα πλαίσια των Σ.Μ.Π.Ε. Η ενσωμάτωση κλιματικής και ενεργειακής ανάλυσης στις Σ.Μ.Π.Ε. μπορεί να γίνει με δύο τρόπους. Ο πρώτος θεωρεί πως η Σ.Μ.Π.Ε. εξετάζει την προμελέτη σαν εξωτερικός αξιολογητής προβαίνοντας σε παρατηρήσεις και συστάσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την οριστικοποίηση της μελέτης. Στη δεύτερη περίπτωση, η Σ.Μ.Π.Ε. ξεκινά νωρίτερα, πριν υποβληθεί η προμελέτη και δρα σαν ένας εσωτερικός αξιολογητής τροφοδοτώντας τακτικά το σχεδιασμό με επιστημονικά δεδομένα από προσομοιώσεις/ μετρήσεις ή άλλες μεθόδους. Η δεύτερη προσέγγιση είναι πιο κοντά στη λογική του συνθετικού περιβαλλοντικού σχεδιασμού και υπερτερεί έναντι της πρώτης λόγω της μεγαλύτερης αλληλεπίδρασης ανάμεσα στην ανάλυση και τον σχεδιασμό.

4.4. Ενίσχυση της τρίτης διάστασης στα Ρυμοτομικά Σχέδια Εφαρμογής.

Ένα σημαντικό εμπόδιο στην ενσωμάτωση του κλίματος στον ελληνικό πολεοδομικό σχεδιασμό είναι ο υφιστάμενος τρόπος ρύθμισης της αστικής μορφής. Το ρυμοτομικό σχέδιο καθορίζει τα βασικά οριζοντιογραφικά χαρακτηριστικά του χώρου χωρίς να τεκμηριώνονται οι σχέσεις κτιριακών όγκων και υπαίθριων χώρων που μπορούν να προκύψουν από την εφαρμογή του. Παράλληλα, η τρίτη διάσταση ρυθμίζεται κυρίως από τον ισχύοντα κανονισμό δόμησης με τρόπο γενικό και αδιαφοροποίητο για όλη τη χώρα. Στην τοπική κλίμακα οι ειδικοί όροι δόμησης τείνουν να αρκούνται στην περιγραφή των απολύτως αναγκαίων (πχ: ελάχιστο πρόσωπο και εμβαδόν οικοπέδου κατά κανόνα και παρέκκλιση, Συντελεστές Δόμησης (Σ.Δ.), Ποσοστό Κάλυψης (Π.Κ.), μέγιστο ύψος κατά τομείς). Οι περιπτώσεις όπου επιχειρήθηκε η εισαγωγή περιβαλλοντικών ειδικών όρων δόμησης είναι μάλλον περιορισμένες. Σαν πρόσφατο παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί η μελέτη της Νέας Ποντοκώμης η οποία δείχνει πως είναι εφικτή, ακόμη και υπό το ισχύον θεσμικό πλαίσιο, η πολεοδόμηση με περιβαλλοντικούς κανονιστικούς όρους δόμησης [33]. Ωστόσο η επίτευξη ενός τέτοιου αποτελέσματος είναι μάλλον αποτέλεσμα ειδικών συγκυριών, όπως η διάθεση αδόμητης δημόσιας γης και η ευαισθητοποίηση των τοπικών αρχών και των μελετητών απέναντι σε ζητήματα περιβαλλοντικού σχεδιασμού [33].

Συνεπώς είναι αναγκαία η εξεύρεση μεθόδων ρύθμισης της αστικής μορφής που να γεφυρώνουν το χάσμα ανάμεσα στον απόλυτο χαρακτήρα της ενεργού πολεοδομίας και στον ασαφή χαρακτήρα των γενικών κανονιστικών όρων δόμησης. Σχετικές έρευνες έχουν δείξει πως είναι εφικτή μια τρισδιάστατη ρύθμιση των αδρών μορφολογικών χαρακτηριστικών του αστικού χώρου με εργαλεία όπως το ιδεατό στερεό που ήδη προβλέπει ο Ν.Ο.Κ., η ηλιακή περιβάλλουσα [21] και το ενεργειακό στερεό [19]. Το ενεργειακό στερεό ειδικότερα δημιουργήθηκε με στόχο την εφαρμογή σε ολόκληρα οικοδομικά τετράγωνα, αντί σε μεμονωμένα οικόπεδα όπως οι άλλες δύο εναλλακτικές. Το ενεργειακό στερεό περιγράφει το μέγιστο όγκο ενός οικοδομικού τετραγώνου έτσι ώστε να μεγιστοποιούνται τα ωφέλιμα

χειμερινά ηλιακά κέρδη διατηρώντας παράλληλα μια αρκετά συνεκτική διάταξη των κτιρίων. Μια καινοτομία είναι ο καθορισμός των γεωμετρικών του χαρακτηριστικών με απλές ενεργειακές προσομοιώσεις και η εύκολη σχεδίασή του από προγράμματα που υποστηρίζουν άλγεβρα Boole σε στερεά. Το ενεργειακό στερεό μπορεί να προσαρμόζεται σε πολύπλοκες γεωμετρίες όπως και σε ανώμαλα εδάφη. Η ταυτόχρονη χάραξη ρυμοτομίας και ενεργειακών στερεών εξασφαλίζει την ορθή τους διαστασιολόγηση και αποτελεί προϋπόθεση για παραγωγή ενός ωφέλιμου αποτελέσματος [19]. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν το ενεργειακό στερεό ιδανικό για ενσωμάτωση στις Ρ.Σ.Ε. έτσι ώστε αυτές να αποκτήσουν ένα τρισδιάστατο και περιβαλλοντικό χαρακτήρα.

Αξίζει να σημειωθεί πως η μεγαλύτερη ελευθερία στον καθορισμό της ρυμοτομίας που απαιτεί ο κλιματικός σχεδιασμός προϋποθέτει την ύπαρξη καινοτόμων εργαλείων διαχείρισης της ιδιοκτησίας και των δικαιωμάτων δόμησης. Πιθανώς μια γενικευμένη εφαρμογή του αστικού αναδασμού σε συνδυασμό με τις αυξημένες δυνατότητες διαχείρισης της ιδιοκτησίας που αναμένεται να προσφέρει η «Τράπεζα Γης» μπορεί να επιτρέψει μια μεγαλύτερη ευελιξία στον καθορισμό της ρυμοτομίας.

4.5. Ενίσχυση του ρόλου του κλιματικού σχεδιασμού στα πλαίσια του Ν.Ο.Κ.

Ο Ν.Ο.Κ., ο οποίος εισάχθηκε το 2012, επιδίωξε την ενίσχυση της περιβαλλοντικής του διάστασης σε σχέση με τους προηγούμενους Γενικούς Οικοδομικούς Κανονισμούς (Γ.Ο.Κ.). Ο Ν.Ο.Κ. εισήγαγε νέους ορισμούς που αφορούν τα κτίρια χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας, τα υπόσκαφα κτίρια και τα φυτεμένα δώματα. Παράλληλα πρόσφερε μια σειρά από περιβαλλοντικά κίνητρα, περιόρισε τις παρεμβάσεις στο τοπογραφικό ανάγλυφο και παρείχε ευνοϊκές διατάξεις για κατασκευές που βελτιώνουν τη βιοκλιματική συμπεριφορά των κτιρίων.

Σε γενικές γραμμές οι όροι δόμησης που περιγράφει ο Ν.Ο.Κ. ακολουθούν τη λογική των προκατόχων του, επιχειρώντας να ρυθμίσουν τη δόμηση στην κλίμακα του οικοπέδου με μια σειρά από δείκτες όπως ο Σ.Δ., το Π.Κ., ο Συντελεστής Όγκου (Σ.Ο.), οι ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των κτιρίων, το μέγιστο κτιριακό ύψος και το ιδεατό στερεό. Η αναλυτική τους περιγραφή ξεπερνά τα όρια αυτής της μελέτης. Ωστόσο, μια βασική παρατήρηση είναι πως ο ρόλος του Σ.Δ. στο Ν.Ο.Κ. είναι σημαντικά ενισχυμένος σε σχέση με τους υπόλοιπους όρους δόμησης καθώς πολλές απαγορεύσεις, εξαιρέσεις και κίνητρα συνδέονται άμεσα με αυτόν. Ο Ν.1337/1983 όρισε ένα μέγιστο Σ.Δ. ίσο με 0.8, ο οποίος αρχικά θα μπορούσε να θεωρηθεί αρκετά μικρός για την επίτευξη αστικής συνεκτικότητας. Ωστόσο, οι πολλαπλές εξαιρέσεις που περιγράφει ο Ν.Ο.Κ. οδηγούν στη δόμηση κτιρίων με αρκετά μεγαλύτερο όγκο και ύψος από αυτό που θεωρητικά θα πρόκυπτε αν τηρούνταν το μέγιστο όριο. Οι παράνομες υπερβάσεις του Σ.Δ. (πχ: κλείσιμο ημιυπαίθριων χώρων) αυξάνουν ακόμη περισσότερο τον κτιριακό όγκο. Η λύση του προβλήματος δεν έγκειται στην περεταίρω ελάττωση του Σ.Δ. αλλά στην απεξάρτηση της ρύθμισης του κτιριακού όγκου από ένα γενικό συντελεστή.

Ο Ν.Ο.Κ. επιβραβεύει κτίρια που κατατάσσονται στην ανώτερη ενεργειακή κατηγορία Α+ του Κ.Εν.Α.Κ. με αύξηση Συντελεστή Δόμησης (Σ.Δ.) κατά 5%, ενώ για κτίρια εξαιρετικής περιβαλλοντικής απόδοσης στα πρότυπα του Αμερικάνικου LEED [34] ο Σ.Δ. αυξάνεται κατά 10%. Μια άλλη κατηγορία κινήτρων επιδιώκει την ελάττωση της κάλυψης των οικοπέδων και την απόδοση ιδιωτικών υπαίθριων χώρων σε κοινή χρήση με ανάλογη αύξηση του ύψους των κτιρίων και του Σ.Δ. Ο Κανονισμός αφενός δεν προβλέπει μηχανισμούς για την περιβαλλοντική αναβάθμιση αυτών των υπαίθριων χώρων και αφετέρου δεν τεκμηριώνει τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν από την αύξηση του κτιριακού όγκου και την ελάττωση της κάλυψης. Ο Σύλλογος Αρχιτεκτόνων Διπλωματούχων Ανωτάτων Σχολών (ΣΑΔΑΣ, 2012) διαπίστωσε με απλούς υπολογισμούς πως τα κίνητρα επιβραβεύουν με σημαντική αύξηση του Σ.Δ. μεγάλα οικόπεδα που βρίσκονται σε περιοχές με ήδη μεγάλους Σ.Δ. εάν αυτά υπαχθούν στις σχετικές διατάξεις. Η αποτυχία παρόμοιων κινήτρων να δημιουργήσουν λειτουργικούς και φιλόξενους υπαίθριους χώρους στη Νέα Υόρκη έχει τεκμηριωθεί ήδη από το 1980 [35]. Αυτό αποτελεί μια ισχυρή ένδειξη πως τα περιβαλλοντικά κίνητρα του Ν.Ο.Κ. μπορεί να έχουν μια ανάλογη κατάληξη αν δε συνδυαστούν με κάποια επιστημονικά τεκμηριωμένη μέθοδο διασφάλισης της ποιότητας του παραγόμενου αστικού τοπίου.

Ένα ακόμη σημαντικό σημείο του Ν.Ο.Κ. είναι η διάκριση ανάμεσα στα βιοκλιματικά κτίρια και στα κτίρια χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας. Ενώ αναγνωρίζεται πως ο βιοκλιματικός σχεδιασμός συνεισφέρει στην επίτευξη χαμηλών ενεργειακών καταναλώσεων, ελάχιστες διατάξεις του Ν.Ο.Κ. είναι σχετικές με αυτόν. Αντίθετα, ο ορισμός των κτιρίων χαμηλής κατανάλωσης συνδέεται ουσιαστικά με τον Κ.Εν.Α.Κ. και με την πολιτικής της Ε.Ε. για τα Ν.Ζ.Ε.Β. Το αποτέλεσμα είναι ο βιοκλιματικός σχεδιασμός να διατηρεί έναν προαιρετικό χαρακτήρα, ενώ τυποποιημένες και βιομηχανοποιημένες λύσεις να προτιμώνται και τελικά να επιβάλλονται μέσω της συμμόρφωσης με τον Κ.Εν.Α.Κ. (πχ: επαρκής θερμομόνωση, κουφώματα υψηλής τεχνολογίας, προηγμένος ηλεκτρομηχανολογικός (Η/Μ) εξοπλισμός). Οι λύσεις υψηλής τεχνολογίας, παρά τα σημαντικά τους πλεονεκτήματα, αυξάνουν το

κόστος της κατασκευής και η αποτελεσματικότητά τους μπορεί να περιοριστεί σημαντικά αν δεν προηγείται μια κλιματική βελτιστοποίηση του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού.

Έχει ήδη προαναφερθεί πως ο κλιματικός αρχιτεκτονικός σχεδιασμός ρυθμίζεται δυσκολότερα μέσα από γενικούς κανονισμούς όπως ο Ν.Ο.Κ. οι οποίοι καταλήγουν συχνά να διογκώνονται από διευκρινίσεις, εξαιρέσεις και προσθήκες. Αντίθετα, ο Ν.Ο.Κ., διατηρώντας το γενικό του χαρακτήρα, θα μπορούσε να συγκροτείται από ένα σύνολο από ορισμούς, κανονισμούς, προδιαγραφές, κίνητρα και λοιπούς μηχανισμούς ρύθμισης της δόμησης το οποίο θα αποτελεί πρότυπο για τη σύνταξη ειδικών όρων δόμησης για κάθε τόπο. Μια τέτοια προσέγγιση βρίσκεται κοντά στη λογική του «Έξυπνου Κώδικα» (SmartCode) που προωθείται τα τελευταία χρόνια στις Η.Π.Α. στα πλαίσια του κινήματος «New Urbanism» [36]. Σε αυτά τα πλαίσια θα μπορούσε να ενισχυθεί ουσιαστικά ο ρόλος του βιοκλιματικού σχεδιασμού στο Ν.Ο.Κ. αποφεύγοντας παράλληλα τους περιορισμούς ενός γενικού κανονισμού.

4.6. Αναθεώρηση του Κ.Εν.Α.Κ. έτσι ώστε να ρυθμίζει αποτελεσματικά το βιοκλιματικό σχεδιασμό.

Ο Κ.Εν.Α.Κ. [37] είναι ένα επιπλέον σημαντικό νομοθέτημα που ρυθμίζει τη δόμηση. Το 2010 αντικατέστησε, στα πλαίσια της συμμόρφωσης της Ελλάδας με την ενεργειακή πολιτική της Ε.Ε., τον κανονισμό θερμομόνωσης κτιρίων που ίσχυε από το 1979. Ο Κ.Εν.Α.Κ. καθορίζει (i) τη μεθοδολογία υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης και ενεργειακής κατάταξης των κτιρίων, (ii) τις προδιαγραφές της κατασκευής των κτιρίων και των Η/Μ εγκαταστάσεων, (iii) τις διαδικασίες των ενεργειακών επιθεωρήσεων των κτιρίων και μηχανολογικών εγκαταστάσεων θέρμανσης, ψύξης και αερισμού και (iv) το περιεχόμενο της Μελέτης Ενεργειακής Απόδοσης (Μ.Ε.Α.) και του Πιστοποιητικού Ενεργειακής Απόδοσης (Π.Ε.Α.) για κτίρια.

Μια σημαντική παρατήρηση είναι πως βασικές αρχές του βιοκλιματικού σχεδιασμού απουσιάζουν τόσο από τον Κ.Εν.Α.Κ. όσο και από τις σχετικές επίσημες οδηγίες που τον συνοδεύουν. Η τεκμηρίωση του βιοκλιματικού σχεδιασμού σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. οφείλει να πραγματοποιείται στη σχετική Μ.Ε.Α. Χωρίς όμως επίσημες οδηγίες και σχετικούς μηχανισμούς αξιολόγησης της εφαρμογής τους, ο βιοκλιματικός σχεδιασμός διαθέτει σήμερα μια πρακτικά συμβολική αξία στα πλαίσια των Μ.Ε.Α. Για αυτό το λόγο προτείνεται, παράλληλα με τη συγγραφή, επισημοποίηση και τακτική ενημέρωση των σχετικών οδηγιών, η μετατροπή της Μ.Ε.Α. που προβλέπει ο Κ.Εν.Α.Κ. σε «Μελέτη Βιοκλιματικού Σχεδιασμού και Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίου». Ο έλεγχος των οδηγιών βιοκλιματικού αρχιτεκτονικού σχεδιασμού θα μπορούσε να τεκμηριώνεται σε σχετικό τεύχος που περιέχεται στο φάκελο της πολεοδομικής άδειας. Η μελέτη θα μπορούσε να περιέχει τα αποτελέσματα από προσομοιώσεις σκιασμού / ηλιασμού και φυσικού φωτισμού, κίνησης αέρα, θερμικής άνεσης και κατανάλωσης ενέργειας. Ένα σύστημα βαθμολόγησης θα μπορούσε να χρησιμοποιείται για να αξιολογεί με τυποποιημένο και αντικειμενικό τρόπο την αποτελεσματικότητα του βιοκλιματικού σχεδιασμού.

Μια επιπλέον σημαντική αδυναμία του Κ.Εν.Α.Κ. είναι η χρήση του κτιρίου αναφοράς στη μεθοδολογία ενεργειακής κατάταξης των κτιρίων. Το κτίριο αναφοράς είναι ένα ιδεατό κτίριο που έχει την ίδια αρχιτεκτονική διαμόρφωση με το πραγματικό ή υπό μελέτη κτίριο αλλά έχει προδιαγεγραμμένα Η/Μ συστήματα, δομικά χαρακτηριστικά και συγκεκριμένη χρήση από ανθρώπους. Η σύγκριση ενός πραγματικού κτιρίου με το αντίστοιχο κτίριο αναφοράς επιτρέπει την ενεργειακή του κατάταξη. Το βασικό πρόβλημα είναι ότι με αυτό το τρόπο απαλείφεται σχεδόν εξολοκλήρου η παράμετρος της κτιριακής και αστικής μορφής καθώς το κτίριο συγκρίνεται με τον ιδεατό εαυτό του που έχει τα θεωρητικά βέλτιστα κουφώματα, μονώσεις και Η/Μ συστήματα. Δηλαδή, κτίρια ή σύνολα κτιρίων που επιτυγχάνουν χαμηλές ή σχεδόν μηδενικές ενεργειακές καταναλώσεις μέσω του βιοκλιματικού σχεδιασμού, χωρίς απαραίτητα να συμμορφώνονται με τις υποδείξεις του Κ.Εν.Α.Κ. κατατάσσονται αυτόματα σε πολύ χαμηλές ενεργειακές κλάσεις [38,39]. Για αυτό το λόγο προτείνεται η υιοθέτηση διαφορετικής μεθοδολογίας ενεργειακής κατάταξης χωρίς τη χρήση κτιρίου αναφοράς, ώστε να είναι δυνατή μια περισσότερο αντικειμενική αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία επιχείρησε να εντοπίσει τα εμπόδια που προβάλλονται αλλά και τις δυνατότητες που προσφέρονται για την ενσωμάτωση του κλίματος στον ελληνικό πολεοδομικό σχεδιασμό. Αναλύοντας τη σχετική νομοθεσία φάνηκε πως η ένταξη του κλίματος στην ελληνική πολεοδομία είναι εφικτή στα πλαίσια μιας ολοκληρωμένης περιβαλλοντικής μεταρρύθμισης του θεσμικού πλαισίου που ρυθμίζει τη αστική ανάπτυξη και τη δόμηση. Στα πλαίσια ενός ολοκληρωμένου περιβαλλοντικού

«χάρτη-οδηγού» για τις ελληνικές πόλεις θα μπορούσε να προβλέπεται η παραγωγή επίσημων οδηγιών κλιματικού σχεδιασμού για αστικές και κτιριακές κλίμακες, η βελτίωση των μηχανισμών περιβαλλοντικής αξιολόγησης των πολεοδομικών και αρχιτεκτονικών μελετών, η ενίσχυση της τρίτης διάστασης στα Ρ.Σ.Ε., όπως και του βιοκλιματικού αρχιτεκτονικού σχεδιασμού στο Ν.Ο.Κ. και στον Κ.Εν.Α.Κ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Hodson, M., και Marvin, S., 2010, 'Urbanism in the anthropocene: Ecological urbanism or premium ecological enclaves?', City, **14**(3), σσ 298–313.

[2] EEA, 2017, Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016 An indicator-based report, Publications Office of the European Union, Luxembourg.

[3] IEA, 2013, World Energy Outlook 2008, IEA Publishing, Paris.

[4] Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., και Pout, C., 2008, 'A review on buildings energy consumption information', Energy Build., **40**(3), σσ 394–398.

[5] Rizwan, A. M., Dennis, L. Y. C. C., και Liu, C., 2008, 'A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island', J. Environ. Sci., **20**(1), σσ 120–128.

[6] ΥΠΕΚΑ, 2010, 'Εξοικονόμηση ενέργειας στα κτήρια' [Online]. Available: http://exoikonomisi.ypeka.gr/. [Πρόσβαση: 02-Ιανουαρίου-2018].

[7] European Commission, 1999, A Green Vitruvius: Principles and Practice of Sustainable Architectural Design, Earthscan.

[8] Ko, Y., 2013, 'Urban Form and Residential Energy Use: A Review of Design Principles and Research Findings', J. Plan. Lit., **28**(4), σσ 327–351.

[9] Αθανασίου, Ε., 2015, Πόλη + Φύση: Θεωρήσεις της φύσης στον πολεοδομικό σχεδιασμό, Σύνδεσμος Ελλήνων Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Αθήνα.

[10] Haapio, A., 2012, 'Towards sustainable urban communities', Environ. Impact Assess. Rev., **32**(1), σσ 165–169.

[11] Ryser, L., και Halseth, G., 2008, 'Institutional barriers to incorporating climate responsive design in commercial redevelopment', Environ. Plan. B Plan. Des., **35**(1), σσ 34–55.

[12] Lynch, K., 1984, Good city form, MIT Press, Cambridge, MA.

[13] Meerow, S., Newell, J. P., και Stults, M., 2016, 'Defining urban resilience: A review', Landsc. Urban Plan., **147**, σσ 38–49.

[14] Vartholomaios, A., 2015, 'Climatic urban design strategies for the Mediterranean', Proceedings of the International Conference on Changing Cities II, A. Gospodini, επιμ., Grafima, Porto Heli.

[15] Βαρθολομαίος, Α., 2016, 'Περιβαλλοντικός αστικός σχεδιασμός ελληνικών πόλεων με κλιματικά κριτήρια', Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

[16] Mills, G., 2006, 'Progress toward sustainable settlements: A role for urban climatology', Theor. Appl. Climatol., **84**(1–3), σσ 69–76.

[17] Oke, T. R. R., 1984, 'Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning', Energy Build., **7**(1), σσ 1–10.

[18] Vartholomaios, A., 2017, 'A parametric sensitivity analysis of the influence of urban form on domestic energy consumption for heating and cooling in a Mediterranean city', Sustain. Cities Soc., **28**, σσ 135–145.

[19] Vartholomaios, A., 2015, 'The Residential Solar Block envelope: A method for enabling the development of compact urban blocks with high passive solar potential', Energy Build., **99**, σσ 303–312.

[20] Nonni, E., και Laghi, S., 2008, Un eco quartiere mediterraneo Il quartlere resIdenzIale s.Rocco a Faenza, Faenza.

[21] Knowles, R. L., 2003, 'The solar envelope : its meaning for energy and buildings', Energy, **35**,

σσ 15–25.

[22] Vartholomaios, A., Kalogirou, N., Athanassiou, E., και Papadopoulou, M., 2013, 'The green space factor as a tool for regulating the urban microclimate in vegetation-deprived Greek cities.', Proceedings of the International Conference on "Changing Cities": Spatial, morphological, formal & socio-economic dimensions, Γράφημα, Σκιάθος.

[23] Getimis, P., και Giannakourou, G., 2014, 'The evolution of spatial planning in Greece after the 1990s: Drivers, directions and agents of change', Spatial Planning Systems and Practices in Europe. A Comparative Perspective on Continuity and Changes, M. Reimer, και P. Getimis, επιμ., Routledge, London.

[24] Καρνάβου, Ε., 1995, Η άνοδος και η πτώση των ελληνικών πολεοδομικών μεταρρυθμίσεων, Θεσσαλονίκη.

[25] ΙΤΑ, 2006, Πολεοδομικός σχεδιασμός: Προβλήματα εφαρμογής και προτάσεις μεταρρύθμισης Έκθεση επιστημονικής επιτροπής, Αθήνα.

[26] Ιωάννου, Β., και Σερράος, Κ., 2007, 'Το παρόν και το μέλλον του ελληνικού αστικού τοπίου', αειχώρος, **6**(1), σσ 86–99.

[27] Γιαννακού, Α., Έππας, Δ., Ζέκα, Δ., και Τασοπούλου, Α., 2010, 'Μετασχηματισμοί του αστικού χώρου και πολεοδομικός σχεδιασμός μετά από μια μεταρρύθμιση: η περίπτωση των δήμων Καλαμαριάς και Πολίχνης', Πρακτικά του 9ου Πανελλήνιου Γεωγραφικού Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωγραφικής Εταιρείας, Αθήνα.

[28] Τασοπούλου, Α., 2012, 'Το ελληνικό σύστημα του πολεοδομικού σχεδιασμού και το Γενικό Πολεοδομικό Σχέδιο', Παρουσίαση στο Σεμινάριο ΤΕΕ-ΤΚΜ «Πολεοδομικός Σχεδιασμός και η Βιώσιμη Ανάπτυξη: Θεωρία, Πολιτικές και Πρακτικές, Θεσσαλονίκη.

[29] Kyvelou, S., Sapounaki-Dracaki, L., Sinou, M., και Papadopoulos, A., 2011, 'Planning and building a South-European eco-neighborhood: From concepts and strategies to practices and assessment tools', Επιθεώρηση αποκέντρωσης τοπικής αυτοδικοίκησης και περιφερειακής ανάπτυξης, **7**(66).

[30] Mostapha Sadeghipour Roudsari, Michelle Pak, Smith, A., Sadeghipour Roudsari, M., και Pak, M., 2013, 'Ladybug: a Parametric Environmental Plugin for Grasshopper To Help Designers Create an Environmentally-Conscious Design', 13th Conference of International building Performance Simulation Association, Lyon, σσ 3129–3135.

[31] Lindberg, F., Grimmond, S., Onomura, S., και Jarvi, L., 2015, 'UMEP - An integrated tool for urban climatology and climate sensitive planning applications', Proceedings of ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate and 12th Symposium on the Urban Environment, Toulouse.

[32] Alexander, C., Ishikawa, S., και Silverstein, M., 1977, A Pattern Language: Towns, Buildings, Construction, Oxford University Press, Oxford.

[33] Μητσιάκου, Ε., Μιλτιάδου, Σ., Αθανασίου, Ε., και Κομνηνός, Ν., 2010, 'Οικο-πολεοδομία σχεδιάζοντας τη Νεα Ποντοκόμη (περίληψη διπλωματικής)', Τεχνικά Χρονικά, (Μάρτιος-Απρίλιος), σσ 155–207.

[34] USGBC, 2018, 'LEED' [Online]. Available: https://new.usgbc.org/leed. [Πρόσβαση: 02-Ιανουαρίου-2018].

[35] Whyte, W. ., 2001, The Social Life of Small Urban Spaces, Project for Public Spaces.

[36] Center for Applied Transect Studies, 'SmartCode Central' [Online]. Available: http://www.smartcodecentral.com/. [Πρόσβαση: 15-Μαΐου-2015].

[37] Εφημερίς της Κυβερνήσεως, 2010, Κανονισμός ενεργειακής απόδοσης κτιρίων, Αθήνα.

[38] Γεωργιάδου, Έ., 2012, 'Σχόλιο του χρήστη Έλλη Γεωργιάδου - Ανέλιξη', Δημόσια Διαβούλευση επί σχεδίου νόμου «Νέος Οικοδομικός Κανονισμός» [Online]. Available: http://www.opengov.gr/minenv/?c=12754. [Πρόσβαση: 15-Μαΐου-2015].

[39] Βαφειάδου, Ε., και Ζαχαρία, Α., 2011, 'Πόσο φιλικός προς το περιβάλλον είναι ο ΚΕΝΑΚ';

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΕΣΜΕΥΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΑΕΠ ΤΩΝ ΚΛΑΣΙΚΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΕ ΣΤΗΝ ΕΕ15

Μαρία Μπριλάκη, Γεωργία Γεμενετζή, Λεωνίδας Βατικιώτης, Ευθύμιος Ζέρβας*

Εργαστήριο Τεχνολογίας και Πολιτικής Ενέργειας και Περιβάλλοντος,
Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας,
Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο
Πάροδος Αριστοτέλους 18, 26335 Πάτρα
mail: zervas@eap.gr, phone: +30 2610 367 566

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αποδέσμευση της κατανάλωσης ενέργειας από την οικονομική ανάπτυξη είναι μία από τις βασικές αρχές της βιωσιμότητας. Επιπλέον, η μεταφορά της παραγωγής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα στις ΑΠΕ μπορεί επίσης να έχει θετικές επιπτώσεις στην κλιματική αλλαγή, χωρίς να επηρεαστεί η συνολική κατανάλωση ενέργειας. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται αρχικά η χρονική ανάλυση της συνολικής κατανάλωσης της ενέργειας στις 15 χώρες της ΕΕ15 από την αρχή καταγραφής των ενεργειακών ισοζυγίων έως σήμερα (1960-2014) και η σύγκριση των χωρών μεταξύ τους. Στη συνέχεια αναλύεται η αποδέσμευση της συνολικής παραγωγής ενέργειας από το ΑΕΠ και συγκρίνεται η αποδέσμευση των κλασσικών μορφών ενέργειας και των ΑΠΕ. Διερευνάται σε ποιες χώρες έχει επιτευχθεί μία αποδέσμευση από τις κλασσικές μορφές ενέργειας και έχει γίνει μία στροφής τις ΑΠΕ και σε ποιες όχι.

Λέξεις Κλειδιά: ΑΠΕ, κλασσικές μορφές ενέργειας, αποδέσμευση, ΕΕ15

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει θέσει στόχους για την ενέργεια και την εκπομπή των αερίων θερμοκηπίου για τα επόμενα χρόνια με ορόσημα έτη τα 2020, 2030 και 2050. Οι στόχοι για το 2020 αφορούν σε: 20% μείωση των αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, με περαιτέρω μείωση 40% για το 2030 και προοπτική για 80-95% το 2050. Επιπλέον, 20% της ενέργειας της ΕΕ θα πρέπει να προέρχεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) το 2020, και το ποσοστό αυτό οποία θα πρέπει να προσεγγίσει το 27% το έτος 2030, και επιπλέον 20% βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης με επερχόμενη αύξηση στο 27-30% το 2030. Ως επιπλέον στόχος για το 2030 έχει τεθεί η επίτευξη σε ποσοστό 15%, της ηλεκτρικής διασύνδεσης της ΕΕ (δηλ. 15% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται στην ΕΕ να μπορεί να μεταφερθεί σε άλλες χώρες της ΕΕ) ([1], [2], [4]).

Σκοπός των περιβαλλοντικών στόχων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο πεδίο είναι η μείωση της κλιματικής αλλαγής και η ενεργειακή ασφάλεια της ΕΕ μέσω μιας βιώσιμης και σταθερής ανάπτυξης. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μειώνοντας την ενεργειακή ζήτηση είτε χρησιμοποιώντας την ενέργεια με πιο αποτελεσματικό τρόπο, είτε με συνδυασμό και των δύο, χωρίς όμως αυτό να επηρεάσει την ανάπτυξη και σταθερότητα από οικονομικής απόψεως. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της *αποδέσμευσης* της ενέργειας από την οικονομική ανάπτυξη των χωρών.

Στη συνέχεια, και προκειμένου να ελέγξουμε την μέχρι σήμερα πρόοδο, γίνεται ανάλυση της τάσης των μεταβολών της ενεργειακής κατανάλωσης σε σχέση με τις μεταβολές της οικονομικής ανάπτυξης (σε οικονομικές μονάδες ΑΕΠ) των 15 χωρών της ΕΕ16 και διερευνάται η ύπαρξη αποδέσμευσης της ενέργειας από το ΑΕΠ. Με την παρούσα έρευνα προσπαθούμε να καλύψουμε όλο το φάσμα χρονολογικά και να παρουσιάσουμε ένα σφαιρικό πλαίσιο όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας στην ΕΕ.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Πηγές και δεδομένα

Η παρούσα ανάλυση χρησιμοποιεί ως δεδομένα τα ενεργειακά ισοζύγια των επιλεγμένων χωρών για την χρονική περίοδο 1960-2014 όπως έχουν δημοσιευτεί από την στατιστική βάση δεδομένων του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας / International Energy Agency ([5]) με έτος έκδοσης 2016 για τις χώρες που συμπεριλαμβάνονται στον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης / Organization for Economic Co-Operation and Development ([6]). Η κατανάλωση ενέργειας εκφράζεται σε ktoe (kilotonne of oil equivalent) ([5]). Για τον οικονομικό δείκτη λαμβάνεται το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ) / Gross Domestic Product (GDP) εκφρασμένο σε δις δολάρια ΗΠΑ με σημείο αναφοράς το έτος 2010 χρησιμοποιώντας συναλλαγματικές ισοτιμίες (billion 2010 USD using exchange rates). Τα δεδομένα για το ΑΕΠ λήφθηκαν επίσης από τις στατιστικές βάσεις δεδομένων του IEA. Τα δεδομένα για τον πληθυσμό των χωρών λήφθηκαν από την βάση δεδομένων World Development Indicators της The World Bank ([7]).

2.2. Ενεργειακή Ένταση

Ενεργειακή ένταση είναι η σχέση μεταξύ της Ακαθάριστης Εγχώριας Κατανάλωσης Ενέργειας και του ΑΕΠ υπολογιζόμενη για έναν ημερολογιακό έτος. Η Ακαθάριστη Εγχώρια Κατανάλωση Ενέργειας υπολογίζεται ως το άθροισμα της ακαθάριστης εγχώριας κατανάλωσης των πέντε πηγών ενέργειας: στερεά καύσιμα, πετρέλαιο, αέριο, πυρηνική ενέργεια και ανανεώσιμες πηγές. Για την παρακολούθηση των τάσεων, χρησιμοποιούνται σταθερές τιμές του ΑΕΠ ώστε να αποφευχθούν οι επιπτώσεις του πληθωρισμού ([3]). Στην παρούσα ανάλυση ως χρόνος αναφοράς λαμβάνεται το 2010.

2.3. Αποδέσμευση / Decoupling

Σύμφωνα με τον OECD ([6]), ο όρος *decoupling* αναφέρεται στο σπάσιμο του συνδέσμου μεταξύ των “περιβαλλοντικών κακών” και των “οικονομικών καλών”. Με τον δείκτη *decoupling* μετράται η *αποδέσμευση* της περιβαλλοντικής έντασης από την οικονομική ανάπτυξη για μια δεδομένη περίοδο και αποτελεί έναν από τους κύριους στόχους της περιβαλλοντικής στρατηγικής προκειμένου να επιτευχθεί βιώσιμη ανάπτυξη. *Αποδέσμευση* συμβαίνει όταν ο ρυθμός ανάπτυξης μιας περιβαλλοντικής έντασης, στην προκειμένη περίπτωση της τελικής συνολικής κατανάλωσης ενέργειας (TFC), είναι μικρότερος από τον ρυθμό ανάπτυξης της κινητήριας οικονομικής δύναμης η οποία, για

την συγκεκριμένη ανάλυση ορίζεται το ΑΕΠ των χωρών. Η αποδέσμευση μπορεί να χαρακτηριστεί «απόλυτη» ή «σχετική» ([6]). «Απόλυτη» αποδέσμευση έχουμε όταν η περιβαλλοντική μεταβλητή είναι σταθερή ή μειώνεται, ενώ η οικονομική κινητήρια δύναμη αυξάνεται. «Σχετική» αποδέσμευση έχουμε όταν ο ρυθμός ανάπτυξης της σχετικής περιβαλλοντικής μεταβλητής είναι θετικός, αλλά μικρότερος από τον ρυθμό ανάπτυξης της οικονομικής κινητήριας δύναμης.

2.4. Κυλιόμενος μέσος όρος 10 ετών

Κατά τις αναλύσεις των μεταβολών των καταναλώσεων των χωρών στον χρόνο βρέθηκαν ακραίες τιμές οι οποίες απέκλιναν κατά πολύ σε σχέση με τις υπόλοιπες χρονικές μεταβολές. Αρκετές επισημάνσεις δίνονται στο σύγγραμμα τεκμηρίωσης των στατιστικών του IEA οι οποίες βοηθούν στην κατανόηση των ακραίων αυτών τιμών ([5]). Επίσης, επειδή η αποδέσμευση χρησιμοποιεί διαφορές, οι μεταβολές της στο χρόνο παρουσιάζουν μεγάλες αυξομειώσεις και δεν είναι εύκολο να βρεθεί η τάση. Για να επιτευχθεί μία ομαλή κατανομή των μεταβολών στον χρόνο αφαιρέθηκαν οι ακραίες τιμές και λήφθηκε ο κυλιόμενος μέσος όρος 10 ετών (10 years moving average, μετά από δοκιμές με χρονικά εύρη 3, 5 ή 7 ετών).

2.5. Διευκρινήσεις – Επεξηγήσεις

Στην κατηγορία Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εκτός από τις ΑΠΕ συμπεριλαμβάνονται το Βιοαέριο, τα Υγρά Βιοκαύσιμα καθώς και η ενέργεια που προέρχεται από Απόβλητα. Τα Υγρά Βιοκαύσιμα περιλαμβάνουν την Βιοβενζίνη και το Βιοντίζελ. Τα Απόβλητα περιλαμβάνουν την Στερεή Βιομάζα και τα Αστικά Απόβλητα τα οποία αναλύονται χωριστά. Η Υδροηλεκτρική Ενέργεια και η Αιολική Ενέργεια συμπεριλαμβάνονται στον ηλεκτρισμό και δεν έχουν διαχωριστεί ως κατηγορίες.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Χρονική Ανάλυση Κατανάλωσης

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα, σε μορφή διαγραμμάτων, που προέκυψαν από την επεξεργασία των ενεργειακών ισοζυγίων κατά την χρονική ανάλυση της κατανάλωσης των ενεργειακών προϊόντων στις 15 χώρες της ΕΕ. Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της Συνολικής Τελικής Κατανάλωσης στην ΕΕ15 και της κατανάλωσης των ενεργειακών προϊόντων των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε σύγκριση με αυτά των συμβατικών μορφών ενέργειας και στην συνέχεια γίνεται παρουσίαση μόνο των ΑΠΕ ανά χώρα και Ενεργειακή Ροή για το σύνολο της ΕΕ15 και ανά κάτοικο.

3.1.1. Συνολική Τελική Κατανάλωση στην ΕΕ15

Η Συνολική Τελική Κατανάλωση, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 1, παρουσιάζει αύξηση κατά την διάρκεια των ετών, με μία σχετική πτώση την διετία 1981-1982, η οποία όμως δεν εμπόδισε την αυξητική της πορεία στην συνέχεια. Από το 2005 και μετά διακρίνεται συνεχιζόμενη πτωτική τάση χωρίς ωστόσο αυτή να οφείλεται σε πτώση του ΑΕΠ της ΕΕ15, το οποίο, με εξαίρεση το έτος 2009, έχει σταθερή άνοδο (Σχήμα 1α, γ). αλλά ούτε του μεγέθους του πληθυσμού ο οποίος αυξάνει και αυτός σταθερά (Σχήμα 1β, γ). Από τους ρυθμούς ανάπτυξης των υπό μελέτη συγκρινόμενων παραγόντων διαπιστώνεται ότι ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας επηρεάζεται κυρίως από τον ρυθμό της κατανάλωσης ανά κάτοικο. Ο δείκτης ΣΤΚ/Πληθυσμό συνδέεται άμεσα με τα εισοδηματικά κριτήρια των κατοίκων επομένως αναμένεται να υπάρχει σχετική επιρροή από την οικονομική κινητήρια δύναμη που είναι το ΑΕΠ. Εντούτοις φαίνεται να υπάρχει μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης με παράλληλη οικονομική ανάπτυξη.

3.1.2. Τελική Κατανάλωση ανά κατηγορία Ενεργειακών Προϊόντων στην ΕΕ15

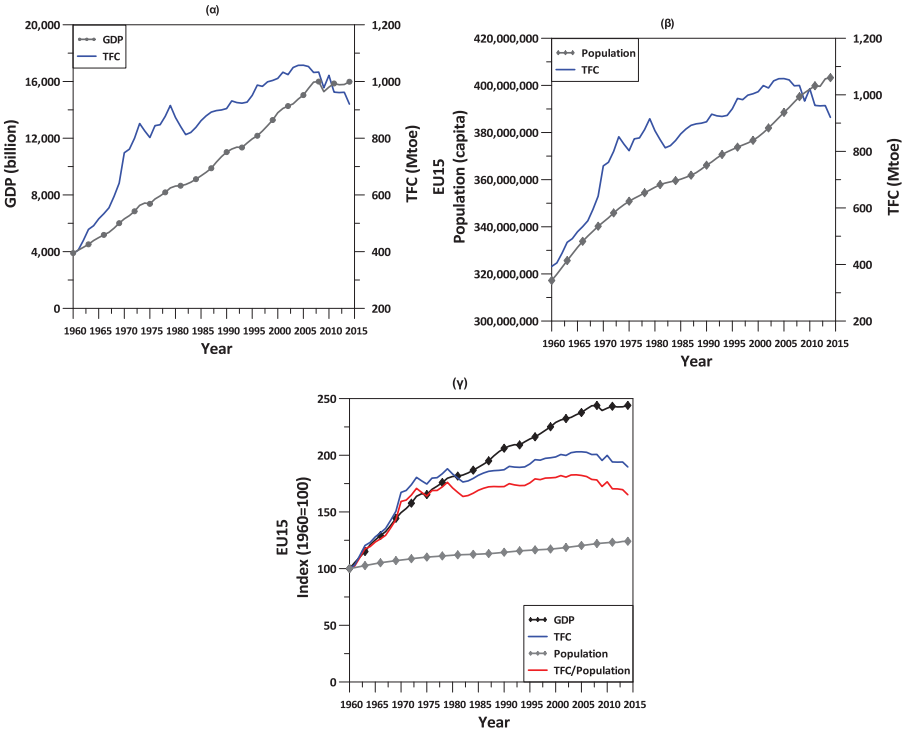
Στο Σχήμα 2 εμφανίζονται τα αποτελέσματα ανά κατηγορία Ενεργειακών Προϊόντων σε σχέση με το ΑΕΠ της ΕΕ15 (Σχήμα 2α), ανά τον πληθυσμό στο σύνολο της ΕΕ15 (Σχήμα 2β) και ο ρυθμός μεταβολής (ανάπτυξης) των προϊόντων και του ΑΕΠ (Σχήμα 2γ).

Παρατηρείται μείωση της κατανάλωσης των προϊόντων των συμβατικών μορφών ενέργειας κατά την τελευταία δεκαπενταετία με ταυτόχρονη αύξηση της κατανάλωσης των ΑΠΕ. Αν και ο ρυθμός ανάπτυξης του ΑΕΠ παραμένει ανοδικός, ο ρυθμός κατανάλωσης των προϊόντων έχει πτωτική τάση, με εξαίρεση τις ΑΠΕ στις οποίες ο ρυθμός ανάπτυξής τους είναι έντονα ανοδικός. Διαπιστώνεται λοιπόν στροφή στον τρόπο παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας από τις παραδοσιακές μορφές ενέργειας προς τις ΑΠΕ, με την μεγαλύτερη πτώση να εντοπίζεται στην κατανάλωση του πετρελαίου.

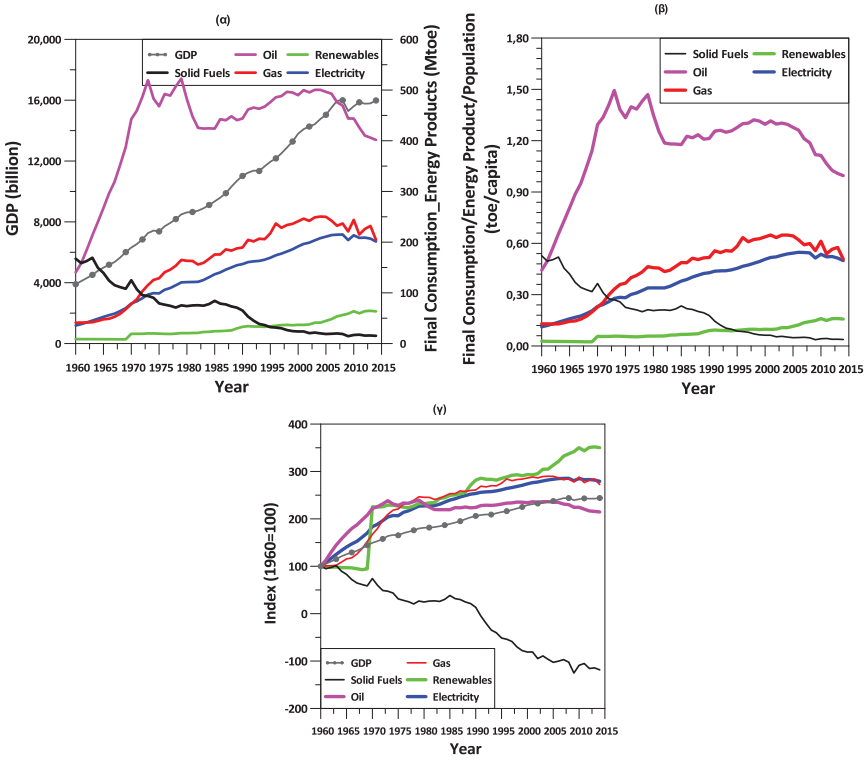
3.1.3. Τελική Κατανάλωση ΑΠΕ ανά Χώρα

Κατά την ανάλυση των ενεργειακών ισοζυγίων ανά χώρα διαπιστώθηκε ότι μόνο τέσσερις (Φινλανδία, Σουηδία, Αυστρία και Πορτογαλία) από τις δεκαπέντε χώρες της ΕΕ που μελετήθηκαν είχαν εντάξει στο δυναμικό τους την κατανάλωση ενεργειακών προϊόντων από ΑΠΕ. Στις υπόλοιπες χώρες η ένταξη έγινε σταδιακά, ωστόσο μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1990 παρατηρείται, σε όλες τις χώρες, σχετική κατανάλωση προϊόντων ΑΠΕ (Σχήμα 3 & Σχήμα 4). Σε αυτές τις χώρες διακρίνεται και η μεγαλύτερη, μέχρι το 2014 (έτος τελευταίας καταγραφής), κατανάλωση σε σχέση με το μέγεθος του πληθυσμού (Σχήμα 4). Ικανοποιητική κατανάλωση ΑΠΕ παρατηρείται και στην Ελλάδα με μέγεθος 0,123 toe/capita (2014) σε σχέση με τον γενικό μέσο όρο κατανάλωσης στην ΕΕ15 που είναι 0,157 toe/capita.

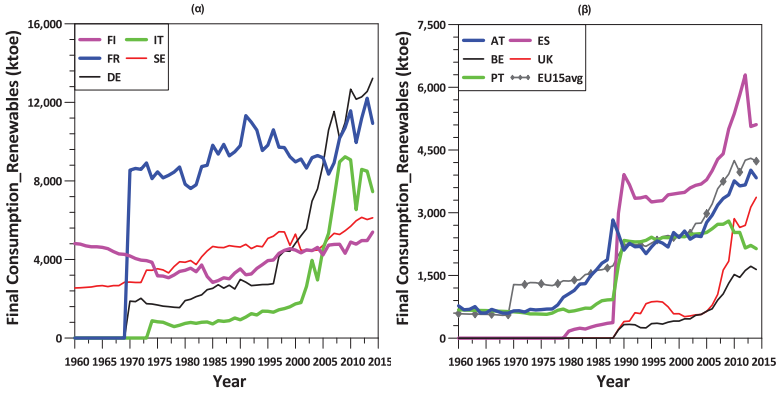
Παρά το καθυστερημένο της ένταξης των ΑΠΕ στην παραγωγή και κατανάλωση ενέργειας από τις χώρες η τάση, αν και δεν έχει σταθεροποιηθεί η κατανάλωση είναι έντονα ανοδική σε όλες τις χώρες.

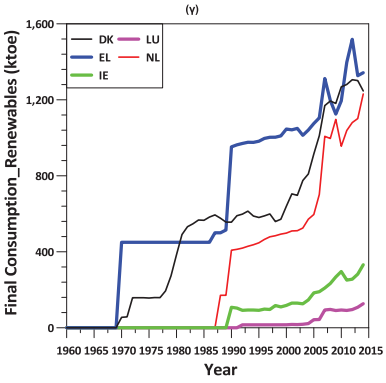


Σχήμα 1. Συνολική Τελική Κατανάλωση στην ΕΕ15 α) Συνολική Τελική Κατανάλωση σε σχέση με ΑΕΠ, β) Συνολική Τελική Κατανάλωση σε σχέση με τον Πληθυσμό της ΕΕ15, γ) Ρυθμοί Ανάπτυξης ΑΕΠ, Πληθυσμού, Συνολικής Τελικής Κατανάλωσης και του λόγου ΣΤΚ/Πληθυσμό

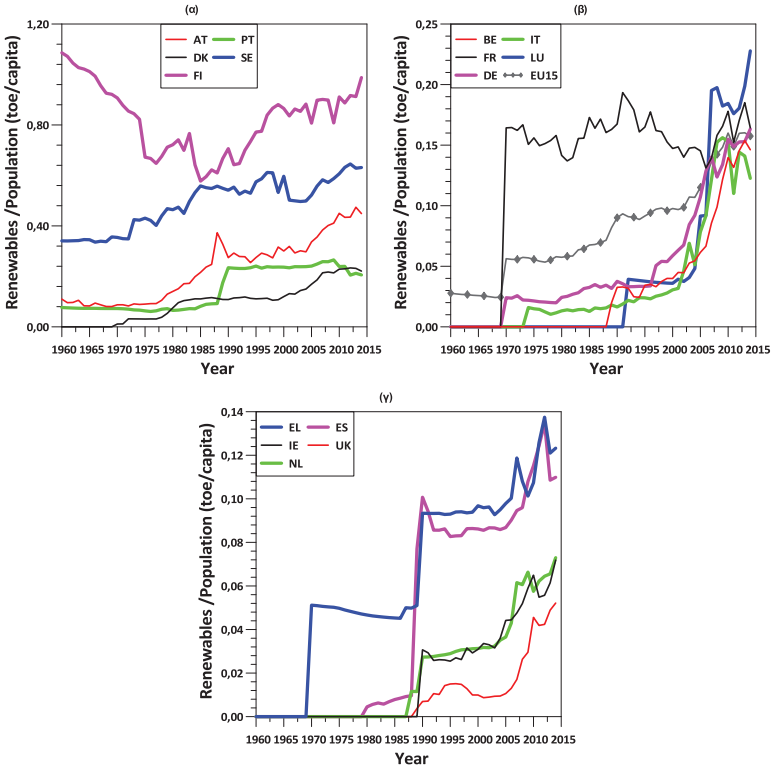


Σχήμα 2. Χρονική Ανάλυση Κατανάλωσης ανά κατηγορία Ενεργειακών Προϊόντων στην ΕΕ15
α) Απόλυτα μεγέθη Κατανάλωσης & ΑΕΠ, β) Κατανάλωση/Πληθυσμό, γ) Ρυθμός αύξησης Κατανάλωσης & ΑΕΠ





Σχήμα 3 Τελική Κατανάλωση ΑΠΕ ανά χώρα α) Χώρες με μεγάλη κατανάλωση, β) Χώρες με μεσαία κατανάλωση, γ) Χώρες με μικρή κατανάλωση

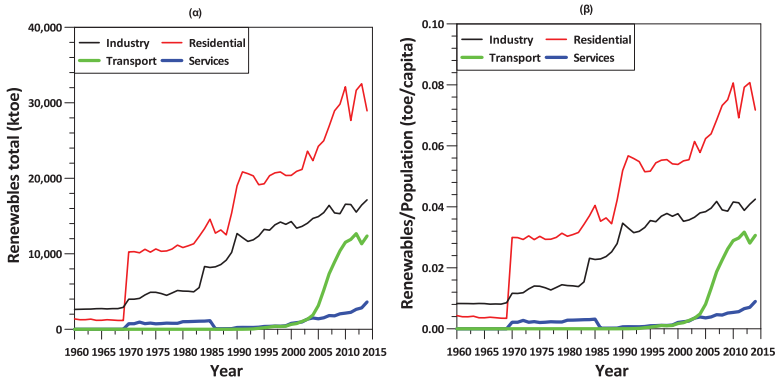


Σχήμα 4 Τελική Κατανάλωση ΑΠΕ/Πληθυσμό ανά χώρα α) Χώρες με μεγάλη κατανάλωση/κάτοικο, β) Χώρες με μεσαία κατανάλωση/κάτοικο, γ) Χώρες με μικρή κατανάλωση/κάτοικο

3.1.4. Τελική Κατανάλωση ΑΠΕ ανά Ενεργειακή Ροή

Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η κατανάλωση των προϊόντων ΑΠΕ ανά ενεργειακή ροή στο σύνολο της ΕΕ15 (Σχήμα 5α) και ανά τον πληθυσμό (Σχήμα 5β).

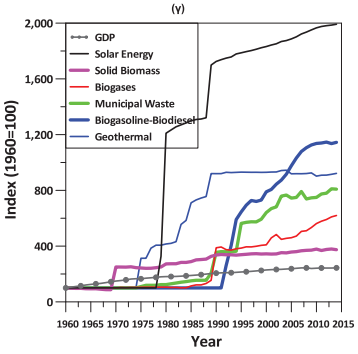
Μεγαλύτερη κατανάλωση εμφανίζεται στον Οικιστικό Κλάδο. Στις μεταφορές, η κατανάλωση ενέργειας από προϊόντα ΑΠΕ εντάχθηκε από το 1994 και μετά με σταθερή ανοδική τάση. Αντίθετα στο Εμπόριο και τις Δημόσιες Υπηρεσίες η κατανάλωση προϊόντων ΑΠΕ εμφανίζεται μικρή χωρίς ιδιαίτερη αύξηση.



Σχήμα 5 Τελική Κατανάλωση ΑΠΕ ανά Ενεργειακή Ροή α) στην ΕΕ15, β) ανά Πληθυσμό

3.1.5. Τελική Κατανάλωση ΑΠΕ ανά επιλεγμένο Ενεργειακό Προϊόν

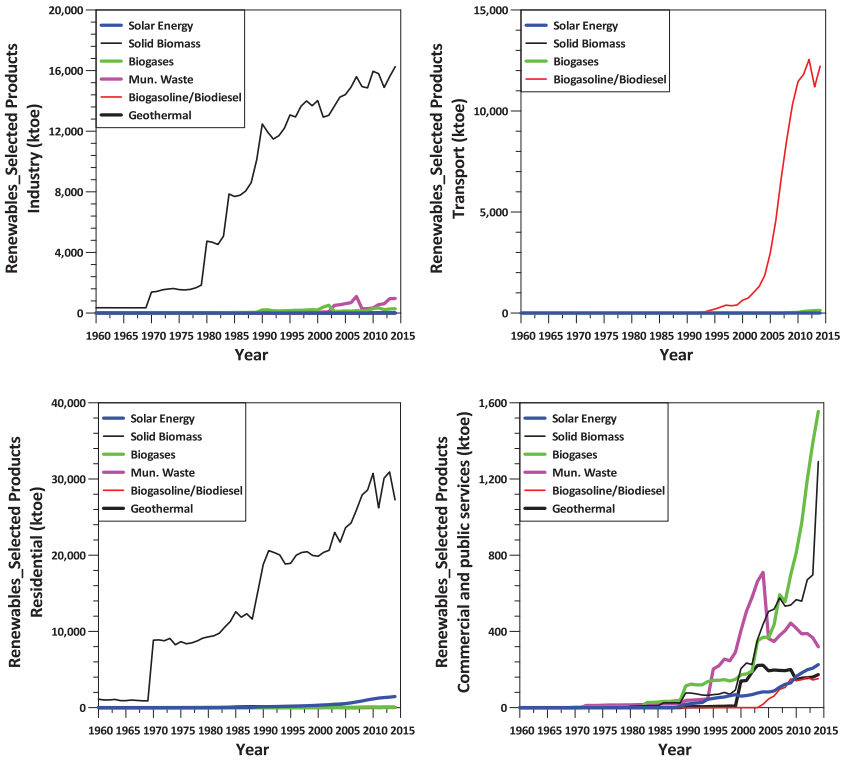
Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται ο ρυθμός αύξησης ανά επιλεγμένο ενεργειακό προϊόν της κατηγορίας. Στα περισσότερα προϊόντα είναι θετικός, με εξαίρεση την Γεωθερμία η οποία από το 1989 και μετά εμφανίζει σταθερότητα. Υψηλότερο ρυθμό ανάπτυξης φαίνεται να έχει η Ηλιακή Ενέργεια (Θερμική & φωτοβολταϊκή) με τα Υγρά Βιοκαύσιμα να ακολουθούν, κι αυτά, με έντονο θετικό ρυθμό.



Σχήμα 6 Ρυθμός Κατανάλωσης ΑΠΕ ανά επιλεγμένο Ενεργειακό Προϊόν στην ΕΕ15

3.1.6. Τελική Κατανάλωση ΑΠΕ ανά επιλεγμένο Ενεργειακό Προϊόν & Ενεργειακή Ροή

Παρακάτω, στο Σχήμα 7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση της κατανάλωσης των επιλεγμένων προϊόντων κατηγορίας ΑΠΕ ανά Ενεργειακή Ροή. Διαπιστώνουμε ότι ανά ενεργειακή ροή η κατανάλωση αφορά σε περιορισμένο αριθμό προϊόντων. Στην Βιομηχανία και τον Οικιστικό Κλάδο η Στερεή Βιομάζα αποτελεί το κύριο ενεργειακό προϊόν, με τα Αστικά Απόβλητα στη Βιομηχανία και την Ηλιακή Ενέργεια στον Οικιστικό Κλάδο να ακολουθούν με πολύ μικρή κατανάλωση αλλά αυξητική τάση. Στις Μεταφορές παρατηρείται αποκλειστική χρήση των Υγρών Βιοκαυσίμων με μικρή ένταξη του Βιοαερίου την τελευταία πενταετία. Στο Εμπόριο και τις Δημόσιες Υπηρεσίες υφίσταται κατανάλωση περισσότερων προϊόντων όμως με αρκετά μικρότερες ποσότητες.



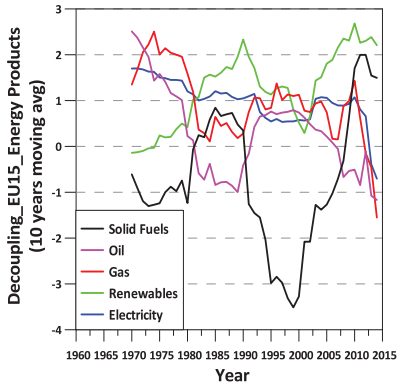
Σχήμα 7 Τελική Κατανάλωση ΑΠΕ ανά επιλεγμένο Ενεργειακό Προϊόν και Ενεργειακή Ροή

3.2. Αποδέσμευση Ενέργειας – Decoupling

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση των τάσεων των μεταβολών της ενεργειακής κατανάλωσης σε σχέση με τις μεταβολές της οικονομικής ανάπτυξης των χωρών, στις κύριες κατηγορίες Ενεργειακών Προϊόντων (Σχήμα 8) και σε επιλεγμένα Ενεργειακά Προϊόντα της κατηγορίας των ΑΠΕ (Σχήμα 9).

3.2.1. Αποδέσμευση Ενέργειας ανά κατηγορία Ενεργειακών Προϊόντων

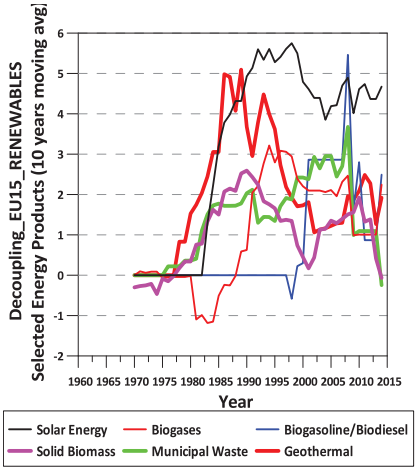
Στο Σχήμα 8 απεικονίζονται οι τάσεις των μεταβολών για το σύνολο της ΕΕ15. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι μεταβολές στην κατανάλωση ενέργειας από Στερεά Καύσιμα σε σχέση με την παραγόμενη ενέργεια από Πετρέλαιο και Αέριο οι οποίες είναι εκ διαμέτρου αντίθετες. Τα Στερεά Καύσιμα παρουσιάζουν αποδέσμευση από την οικονομία. Όμως από το 2000 και μετά, η κατάσταση αναπροσαρμόζεται και ακολουθείται εξελισσόμενη άνοδος, με αποτέλεσμα τα τελευταία έτη οι οικονομικές μεταβολές να επηρεάζονται από την κατανάλωση των Στερεών Καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας. Στο Πετρέλαιο, οι μεταβολές εμφανίζουν πτωτική τάση, παρά την μικρή ανάκαμψη κατά το χρονικό διάστημα 1992-2000, και από το 2007 επιτυγχάνεται απόλυτη αποδέσμευση. Στο αέριο και τον ηλεκτρισμό οι μεταβολές παρουσιάζουν πιο σταθερή εξέλιξη με πτωτική τάση. Επιτυγχάνεται απόλυτη αποδέσμευση το 2012 για το αέριο και το 2013 για τον ηλεκτρισμό. Οι ΑΠΕ παρουσιάζουν ανοδικές τάσεις, με μικρή υπαναχώρηση κατά την τετραετία 1999-2002 η οποία δεν διήρκησε. Στη συνέχεια, επιδεικνύουν ανοδική τάση και φαίνεται να επηρεάζουν τις μεταβολές της οικονομικής ανάπτυξης.



Σχήμα 8 Αποδέσμευση Ενέργειας ανά κατηγορία Ενεργειακών Προϊόντων

3.2.2. Αποδέσμευση Ενέργειας ανά επιλεγμένο Ενεργειακό Προϊόν ΑΠΕ

Οι καταναλώσεις στα επιλεγμένα προϊόντα των ΑΠΕ, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 9, παρουσιάζουν αστάθεια, εντούτοις φαίνεται οι μεταβολές στις καταναλώσεις να επηρεάζουν τις μεταβολές στην οικονομία. Τα Αστικά Απορρίμματα και η Στερεή Βιομάζα παρουσιάζουν πτωτικές τάσεις φτάνοντας σε απόλυτη αποδέσμευση από τον ΑΕΠ το 2014. Τα υπόλοιπα προϊόντα αν και εμφάνισαν πτωτικές τάσεις διατήρησαν την κατανάλωση και την εκ νέου ανοδική τάση. Σημαντική συμβολή στις μεταβολές της οικονομίας αποτελεί η Ηλιακή Ενέργεια.



Σχήμα 9 Αποδέσμευση Ενέργειας στις ΑΠΕ ανά επιλεγμένο Ενεργειακό Προϊόν

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση των ενεργειακών ισοζυγίων εξακριβώθηκε μείωση της Συνολικής Τελικής Κατανάλωσης από το έτος 2005 και μετά, η οποία δεν οφείλεται σε οικονομικό μαρασμό, αλλά σε μείωση της κατανάλωσης ανά κάτοικο της ΕΕ15. Αυτή η μείωση εντοπίζεται στις συμβατικές μορφές ενέργειας και εν γένη σε μεταστροφή της καταναλωτικής ενεργειακής νοοτροπίας. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας προερχόμενης από προϊόντα ΑΠΕ σε όλες τις ενεργειακές ροές.

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας παρουσιάζουν έντονη ανοδική τάση στο σύνολο της ΕΕ15 αλλά και σε όλες τις χώρες χωριστά και έκδηλη επίδραση στις οικονομικές μεταβολές.

Στο Πετρέλαιο και το Αέριο έχει επιτευχθεί απόλυτη αποδέσμευση. Στα Στερεά Καύσιμα παρότι είχε επιτευχθεί αποδέσμευση για μεγάλο χρονικό διάστημα, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ανάκαμψη και αύξηση της κατανάλωσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] European Commission, 2012, Energy Roadmap 2050.

[2] European Commission, 2014, A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030.

[3] EEA, 2016, Energy Intensity.

[4] European Union, 2012, Directive 2012/27/EU on energy efficiency.

[5] IEA, 2016, *World Energy Balances, 2016 Edition, Database Documentation*.

[6] OECD, 2002, Indicators to Measure Decoupling of Environmental Pressure from Economic Growth.

[7] WorldBank, 2017, World Development Indicators. THE WORLD BANK.

Η ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΩΝ ΑΠΕ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

Αλ. Κόντζηλας[1], Ι. Μαύρος[2], Ι. Νίκας[1], Δρ. Διον. Παπαχρήστου[3]*

1 Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,
2 Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ/κών και Μηχ/κών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Κύπρου,
3* Δ/ντης Γραφείου Τύπου & Δημοσίων Σχέσεων, Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ),
Πειραιώς 132, 118 54, Αθήνα, e-mail: papachristou@rae.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Την τελευταία δεκαετία η συνεισφορά των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδος αυξάνεται συνεχώς με την αντίστοιχη αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος τους. Στην παρούσα μελέτη αναλύεται διεξοδικά η συμμετοχή των ΑΠΕ στη κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας την περίοδο 2008-2017.

Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται προέρχονται από τα επίσημα δημοσιευμένα αρχεία των Διαχειριστών: τον Ανεξάρτητο Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ ΑΕ) του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ), για το Διασυνδεδεμένο Σύστημα ΥΤ, τον Διαχειριστή του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ ΑΕ) για το Δίκτυο Διανομής ΜΤ και ΧΤ, καθώς επίσης και τον Λειτουργό της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΛΑΓΗΕ ΑΕ).

Η συνεισφορά των ΑΠΕ μελετάται σε ωριαία, ημερήσια, μηνιαία και ετήσια βάση, με και χωρίς την συμμετοχή των μεγάλων Υδροηλεκτρικών Σταθμών (ΥΗΣ). Η συνεισφορά των ΥΗΣ εξαρτάται άμεσα από τη διαθέσιμη ποσότητα των νερών κατά την διάρκεια του έτους. Έτσι αν το υδρολογικό έτος είναι ξηρό, η συμμετοχή των ΥΗΣ στην ηλεκτροπαραγωγή του συστήματος είναι σχετικά μικρή, με αποτέλεσμα την μείωση της συνολικής συνεισφοράς της ανανεώσιμης ενέργειας (ΑΠΕ και ΥΗΣ) στη συνολική ζήτηση. Η ετήσια καμπύλη διάρκειας της συνεισφοράς των ΑΠΕ (με και χωρίς ΥΗΣ) παρέχει σημαντικές πληροφορίες για την ωριαία συμμετοχή τους στην κάλυψη της ζήτησης δίνοντας για παράδειγμα τις συνολικές ώρες ετησίως όπου η συμμετοχή των ΑΠΕ ξεπερνά ένα συγκεκριμένο ποσοστό διείσδυσης ή ένα ποσό ενέργειας.

Η ανάλυση της λειτουργίας της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, μέσα από τα ωριαία αποτελέσματα που δημοσιεύει η ΑΔΜΗΕ ΑΕ (Αποτελέσματα Αγοράς Διαχείρισης Ισοζυγίου Ισχύος), παρέχει λεπτομερή εικόνα για την ωριαία συμμετοχή (διείσδυση) των ΑΠΕ στην κάλυψη της ζήτησης.

Με βάση τα ανωτέρω στοιχεία και τις εκτιμήσεις των αρμόδιων Διαχειριστών για το επίπεδο της ζήτησης τα επόμενα χρόνια, προσδιορίζονται σενάρια νέας εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ, ώστε να καλυφθεί ο εθνικός στόχος της διείσδυσης των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή κατά το 2020.

Λέξεις Κλειδιά: *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί (ΥΗΣ), συντελεστές χρησιμοποίησης και διείσδυση ΑΠΕ και ΥΗΣ, καμπύλες διάρκειας παραγόμενης ενέργειας και διείσδυσης ΑΠΕ και ΥΗΣ, σενάρια διείσδυσης ΑΠΕ*.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Το Θεσμικό Πλαίσιο για τις ΑΠΕ

Η διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο της Χώρας αποτελεί βασικό πυλώνα ανάπτυξης, προστασίας του περιβάλλοντος και ενδυνάμωσης της εθνικής οικονομίας. Η επίτευξη των κοινοτικών και εθνικών στόχων για τη μέγιστη συμμετοχή των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα της Χώρας μέσω ορθολογικής διαχείρισης ενέργειας με το ελάχιστο δυνατό κόστος για τον καταναλωτή, αποτελεί κυρίαρχο στόχο και στρατηγική επιλογή.

Στο πλαίσιο αυτό η Χώρα έχει δεσμευτεί να υλοποιήσει ένα Εθνικό Σχέδιο Δράσης ώστε η διείσδυση των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας να ανέλθει έως το 2020 σε ποσοστό 20% (ν. 3851/2010). Ο στόχος αυτός εξειδικεύεται σε συμμετοχή των ΑΠΕ σε ποσοστό τουλάχιστον 40% της ακαθάριστης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, 20% σε θέρμανση και ψύξη και 10% στις μεταφορές. Το θεσμικό πλαίσιο που σχετίζεται με την υλοποίηση του Εθνικού Σχεδίου Δράσης για τις ΑΠΕ, συνοψίζεται κυρίως στους παρακάτω νόμους:

- **Ν.3851/2010** (ΦΕΚ Α 85/4-6-2010): Για την επιτάχυνση της ανάπτυξης των ΑΠΕ.
- **Ν.4001/2011** (ΦΕΚ 179 Α/22.08.2011): Για τη λειτουργία των Ενεργειακών Αγορών Ηλεκτρισμού και Φυσικού Αερίου, για Έρευνα, Παραγωγή και δίκτυα μεταφοράς Υδρογονανθράκων και άλλες ρυθμίσεις.
- **Ν.4414/2016** (ΦΕΚ Α 149/9-8-2016): Για τη ριζική αναμόρφωση του συστήματος στήριξης των μονάδων ΑΠΕ, βάσει των κατευθυντήριων γραμμών της Ε.Ε. για τις κρατικές ενισχύσεις, με στόχο την σταδιακή τους ενσωμάτωση και συμμετοχή στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι μέχρι σήμερα δεν υπάρχει εγκεκριμένος **Μακροχρόνιος Ενεργειακός Σχεδιασμός** της Ελλάδας από την πολιτεία. Υπάρχουν ωστόσο συγκεκριμένες δράσεις οι οποίες αποτελούν στρατηγική επιλογή της χώρας και κατά μία οπτική εντάσσονται στην έννοια του Μακροχρόνιου Ενεργειακού Σχεδιασμού τόσο στον τομέα του ηλεκτρισμού, όσο και στον τομέα του φυσικού αερίου. Πολλές επιλογές είναι στρατηγικής σημασίας για την Ελλάδα.

1.2. Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας της Ελλάδας

Το ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα αποτελείται από το Διασυνδεδεμένο Ηλεκτρικό Σύστημα (ΔΣ) του ηπειρωτικού τμήματος της χώρας και των διασυνδεδεμένων με αυτό νησιών, καθώς και από τα 32 αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών (ΜΔΝ).

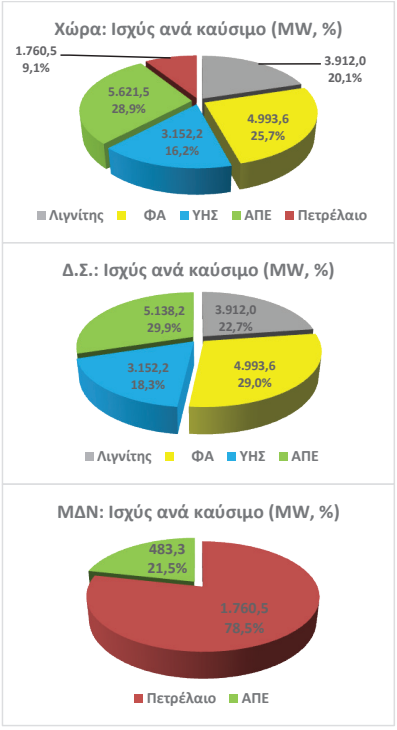
Το Διασυνδεδεμένο Σύστημα (ΔΣ) απαρτίζεται από το Σύστημα Μεταφοράς (εφεξής «Σύστημα» ή «ΣΜ»), στα επίπεδα υψηλής (150kV και 66kV) και υπέρ-υψηλής τάσης (400kV), αρμοδιότητας της ΑΔΜΗΕ ΑΕ., καθώς και από το Δίκτυο Διανομής (εφεξής καλούμενο «Δίκτυο» ή «ΔΔ»), στα επίπεδα μέσης (22/20/15/6,6kV) και χαμηλής τάσης (230/400V), αρμοδιότητας της ΔΕΔΔΗΕ ΑΕ.

Από τον Οκτώβριο του 2004 το Ελληνικό Σύστημα επαναλειτουργεί σύγχρονα και παράλληλα με το διασυνδεδεμένο Ευρωπαϊκό Σύστημα υπό το γενικότερο συντονισμό του ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity), που αποτελεί ως προς τα θέματα λειτουργίας και ανάπτυξης του Συστήματος από τον Ιούνιο του 2009 διάδοχο και ευρύτερο σχήμα της UCTE (Union pour la Coordination du Transport de l' Electricité). Η παράλληλη λειτουργία του Ελληνικού Συστήματος με το Ευρωπαϊκό επιτυγχάνεται μέσω διασυνδετικών Γ.Μ., κυρίως 400 kV, με τα Συστήματα της Αλβανίας, της Βουλγαρίας, της ΠΓΔΜ (FYROM) και της Τουρκίας. Επιπλέον, το Ελληνικό Σύστημα συνδέεται ασύγχρονα (μέσω υποβρυχίου συνδέσμου συνεχούς ρεύματος) με την Ιταλία.

Σε επίπεδο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η Ελλάδα διαθέτει σήμερα (το 2017) Θερμοηλεκτρικούς Σταθμούς (ΘΗΣ) με καύσιμο Λιγνίτη, Φυσικό Αέριο (ΦΑ) και Πετρέλαιο (μαζούτ και ντίζελ), Υδροηλεκτρικούς Σταθμούς (ΥΗΣ) και Σταθμούς Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Οι σταθμοί ΑΠΕ διακρίνονται σε Αιολικά Πάρκα (Α/Π), Φωτοβολταϊκούς σταθμούς (Φ/Β), Μικρούς Υδροηλεκτρικούς Σταθμούς (ΜΥΗΣ), σταθμούς Βιοαερίου-Βιομάζας (ΣΒΙΟ) και σταθμούς Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού-Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης (ΣΗΘΥΑ). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται η εγκατεστημένη ισχύς και το αντίστοιχο ποσοστό των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα ανά Σύστημα, είδος σταθμού παραγωγής και τύπο καυσίμου. Στον ίδιο πίνακα απεικονίζονται υπό μορφή διαγράμματος το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος (και το αντίστοιχο ποσοστό) των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής ανά καύσιμο σε επίπεδο Χώρας, ΔΣ και ΜΔΝ.

Πίνακας 1: Εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς ανά Σύστημα και Σταθμό Παραγωγής (Πηγή: ΛΑΓΗΕ [1], [2] – ΔΕΔΔΗΕ [3], Δεκέμβρης 2017)

Σύστημα / Σταθμοί Παραγωγής	Καθαρή Ισχύς [MW, %] Δεκέμβρης 2017	
Διασυνδεδεμένο Σύστημα (ΔΣ)	**17.196,0**	**88,5%**
Θερμοηλεκτρικοί Σταθμοί (ΘΗΣ)	**8.905,6**	**51,8%**
Λιγνιτικοί	3.912,0	43,9%
Φυσικού Αερίου (ΦΑ)	4.993,6	56,1%
Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί (ΥΗΣ)	**3.152,2**	**18,3%**
ΑΠΕ	**5.138,2**	**29,9%**
Α/Π	2.301,8	44,8%
Φ/Β	2.094,0	40,8%
Φ/Β Στέγες	351,0	6,8%
ΜΥΗΣ	230,3	4,5%
Βιοαέριο-Βιομάζα (ΣΒΙΟ)	61,0	1,2%
ΣΗΘΥΑ	100,1	1,9%
Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά (ΜΔΝ)	**2.243,8**	**11,5%**
Θερμικοί Σταθμοί	**1.760,5**	**78,5%**
ΑΠΕ	**483,3**	**21,5%**
Α/Π	322,8	66,8%
Φ/Β	135,9	28,1%
Φ/Β Στέγες	23,7	4,9%
ΜΥΗΣ	0,3	0,1%
Βιοαέριο-Βιομάζα (ΣΒΙΟ)	0,5	0,1%
Σύνολο Εγκατεστημένης Ισχύος	**19.439,8**	**100%**



Όπως φαίνεται από το Πίνακα 1, η Ελλάδα χρησιμοποιεί σήμερα πέντε τύπους καυσίμων για την κάλυψη των ηλεκτροπαραγωγικών της αναγκών, με σχεδόν ισομοιρασμένη την εγκατεστημένη ισχύ ανά καύσιμο σε επίπεδο ΔΣ, αλλά με σημαντική διαφοροποίηση στα ΜΔΝ, όπου το πετρέλαιο παραμένει η κύρια πηγή για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών τους.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε διαχείριση, επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων ηλεκτροπαραγωγής για τον Ελλαδικό χώρο, με έμφαση στη παραγωγή και διείσδυση των ΑΠΕ στο ΔΣ. Τα δεδομένα προέρχονται από τον ΑΔΜΗΕ και τον ΛΑΓΗΕ. Στην συνέχεια αναφέρονται αναλυτικότερα στοιχεία για το είδος και τη πηγή των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν.

2.1. Ωριαία δεδομένα του ΑΔΜΗΕ

Τα ωριαία δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην παρούσα ανάλυση προέρχονται από τα επίσημα δημοσιευμένα αρχεία του ΑΔΜΗΕ, που διατίθενται στην ιστοσελίδα του, και αφορούν την Αγορά Διαχείρισης Ισοζυγίου Ισχύος (Αρχική Λειτουργία & Δεδομένα Λειτουργία Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας Αγορά Διαχείρισης Ισοζυγίου Ισχύος Αποτελέσματα Ex-POST). Πρόκειται για δεδομένα εκκαθάρισης του πραγματικά διακινούμενου φορτίου και της πραγματικά παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο ΣΜ και δημοσιεύονται ένα μήνα περίπου αργότερα από την ημέρα στην οποία αναφέρονται. Τα δεδομένα αυτά αναφέρονται στο Σύστημα Μεταφοράς (ΣΜ) της Ελλάδος, δηλαδή στο τμήμα ΥΤ του Διασυνδεδεμένου Συστήματος, από τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι τα όρια του ΣΜ με το ΔΔ. Στο ΣΜ διακινείται το 90% περίπου της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται στο σύνολο της ελληνικής επικράτειας (το υπόλοιπο 10% περίπου παράγεται και καταναλώνεται στο

Δίκτυο). Τα εν λόγω δεδομένα δημοσιεύονται σε αρχεία τύπου excel, και κάθε αρχείο, που αφορά ένα 24ωρο, παρέχει τα εξής ανά ώρα μετρημένα στοιχεία του ΣΜ:

- Το φορτίο που διακινείται στα όρια του ΣΜ με το ΔΔ.
- Την ηλεκτρική ενέργεια που εισάγεται/εξάγεται από/προς τις διασυνδεδεμένες με την Ελλάδα χώρες, καθώς και το καθαρό ισοζύγιο διασυνδέσεων (εισαγωγές – εξαγωγές).
- Την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από το σύνολο των ΑΠΕ του ΣΜ.
- Την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια για κάθε ΘΗΣ του ΣΜ.
- Την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια για κάθε ΥΗΣ του ΣΜ.

Από τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει η ωριαία παραγόμενη ενέργεια και διείσδυση για κάθε μια από τις ενεργειακές πηγές του ΣΜ. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε ετήσια σωρευτικά διαγράμματα από όπου προκύπτει η ωριαία συμβολή (παραγόμενη ενέργεια και διείσδυση) της κάθε ενεργειακής πηγής στη συνολικά διακινούμενη ηλεκτρική ενέργεια στο ΣΜ. Με την αναγωγή των ωριαίων μετρήσεων σε ημερήσιες, μηνιαίες και ετήσιες τιμές, προκύπτουν τα αντίστοιχα διαγράμματα παραγόμενης ενέργειας και διείσδυσης, για κάθε ενεργειακή πηγή του ΣΜ, σε ημερήσια, μηνιαία και ετήσια αντίστοιχα βάση. Η ταξινόμηση των μετρήσεων κατά φθίνουσα σειρά δίνει τις ετήσιες καμπύλες διάρκειας της παραγόμενης ενέργειας και της διείσδυσης των ΑΠΕ και των ΥΗΣ, από τις οποίες προκύπτει η μέγιστη και η ελάχιστη παραγόμενη ενέργεια και διείσδυση αντίστοιχα, των ΑΠΕ και των ΥΗΣ, ανά ώρα, ημέρα, μήνα και έτος. Επιπλέον, από τις ωριαίες τιμές προκύπτει και το πλήθος των ωρών κατά την διάρκεια ενός έτους όπου η παραγωγή των ΑΠΕ (με και χωρίς τους ΥΗΣ) αντικαθιστά έναν Λιγνιτικό ΘΗΣ 300 MW ή έναν ΘΗΣ Συνδυασμένου Κύκλου 500 MW.

2.2. Μηνιαία δεδομένα του ΛΑΓΗΕ και του ΑΔΜΗΕ

Τα μηνιαία δεδομένα του ΛΑΓΗΕ προέρχονται από τα Μηνιαία Στατιστικά Δελτία ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ, που δημοσιεύει ο ΛΑΓΗΕ στην επίσημη ιστοσελίδα του (Αρχική Σύστημα Εγγυημένων Τιμών ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ Μηνιαία Στατιστικά Δελτία ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ) και αφορούν την εγκατεστημένη ισχύ και την παραγόμενη ενέργεια των μονάδων ΑΠΕ ανά τεχνολογία & ΣΗΘΥΑ (Άρθρα 9 & 10 Ν.3468/2006) και των Φ/Β στεγών του ΔΣ. Τα μηνιαία δεδομένα του ΑΔΜΗΕ προέρχονται από τα Μηνιαία Δελτία Ενέργειας που δημοσιεύει ο ΑΔΜΗΕ στην επίσημη ιστοσελίδα του (Αρχική Δελτία Αγοράς Μηνιαία Δελτία Ενεργειας). Τα αρχεία αυτά είναι σε μορφή pdf και δημοσιεύονται 3 μήνες περίπου αργότερα από τον μήνα στον οποίο αναφέρονται.

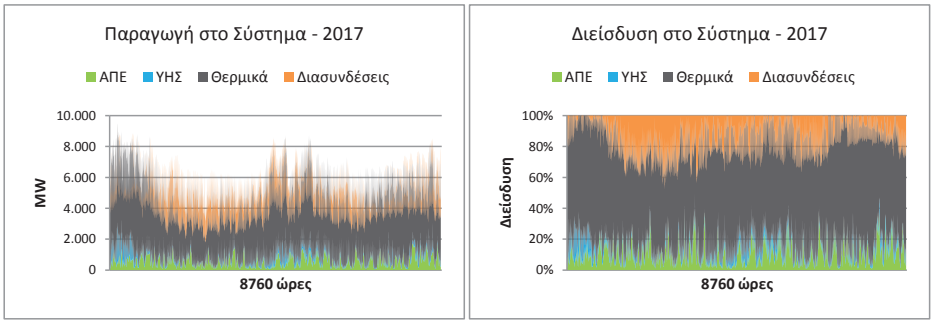
Από τα πιο πάνω δεδομένα προκύπτει η παραγόμενη ενέργεια και η αντίστοιχη διείσδυση για κάθε μία από τις ενεργειακές πηγές του ΔΣ σε μηνιαία και ετήσια βάση. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τις εκτιμήσεις του ΑΔΜΗΕ για την εξέλιξη της ζήτησης κατά τα επόμενα χρόνια, προσδιορίζεται η απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς των ΑΠΕ, ώστε να καλυφθεί ο εθνικός στόχος διείσδυσης τους στην ηλεκτροπαραγωγή κατά το 2020.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Διείσδυση ΑΠΕ & ΥΗΣ στο Σύστημα Μεταφοράς της Ελλάδος

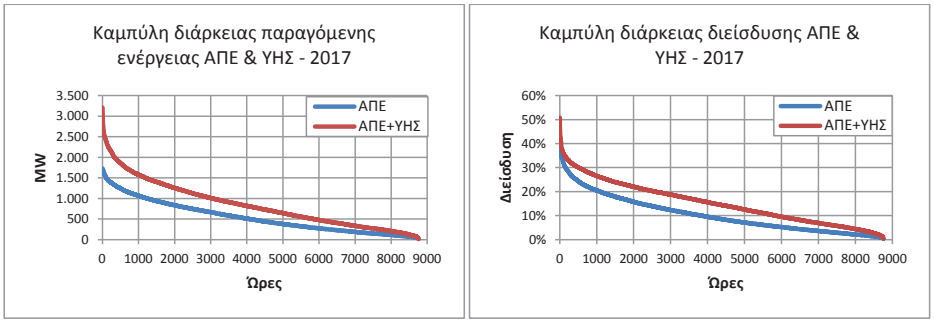
3.1.1. Ωριαία αποτελέσματα

Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται η ωριαία παραγόμενη ενέργεια και η ωριαία διείσδυση για κάθε μια από τις ενεργειακές πηγές (ΘΗΣ, Διασυνδέσεις, ΑΠΕ και ΥΗΣ) του Συστήματος Μεταφοράς (ΣΜ), στο οποίο διακινείται σήμερα το 90% περίπου της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται στην Ελλάδα. Η ωριαία παραγωγή των ΑΠΕ και των ΥΗΣ, εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα της πρωτογενούς ενέργειας που είναι απαραίτητη για τις δύο αυτές πηγές (κυρίως άνεμος, ήλιος και νερό). Όσον αφορά τις ΑΠΕ, η διαθεσιμότητα πρωτογενούς ενέργειας είναι κατά ένα σημαντικό ποσοστό, που αφορά τον άνεμο, στοχαστική και απρόβλεπτη, ενώ η ηλιακή ενέργεια είναι αρκετά πιο προβλέψιμη. Έτσι, όταν υπάρχει διαθέσιμη πρωτογενής ενέργεια για τις ΑΠΕ, η παραγόμενη ενέργεια από τις ΑΠΕ απορροφάται με προτεραιότητα από το Σύστημα έναντι των άλλων πηγών. Όσον αφορά τους ΥΗΣ, η παραγωγή τους βραχυπρόθεσμα (σε ωριαία, ημερήσια ή εβδομαδιαία κλίμακα) είναι, σχετικά με τις ΑΠΕ, αρκετά πιο ελεγχόμενη και προγραμματιζόμενη από τον Διαχειριστή του Συστήματος. Ωστόσο, μακροπρόθεσμα (σε μηνιαία ή ετήσια κλίμακα), υπόκειται και αυτή σε κάποιο βαθμό αβεβαιότητας, που έχει σχέση με τις βροχοπτώσεις κατά την διάρκεια του έτους και το διαθέσιμο υδάτινο δυναμικό, που αποταμιεύεται στους ταμιευτήρες των ΥΗΣ. Έτσι, όταν το υδρολογικό έτος είναι υγρό, δηλαδή πλούσιο σε βροχοπτώσεις, η συνεισφορά των ΥΗΣ στην ζήτηση είναι μεγάλη, το αντίθετο συμβαίνει για τα ξηρά υδρολογικά έτη. Επιπλέον, η παραγωγή των ΥΗΣ σχετίζεται άμεσα με τις αποφάσεις του Διαχειριστή και τον Κώδικα Διαχείρισης του Συστήματος.



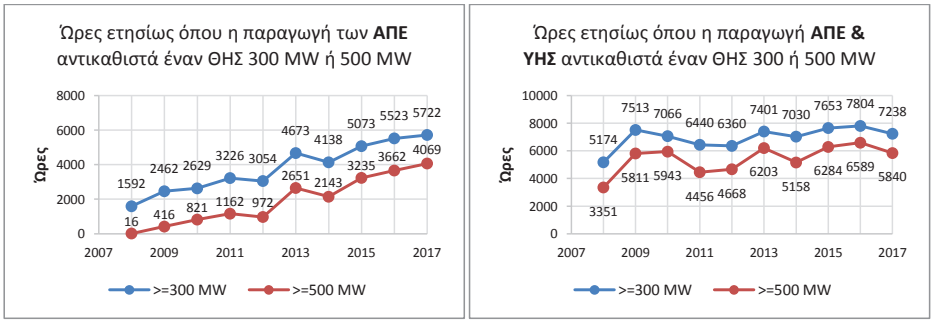
Σχήμα 1: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και διείσδυση ενεργειακών πηγών ανά ώρα στο ΣΜ

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται οι ετήσιες καμπύλες διάρκειας της ωριαίας παραγόμενης ενέργειας (ή ισχύος) και της ωριαίας διείσδυσης των ΑΠΕ με και χωρίς την συνεισφορά των ΥΗΣ. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ και η αντίστοιχη διείσδυση τους αυξάνονται συνεχώς χρόνο με τον χρόνο. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, τα έτη 2015, 2016 και 2017 η παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ ξεπέρασε τα 500 MW (διείσδυση 10%) για περίπου 3000, 3500 και 4000 ώρες αντίστοιχα. Η συνεισφορά των ΥΗΣ (ΑΠΕ+ΥΗΣ) είναι εμφανής στην αύξηση της διείσδυσης των καθαρών πηγών ενέργειας, ωστόσο εξαρτάται άμεσα από το διαθέσιμο υδάτινο δυναμικό κατά την διάρκεια του έτους.



Σχήμα 2: Ετήσια καμπύλη διάρκειας της παραγόμενης ωριαία ενέργειας και της ωριαίας διείσδυσης των ΑΠΕ και των ΥΗΣ στο Σύστημα Μεταφοράς

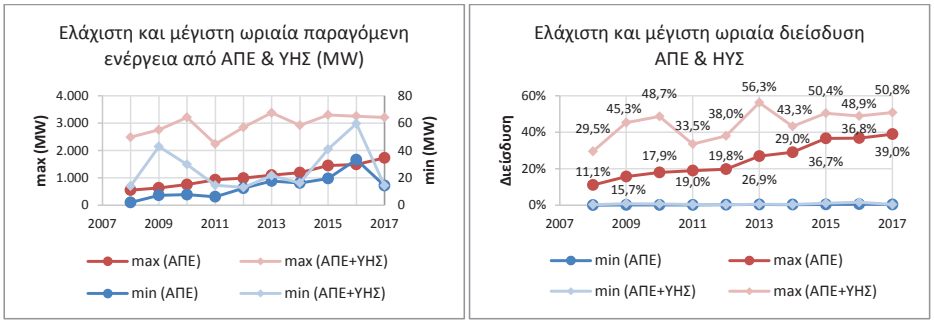
Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3, οι ώρες ετησίως κατά τις οποίες η παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ αντικατέστησε την παραγωγή ενός Λιγνιτικού ΘΗΣ 300 MW ή ενός ΘΗΣ Συνδυασμένου Κύκλου 500 MW, αυξήθηκαν εντυπωσιακά τα τελευταία 10 έτη. Έτσι, κατά το 2008 η ωριαία παραγωγή των ΑΠΕ ήταν μεγαλύτερη από 500 MW μόλις 16 ώρες, ενώ το 2017 οι αντίστοιχες ώρες ανήλθαν σε 4069.



Σχήμα 3: Ώρες ετησίως όπου η παραγωγή ΑΠΕ & ΥΗΣ αντικατέστησε έναν ΘΗΣ 300 MW ή 500 MW

Η αύξηση της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ οφείλεται στην αντίστοιχη αύξηση της εγκατεστημένης τους ισχύος. Η συνδυασμένη παραγωγή ΑΠΕ & ΥΗΣ παρουσιάζει αρκετά διαφορετικό ρυθμό μεταβολής των αντίστοιχων ωρών, αφού εξαρτάται επιπλέον και από το διαθέσιμο υδάτινο δυναμικό. Ωστόσο, η συνεισφορά των ΥΗΣ έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση των αντίστοιχων ωρών. Ενδεικτικά, κατά το 2016 η συνδυασμένη παραγωγή ΑΠΕ & ΥΗΣ αντικατέστησε την παραγωγή ενός ΘΗΣ 500 MW κατά 6589 ώρες και ενός ΘΗΣ 300 MW κατά 7804 ώρες.

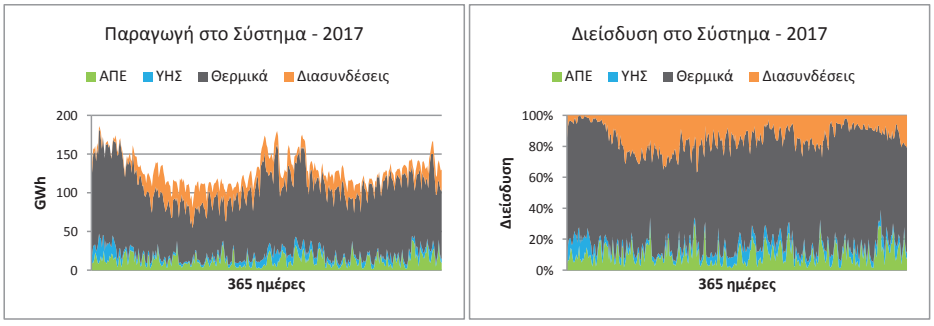
Στο Σχήμα 4 παρουσιάζεται η ελάχιστη και η μέγιστη ωριαία παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ με και χωρίς την συνεισφορά των ΥΗΣ, και η αντίστοιχη ωριαία διείσδυση ανά έτος. Όπως προκύπτει από το εν λόγω σχήμα η μέγιστη ωριαία διείσδυση των ΑΠΕ αυξάνεται συνεχώς χρόνο με το χρόνο, με αποτέλεσμα από το 11,1% το 2008, να αγγίξει το 39% το 2017. Αντίθετα, η εξέλιξη της μέγιστης ωριαίας διείσδυσης της συνδυασμένης παραγωγής ΑΠΕ & ΥΗΣ, εξαρτάται από το διαθέσιμο υδάτινο δυναμικό κατά την διάρκεια του έτους. Έτσι, όταν το υδρολογικό έτος είναι υγρό (2009, 2010, 2013), η συνεισφορά των ΥΗΣ αυξάνει την μέγιστη ωριαία συνδυασμένη διείσδυση ΑΠΕ & ΥΗΣ ανά έτος, ενώ όταν το υδρολογικό έτος είναι ξηρό (2008, 2011, 2014) η αντίστοιχη διείσδυση μειώνεται. Γενικά, η μέγιστη ωριαία συνδυασμένη διείσδυση ΑΠΕ & ΥΗΣ κυμάνθηκε από 29,5% (2008) έως, 56,3% (2013). Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και για την ελάχιστη ωριαία παραγόμενη ενέργεια και την αντίστοιχη διείσδυση ανά έτος, των ΑΠΕ &ΥΗΣ. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ελάχιστη ωριαία παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ είναι από το 2008 και έπειτα μεγαλύτερη του μηδενός, φτάνοντας κατά το 2016 τα 33 MW και μαζί με τους ΥΗΣ τα 60 MW (ενέργεια αρκετά μικρότερη για την αντικατάσταση ενός ΘΗΣ).



Σχήμα 4: Ελάχιστη και μέγιστη ωριαία παραγόμενη ενέργεια και διείσδυση ΑΠΕ & ΥΗΣ στο ΣΜ

3.1.2. Ημερήσια αποτελέσματα (με βάση τα ωριαία)

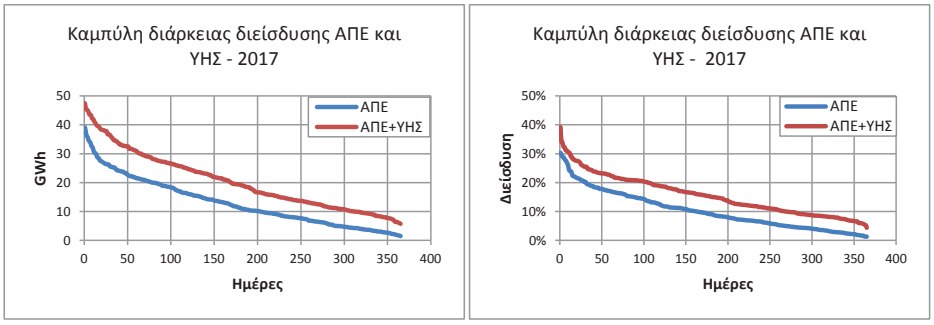
Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται η ημερήσια παραγόμενη ενέργεια (που προκύπτει από την πρόσθεση των ωριαίων τιμών) και η ημερήσια διείσδυση για κάθε μία από τις 4 ενεργειακές πηγές του ΣΜ. Τα συμπεράσματα είναι παρόμοια με αυτά που προέκυψαν για τα αντίστοιχα ωριαία διαγράμματα, με τη διαφορά ότι σε ημερήσια βάση αποτυπώνεται πιο ευκρινώς, κατά την διάρκεια του έτους, η ημερήσια συμβολή της κάθε ενεργειακής πηγής στην συνολική ζήτηση του ΣΜ. Έτσι, όπως φαίνεται από το εν λόγω σχήμα, η διείσδυση των ΑΠΕ και των ΥΗΣ ξεχωριστά είναι μικρότερη από την διείσδυση των διασυνδέσεων, που με την σειρά της είναι αρκετά μικρότερη από την συνεισφορά των ΘΗΣ.



Σχήμα 5: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και διείσδυση ενεργειακών πηγών ανά ημέρα στο ΣΜ

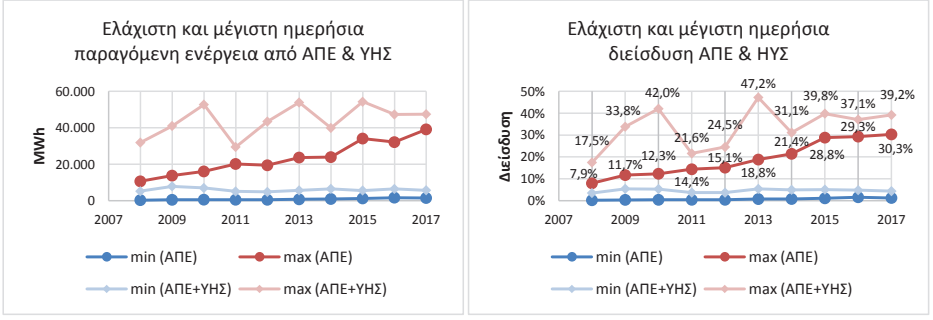
Η ημερήσια διείσδυση ΑΠΕ και ΥΗΣ είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, με την πρώτη να εξαρτάται κυρίως από την εγκατεστημένη ισχύ και το διαθέσιμο δυναμικό, ενώ η διείσδυση των ΥΗΣ εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από το διαθέσιμο υδάτινο δυναμικό (ποσότητα βροχοπτώσεων κατά την διάρκεια του έτους) καθώς η εγκατεστημένη ισχύς των ΥΗΣ τα τελευταία δέκα έτη παραμένει αμετάβλητη.

Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται οι ετήσιες καμπύλες διάρκειας της ημερήσιας παραγόμενης ενέργειας και της ημερήσιας διείσδυσης των ΑΠΕ και των ΥΗΣ. Από τις καμπύλες αυτές προκύπτει η διάρκεια, σε ημέρες, κατά την οποία η ημερήσια παραγόμενη ενέργεια ή η ημερήσια διείσδυση είναι μεγαλύτερη από κάποια τιμή. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, το 2015, η διείσδυση των ΑΠΕ ήταν μεγαλύτερη του 10% για περίπου 125 ημέρες, ενώ το 2016 και το 2017 ο αντίστοιχος αριθμός των ημερών ανήλθε σε περίπου 150 και 165 ημέρες αντίστοιχα.



Σχήμα 6: Ετήσια καμπύλη διάρκειας της ημερήσιας παραγόμενης ενέργειας και της ημερήσιας διείσδυσης των ΑΠΕ και των ΥΗΣ στο Σύστημα Μεταφοράς

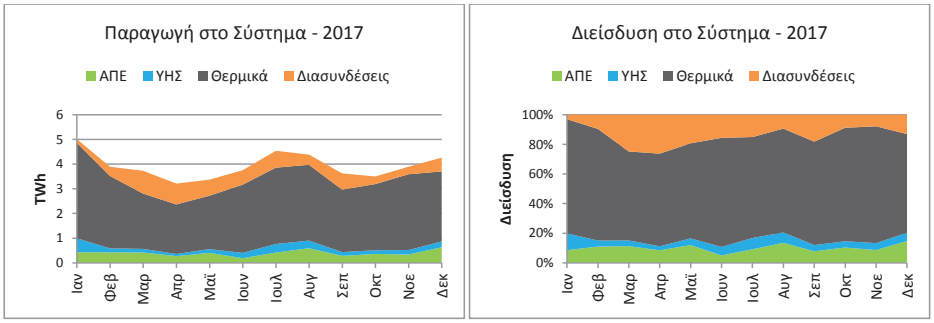
Η ελάχιστη και μέγιστη ημερήσια παραγόμενη ενέργεια και η αντίστοιχη διείσδυση από ΑΠΕ και ΥΗΣ φαίνεται στο Σχήμα 7, από όπου διαπιστώνεται η συνεχής αύξηση της μέγιστης ημερήσιας διείσδυσης των ΑΠΕ, που από 7,9% το 2008 ανήλθε στο 30,3% το 2017. Δεν ισχύει όμως το ίδιο και για την συνδυασμένη διείσδυση ΑΠΕ & ΥΗΣ, που κάποιες χρονιές αυξάνεται (υγρό υδρολογικό έτος), ενώ κάποιες άλλες μειώνεται (ξηρό υδρολογικό έτος). Η συνδυασμένη μέγιστη ημερήσια διείσδυση ΑΠΕ & ΥΗΣ έφτασε στην μεγαλύτερη μέχρι τώρα τιμή της κατά το 2013, όπου ξεπέρασε το 47%.



Σχήμα 7: Ελάχιστη και μέγιστη ημερήσια παραγόμενη ενέργεια και διείσδυση ΑΠΕ & ΥΗΣ στο ΣΜ

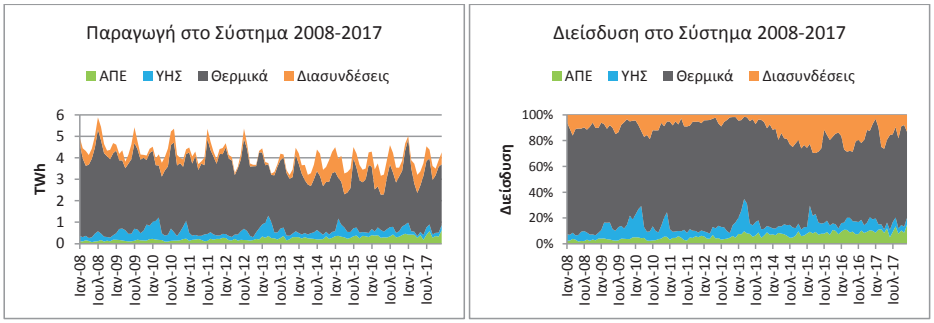
3.1.3. Μηνιαία αποτελέσματα (με βάση τα ημερήσια)

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται η μηνιαία παραγόμενη ενέργεια και η αντίστοιχη διείσδυση για τις 4 ενεργειακές πηγές του ΣΜ. Όπως φαίνεται από το εν λόγω σχήμα το μέγιστο φορτίο ζήτησης στο ΣΜ, που εμφανίζεται συνήθως τους μήνες Ιούλιο/Αύγουστο ή Δεκέμβριο/Ιανουάριο, καλύπτεται κυρίως με την αύξηση της παραγωγής των ΘΗΣ. Η μηνιαία συνεισφορά των ΑΠΕ παρουσιάζει κάποιες διακυμάνσεις λόγω του μεταβαλλόμενου αιολικού και ηλιακού δυναμικού. Ωστόσο, σε πολλές περιπτώσεις η μειωμένη αιολική παραγωγή αντισταθμίζεται από την αυξημένη Φ/Β παραγωγή και αντιστρόφως. Από την άλλη πλευρά, η μηνιαία συνεισφορά των ΥΗΣ συνήθως μεταβάλλεται πιο έντονα κατά την διάρκεια του έτους, αφού εξαρτάται από το διαθέσιμο υδάτινο δυναμικό, αλλά και από τις αποφάσεις του Διαχειριστή του Συστήματος.



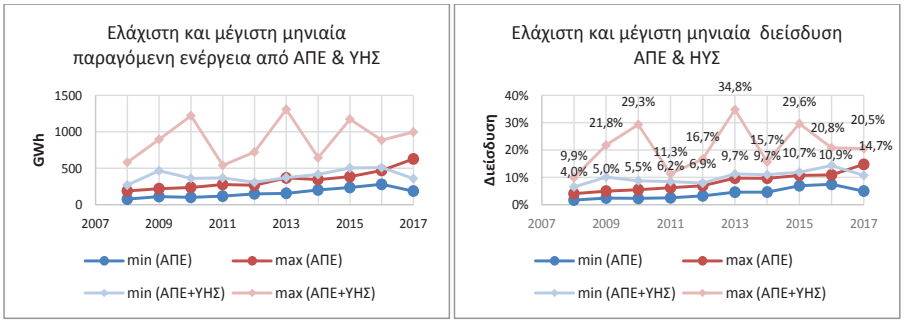
Σχήμα 8: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και διείσδυση ενεργειακών πηγών ανά μήνα στο ΣΜ

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται η μηνιαία παραγόμενη ενέργεια και η αντίστοιχη διείσδυση των ενεργειακών πηγών του ΣΜ για τη δεκαετία 2008-2017. Από το εν λόγω σχήμα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα: α) Η διείσδυση των ΑΠΕ αυξάνεται συνεχώς λόγω της αντίστοιχης αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος τους. Οι μικρές διακυμάνσεις που παρατηρούνται οφείλονται στο διαθέσιμο δυναμικό των ΑΠΕ. β) Η διείσδυση των ΥΗΣ εξαρτάται αποκλειστικά και μόνο από το διαθέσιμο υδάτινο δυναμικό, αφού η εγκατεστημένη τους ισχύς παρέμεινε σταθερή. γ) Οι εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκαν σημαντικά από τον Ιανουάριο του 2014 και μετά. δ) Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στο ΣΜ μειώνεται από το 2008 και έπειτα, το ίδιο συμβαίνει και με την μέγιστη μηνιαία ζήτηση ανά έτος. ε) Η μέγιστη μηνιαία ζήτηση ανά έτος εμφανίζεται είτε τον Ιούλιο/Αύγουστο, είτε το Δεκέμβριο/Ιανουάριο.



Σχήμα 9: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και διείσδυση ενεργειακών πηγών ανά μήνα στο ΣΜ

Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται η ελάχιστη και μέγιστη μηνιαία παραγόμενη ενέργεια και η αντίστοιχη διείσδυση από ΑΠΕ και ΥΗΣ, από όπου διαπιστώνεται η συνεχής αύξηση της μέγιστης μηνιαίας διείσδυσης των ΑΠΕ, που από 4,0% το 2008 ανήλθε στο 14,7% το 2017. Δεν ισχύει όμως το ίδιο και για την συνδυασμένη διείσδυση ΑΠΕ & ΥΗΣ, που κάποιες χρονιές αυξάνεται (υγρό υδρολογικό έτος), ενώ κάποιες άλλε μειώνεται (ξηρό υδρολογικό έτος). Η συνδυασμένη μέγιστη μηνιαία διείσδυση ΑΠΕ & ΥΗΣ έφτασε στην μεγαλύτερη μέχρι τώρα τιμή της κατά το 2013, όπου σχεδόν άγγιξε το 35%. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε μηνιαία βάση, η ελάχιστη συνδυασμένη διείσδυση ΑΠΕ & ΥΗΣ συνήθως ξεπερνά την μέγιστη μηνιαία διείσδυση των ΑΠΕ, κάτι που δεν συμβαίνει σε καμία περίπτωση με τις αντίστοιχες ωριαίες ή ημερήσιες διεισδύσεις. Αυτό δείχνει την σημαντική συνεισφορά των ΥΗΣ στην αύξηση της διείσδυσης των «καθαρών» πηγών (ΑΠΕ & ΥΗΣ) σε μακροπρόθεσμη βάση (μηνιαία και ετήσια).



Σχήμα 10: Ελάχιστη και μέγιστη μηνιαία παραγόμενη ενέργεια και διείσδυση ΑΠΕ & ΥΗΣ στο ΣΜ

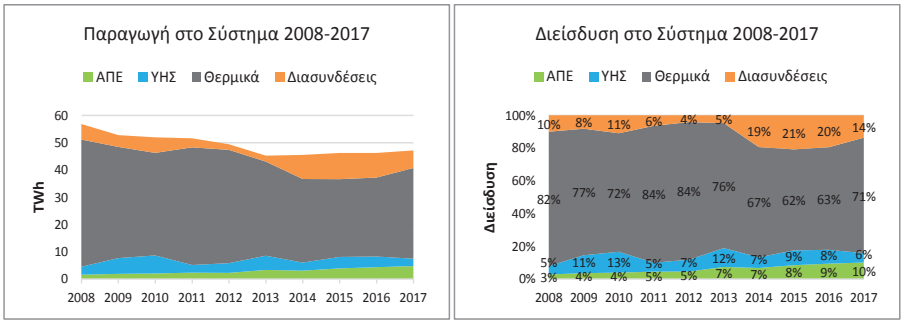
3.1.4. Ετήσια αποτελέσματα (με βάση τα ωριαία)

Στο Σχήμα 11 απεικονίζεται η εξέλιξη της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας και της αντίστοιχης διείσδυσης των ενεργειακών πηγών του ΣΜ από το 2008 και μετά. Την περίοδο 2008-2013 υπήρξε συνεχής μείωση της καθαρής ζήτησης του ΣΜ, ως συνέπεια της οικονομικής κρίσης αλλά και της αύξησης της διεσπαρμένης παραγωγής στο Δίκτυο. Έκτοτε, παρατηρείται μια μικρή τάση αύξησης.

Κατά το ίδιο διάστημα, η ετήσια διείσδυση των **ΑΠΕ** στο Σύστημα Μεταφοράς (**ΣΜ**) σημείωσε συνεχή αύξηση, ως αποτέλεσμα της αύξησης της εγκατεστημένης τους ισχύος. Έτσι, η παραγόμενη ενέργεια (και η διείσδυση) των ΑΠΕ από 1,57 TWh (2,8%) το 2008, ανήλθε στις **4,75 TWh** (**10,1%**) το **2017**.

Αν και η εγκατεστημένη ισχύς των ΥΗΣ στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα είναι σημαντική (~18%), η συνεισφορά τους στο ενεργειακό ισοζύγιο είναι σχετικά μικρή. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα νερών έχει ως αποτέλεσμα οι υδροηλεκτρικές μονάδες να χρησιμοποιούνται κυρίως για τη κάλυψη των αιχμών. Έτσι ο συντελεστής χρησιμοποίησης τους κυμαίνεται από 10-20%, ανάλογα με τις υδραυλικές συνθήκες κάθε έτους. Η παραγωγή των **ΥΗΣ** στο **ΣΜ** (και η αντίστοιχη διείσδυση τους) την περίοδο **2008-2017** κυμάνθηκε από 2,93 TWh (5%) το 2008 έως 6,61 TWh (13%) το 2010. Κατά την ίδια περίοδο, η **μέση ετήσια παραγωγή** τους ήταν **4,07 TWh**. Ενώ το 2017 παρήγαγαν 2,7 TWh (5,7%).

Οι εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας, από το 2014 και έπειτα έχουν αυξηθεί σημαντικά, σε επίπεδο διείσδυσης περί το 20%, ξεπερνώντας τη συνολική διείσδυση από ΑΠΕ & ΥΗΣ. Η αύξηση των καθαρών εισαγωγών συνοδεύτηκε από αντίστοιχη μείωση της παραγωγής των ΘΗΣ.



Σχήμα 11: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και διείσδυση ενεργειακών πηγών ανά έτος στο ΣΜ

3.2. Ετήσια διείσδυση ΑΠΕ και ΥΗΣ στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα

Η εγκατεστημένη ισχύς των ΑΠΕ στο ΔΣ αυξήθηκε σημαντικά την τελευταία δεκαετία (Σχήμα 12 και Πίνακας 2) από τα 1,1 GW το 2008 στα 5,3 GW το 2017 σημειώνοντας μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης 20,1%. Ειδικά, την περίοδο 2009-2013 ο μέσος ετήσιος ρυθμός αύξησης ήταν 32,6%, ενώ από εκεί και έπειτα μειώθηκε στο 4,5%. Το μεγαλύτερο μέρος της εγκατεστημένης ισχύος των ΑΠΕ το μοιράζονται τα Α/Π και οι Φ/Β σταθμοί. Τα Α/Π αύξησαν την εγκατεστημένη τους ισχύ από τα 791 MW το 2008 στα 2.302 MW το 2017, με μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης περί το 12,8%. Κατά την ίδια περίοδο, η εγκατεστημένη ισχύς των Φ/Β σταθμών αυξήθηκε από τα 11 MW στα 2.094 MW, με μέσο ετήσιο

ρυθμό περί το 200% έως το 2013, ενώ από εκεί και μετά η ισχύς τους μεταβλήθηκε ελάχιστα. Στις λοιπές τεχνολογίες ΑΠΕ, αξιοσημείωτη ήταν η αύξηση των Φ/Β στις στέγες, τα οποία από τα 11 MW το 2010 ανήλθαν στα 350 MW το 2013, όπου και παραμένουν έως και σήμερα. Κατά την περίοδο 2008-2017, η ισχύς των ΜΥΗΣ αυξήθηκε από τα 158 MW στα 230 MW, η ισχύς των ΣΒΙΟ από τα 39 MW στα 61 MW και τέλος η ισχύς των ΣΗΘΥΑ αυξήθηκε από τα 99 MW στα 233 MW (συμπεριλαμβανομένης και της ισχύος προτεραιότητας της κατανεμόμενης μονάδας ΣΗΘΥΑ της «ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΝ», σύμφωνα με την Απόφαση της ΡΑΕ υπ' αρ. 341/2013). Η παραγόμενη ενέργεια και η αντίστοιχη διείσδυση των ΑΠΕ εξαρτάται από την εγκατεστημένη τους ισχύ και από τον συντελεστή χρησιμοποίησης της κάθε τεχνολογίας (Σχήμα 12 και Πίνακας 2). Αντίθετα η παραγωγή των ΥΗΣ εξαρτάται πρωτίστως από τις υδραυλικές συνθήκες του κάθε έτους και την διαχείρισή τους.



Σχήμα 12: Ισχύς, παραγόμενη ενέργεια, διείσδυση και συντελ. χρησιμοποίησης ΑΠΕ & ΥΗΣ στο ΔΣ

Η παραγωγή ενέργειας από **ΑΠΕ** (και η αντίστοιχη διείσδυση τους) **στο ΔΣ** σημείωσε συνεχή αύξηση, ως αποτέλεσμα της αύξησης της εγκατεστημένης τους ισχύος (Πίν. 2). Έτσι, από τις 2,203 TWh (3,9%) το 2008, ανήλθε στις **10,54 TWh** (**20,2%**) το **2017**, εκ των οποίων, οι 4,75 TWh (9,12%) παρήχθησαν στο ΣΜ και οι υπόλοιπες 5,79 TWh (11,1%) στο Δίκτυο Διανομής. Κατά την ίδια περίοδο, ο ετήσιος συντελεστής χρησιμοποίησης των ΑΠΕ στο ΔΣ κυμάνθηκε από 22-27% με μέση τιμή **24,5%.**

Η συνεισφορά των **ΥΗΣ** στο ενεργειακό ισοζύγιο του **ΔΣ** είναι σχετικά μικρή σε σχέση με την εγκατεστημένη τους ισχύ. Ο συντελεστής χρησιμοποίησης τους κυμαίνεται από 11-25%, ανάλογα με τις υδραυλικές συνθήκες κάθε έτους. Η παραγωγή των ΥΗΣ (και η αντίστοιχη διείσδυση τους) κατά την περίοδο 2008-2017 κυμάνθηκε από 2,973 TWh (5,3%) το 2008 έως 6,703 TWh (12,5%) το 2010, με **μέση ετήσια παραγωγή** στις **4,544 TWh** (**8,7%**). Το 2017 παρήγαγαν 3,457 TWh (6,6%).

Πίνακας 2: Παραγωγή ΑΠΕ και ΥΗΣ στο ΔΣ κατά την περίοδο 2008-2017

Έτος	ΑΠΕ				ΥΗΣ			
	Εγκ. Ισχύς	Παραγωγή	Διείσδυση	CF	Εγκ. Ισχύς	Παραγωγή	Διείσδυση	CF
	MW	GWh	%	%	MW	GWh	%	%
2008	1.098	2.203	3,9%	25,2	3.018	2.973	5,3	11,2
2009	1.327	2.937	5,5%	26,9	3.018	4.955	9,3	18,7
2010	1.566	3.256	6,1%	26,3	3.018	6.703	12,5	25,4
2011	2.236	3.959	7,5%	25,0	3.018	3.675	6,9	13,9
2012	3.238	5.686	10,8%	24,3	3.018	3.892	7,4	14,7
2013	4.425	8.931	17,6%	24,0	3.018	5.640	11,1	21,3
2014	4.598	8.750	17,4%	22,2	3.018	3.906	7,8	14,8
2015	4.728	9.723	18,9%	23,7	3.018	5.391	10,5	20,4
2016	5.007	10.253	20,0%	23,9	3.018	4.843	9,5	18,3
2017	5.271	10.539	20,2%	23,5	3.018	3.457	6,6	13,0

3.3. Ετήσια παραγωγή και διείσδυση ΑΠΕ στα ΜΔΝ

Στον Πίν. 3 φαίνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στα ΜΔΝ, η διείσδυση (δ) και η αντίστοιχη εγκατεστημένη ισχύς για τα έτη 2010 έως και το Νοέμβριο του 2017.

Πίνακας 3: Παραγωγή ΑΠΕ στα ΜΔΝ κατά την περίοδο 2010-Νοέμβρ.2017 [3]

Έτος	Ζήτηση	Α/Π		Φ/Β		Φ/Β στεγών		ΜΥΗΣ		ΣΒΙΟ		ΣΥΝΟΛΟ		
	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	MW	GWh	δ
2010	5.638,3	258,7	652,3	38,2	25,8			0,3	0,4			297,1	678,5	12%
2011	5.596,6	277,4	719,4	82,7	114,1			0,3	0,8			360,5	834,3	15%
2012	5.608,0	287,3	689,3	112,4	183,7	19,8	22,3	0,3	0,9			419,8	896,3	16%
2013	5.395,2	289,6	747,3	135,8	239,7	22,6	32,0	0,3	0,5			448,4	1019,5	19%
2014	5.470,4	315,9	679,3	135,9	234,9	23,3	36,6	0,3	0,0			475,4	950,8	17%
2015	5.609,1	316,7	764,9	136,0	234,7	37,9	24,9	0,3	0,4			490,9	1024,9	18%
2016	5.729,4	322,9	815,0	136,0	243,1	36,2	23,5	0,3	0,5			495,3	1082,1	19%
2017	5.463,5	322,2	697,0	135,9	225,6	33,8	23,6	0,3	0,4	0,5	1,8	492,7	948,4	17%

3.4. Απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ για την επίτευξη του εθνικού στόχου διείσδυσης των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή το 2020

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα καθώς και τις προβλέψεις του ΑΔΜΗΕ (Μελέτη Επάρκειας Ισχύος 2017-2027) για την εξέλιξη της ζήτησης κατά τα επόμενα 10 χρόνια (Σχ. 14) μπορεί να εκτιμηθεί η απαιτούμενη παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ & ΥΗΣ ώστε να επιτευχθεί ο εθνικός στόχος για την ετήσια διείσδυση τους στο 40% της ηλεκτροπαραγωγής κατά το 2020.

Για το σκοπό αυτό **θεωρείται ότι** η εγκατεστημένη ισχύς των ΥΗΣ μέχρι και το 2020 δεν θα υπερβεί τα 3.173 MW (3.018 MW σήμερα + 153 MW του «ΥΗΣ Ιλαρίωνα», που βρίσκεται σε δοκιμαστική λειτουργία από το 2014) και ότι η παραγωγή τους θα κυμανθεί γύρω στο μέσο όρο της προηγούμενης περιόδου 2008-2017, δηλαδή στις 4.544 GWh. Συνεπώς η παραγωγή των ΑΠΕ θα πρέπει να καλύπτει το 40% της ζήτησης του 2020 (βλ. Σχ. 14 και Πίν.3) μειωμένη κατά την παραγωγή των ΥΗΣ:

$$\mathrm{E_{ΑΠΕ}} + \mathrm{E_{ΥΗΣ}} = 40\% \cdot \text{Ζήτησης} \Rightarrow \mathrm{E_{ΑΠΕ}} = 40\% \cdot \text{Ζήτησης} - \mathrm{E_{ΥΗΣ}} \quad (1)$$

Η απαιτούμενη ισχύς των ΑΠΕ προκύπτει με βάση την απαιτούμενη παραγωγή ΑΠΕ και τον μέσο ετήσιο συντελεστή χρησιμοποίησης τους (23,5%), σύμφωνα με τη σχέση:

$$\mathrm{P_{ΑΠΕ}} = \frac{\mathrm{E_{ΑΠΕ}}}{8760 \cdot \mathrm{CF}} \quad (2)$$

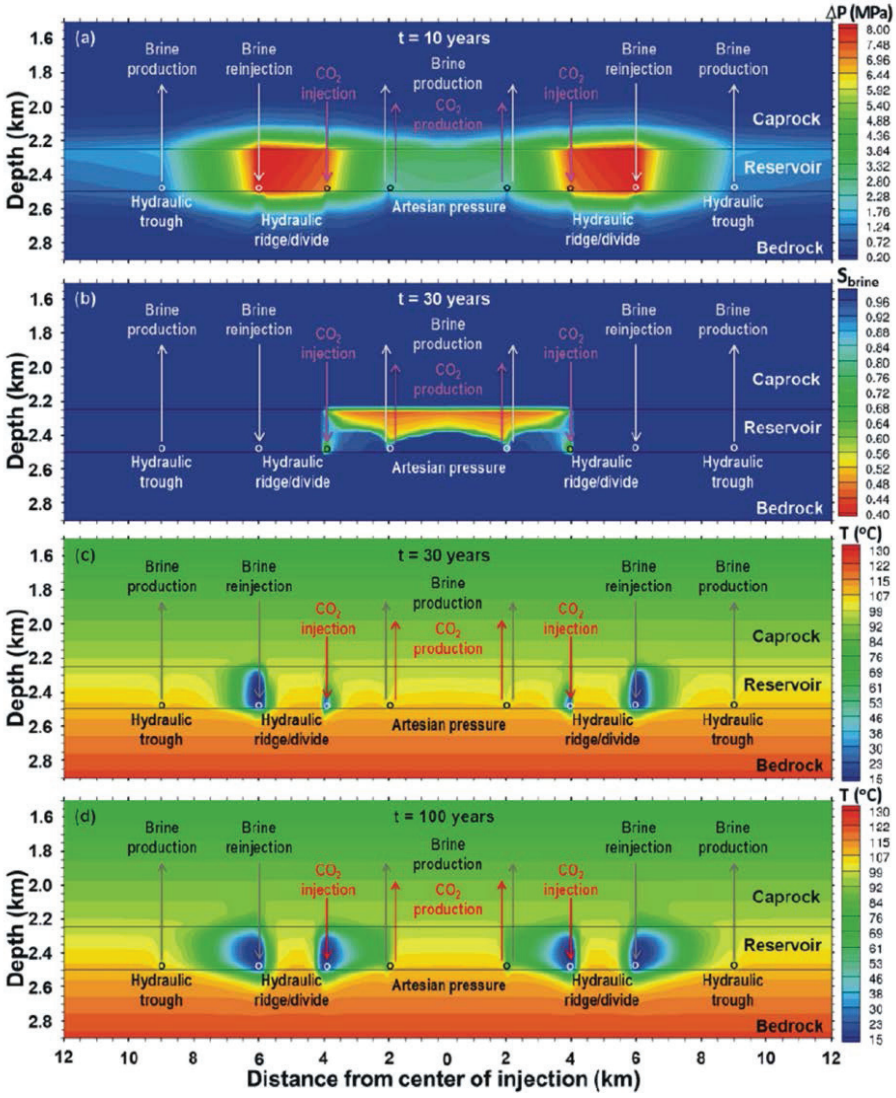
Οι Buscheck et al. (2012) εισήγαγαν μια υβριδική προσέγγιση, δύο σταδίων, για αποθήκευση CO_2 και παραγωγή γεωθερμικής ενέργειας από βαθείς, αλμυρούς υδροφορείς με χαμηλό περιβαλλοντικό κίνδυνο και μικρό κόστος. Μετά την έγχυση του CO_2, κατά το πρώτο στάδιο αυτής της υβριδικής προσέγγισης εξάγεται με άντληση η άλμη του σχηματισμού για «ανακούφιση» από την πίεση. Κατά το δεύτερο στάδιο και καθώς το CO_2 φτάνει στις παραγωγικές γεωτρήσεις, παράγονται μαζί άλμη και CO_2 ως εργαζόμενα μέσα. Η παραγόμενη άλμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως πρώτη ύλη παραγωγής γλυκού νερού με αφαλάτωση (αντίστροφη όσμωση), είτε ως αλμυρό νερό ψύξης, είτε ακόμη ως νερό συμπλήρωσης για έγχυση σε γειτονικό EGS. Ανάλογα με τη θερμοκρασία του σχηματισμού, η γεωθερμική ενέργεια που ανακτάται από την άλμη και το CO_2 μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια για την κάλυψη του κόστους της αλυσίδας CCS, ενώ είναι ωφέλιμη και για τη διαχείριση και αντιμετώπιση της ίδιας της αντίστροφης όσμωσης. Η προσέγγιση των Buscheck et al. (2012) έχει ως βάση την έννοια της έννοια της «Διαχείρισης Ενεργού Ταμιευτήρα CO_2 (Active CO_2 Reservoir Management, ACRM)», που συνδυάζει την απόληψη και μεταχείριση της άλμης καθώς και την επανεισαγωγή της υπολειμματικής άλμης με την έγχυση του CO_2 [25].

3.5. Χρήση του CO_2 ως ρευστού υποστήριξης πίεσης και εργαζόμενου μέσου

Το CO_2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ρευστό υποστήριξης της πίεσης ώστε να δημιουργούνται αρτεσιανές πιέσεις για την παραγωγή CO_2 και άλμης, προκειμένου αυτά τα ρευστά να χρησιμοποιηθούν ως εργαζόμενα μέσα για μεταφορά και απόληψη θερμότητας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την κατασκευή οριζόντιων γεωτρήσεων στον πυθμένα ταμιευτήρα, σε βάθος 2,5-5 km, δημιουργώντας τουλάχιστον 4 ομόκεντρους δακτυλίους παραγωγής και έγχυσης CO_2 και άλμης, που αποτελούνται από: (α) παραγωγούς (producers) άλμης/CO_2 εσωτερικού δακτυλίου, (β) εγχυτές (injectors) CO_2, (γ) επανεγχυτές (reinjectors) άλμης και (δ) παραγωγούς (producers) άλμης εξωτερικού δακτυλίου (Εικόνα 7). Στόχοι αυτής της διάταξης είναι: (α) η διατήρηση της πίεσης από εργασίες έγχυσης και η μεγιστοποίηση του οφέλους από την παραγωγή των ρευστών, (β) η ελαχιστοποίηση της απώλειας CO_2, (γ) η διαχείριση της υπερπίεσης προκειμένου να μειωθούν σχετικοί κίνδυνοι, όπως η επαγόμενη σεισμικότητα και η διαφυγή CO_2, (δ) ο καλύτερος έλεγχος του ρευστού και της ανάκτησης ενέργειας για βελτιωμένη αποτελεσματικότητα σάρωσης, (ε) ο διαχωρισμός των ζωνών παραγωγής CO_2 και άλμης, και (στ) η παροχή συμπληρωματικής υποστήριξης πίεσης και εργαζόμενων μέσων, τα οποία είναι χημικώς συμβατά με το σχηματισμό του ταμιευτήρα [26].

Η προαναφερθείσα διάταξη έχει τα ακόλουθα αποτελέσματα: (i) Δημιουργείται μια υδραυλική ράχη/χώρισμα (hydraulic ridge/divide), ως συνέπεια της ύπαρξης ζώνης υπερπίεσης μεταξύ των δακτυλίων έγχυσης CO_2 και άλμης, που περιορίζει την πλευρική μετανάστευση του CO_2 και διατηρεί συσσώρευση πίεσης από την έγχυση του CO_2, προκαλώντας έτσι την παραγωγή CO_2 στον εσωτερικό δακτύλιο και την παραγωγή μόνον άλμης στον εξωτερικό. (ii) Δημιουργούνται αρτεσιανές πιέσεις, οι οποίες προκαλούν μεγάλους ρυθμούς παραγωγής άλμης, που παράγουν σχεδόν αμέσως ηλεκτρική ενέργεια και παρέχουν σημαντικό μέρος της συνολικής ενέργειας. (iii) Εξαιτίας της διαφοράς πυκνότητας μεταξύ υπερκρίσιμου CO_2 και άλμης, η ύπαρξη μεσοδιαστημάτων παραγωγής (και έγχυσης) σε πολλαπλά βάθη μπορεί να επιτρέψει τον καλύτερο έλεγχο των σχετικών ρυθμών παραγωγής CO_2 και άλμης, βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα της σάρωσης. (iv) Όταν το μέτωπο του CO_2 φτάνει στη γεώτρηση παραγωγής, η ηλεκτρική ενέργεια που βασίζεται στο CO_2 αυξάνει, ενώ η ενέργεια που βασίζεται στην άλμη ελαττώνεται. (v) Αρχικά, στον εσωτερικό δακτύλιο παράγεται άλμη, η οποία επανεισάγεται, και μετά την πάροδο 5-8 ετών αρχίζει η παραγωγή CO_2, η ποσότητα του οποίου αυξάνει με το χρόνο περιορίζοντας την παραγωγή της άλμης. (vi) Ο εξωτερικός δακτύλιος δημιουργεί μια υδραυλική τάφρο (hydraulic trough) για τον περιορισμό της πλευρικής επέκτασης της υπερπίεσης και τη δέσμευση τυχόν CO_2 που μπορεί να περάσει από την υδραυλική ράχη. (vii) Όλη η άλμη που παράγεται στον εξωτερικό δακτύλιο επανεισάγεται. (viii) Η προτιμησιακή ροή του CO_2 ελαττώνεται με το βάθος κι έτσι το τμήμα του παραγόμενου CO_2 που ανακυκλώνεται ελαττώνεται με το βάθος, ενώ η καθαρή αποθήκευση του CO_2 αυξάνει. (ix) Η αύξηση του βάθους του πυθμένα του ταμιευτήρα από τα 2,5 στα 5 km τετραπλασιάζει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για μια περίοδο 100 ετών, ενώ τριπλασιάζονται οι πωλήσεις ηλεκτρικής ενέργειας ανά μετρικό τόνο αποθηκευμένου CO_2. (x) Η καθαρή αποθήκευση του CO_2 απελευθερώνει έναν ισοδύναμο όγκο άλμης συμπλήρωσης (make-up brine) για επανέγχυση με το πλεονέκτημα ότι προέρχεται από τον ίδιο σχηματισμό, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα χημικής ασυμβατότητας, που θα μπορούσε να προκύψει αν η άλμη προέρχονταν από διαφορετικό σχηματισμό. (xi) Η ετερογένεια των γεωλογικών σχηματισμών μπορεί να οδηγήσει είτε σε παραγωγή CO_2 νωρίτερα και να αυξήσει τη συμβολή της ενέργειας που βασίζεται στο CO_2 είτε να μειώσει την καθαρή αποθήκευση του CO_2. (xii) Στη διάταξη οριζόντιων γεωτρήσεων 5 δακτυλίων δημιουργείται πρόσθετος εσωτερικός δακτύλιος παραγωγής CO_2 στο ανώτερο τμήμα του ταμιευτήρα, ελαττώνοντας την υπερπίεση στο κέντρο του, αυξάνει η παραγωγή CO_2 και παράγεται

περισσότερη συνολική ενέργεια βασισμένη στην άλμη και το CO_2. Τα μέχρι σήμερα αποτελέσματα προσομοιώσεων και μοντελοποίησης έχουν δείξει ότι η προσέγγιση-πρόταση των οριζόντιων γεωτρήσεων, πολλαπλών δακτυλίων, με βάση την οποία το CO_2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την υποστήριξη της πίεσης και ως εργαζόμενο μέσο έχει τη δυνατότητα να βελτιώσει την οικονομική βιωσιμότητα της παραγωγής γεωθερμικής ενέργειας σε ιζηματογενείς σχηματισμούς [26].



Εικόνα 7: Οριζόντιες γεωτρήσεις με διάταξη τεσσάρων δακτυλίων για βάθος πυθμένα ταμιευτήρα 2,5km: (a) υπερπίεση ΔP στα 10 χρόνια, (b) κορεσμός άλμης S_{brine} στα 30 χρόνια και (c, d) θερμοκρασία T στα 30 και 100 χρόνια [26]

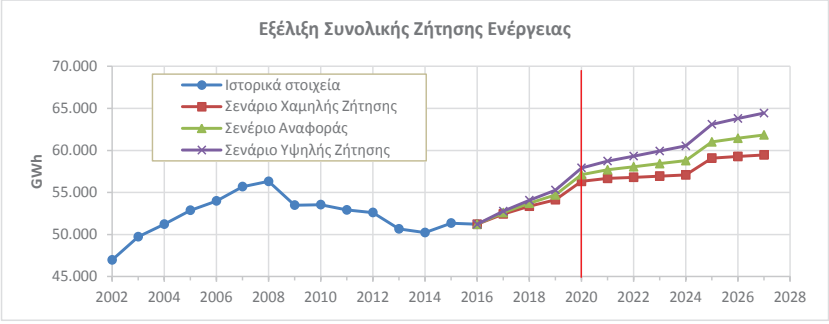
3.6. Χρήση διαλελυμένου CO_2 σε αλμυρούς υδροφορείς

Μια νέα προσέγγιση για συνδυασμένη χρήση γεωλογικής αποθήκευσης του CO_2 και ανάκτησης γεωθερμικής ενέργειας επιχειρείται μέσω του Ευρωπαϊκού Έργου CO_2-DISSOLVED (CO2

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των σχέσεων (1) και (2) φαίνονται στο Πίνακα 2 ως το Βασικό Σενάριο. Τα άλλα τρία σενάρια αφορούν σε α) αύξηση της ζήτησης κατά 10% επιπλέον της προβλεπόμενης το 2020, β) μείωση του CF των ΑΠΕ κατά 15% επί του μέσου ετήσιου της περιόδου 2008-2017 (π.χ. λόγω περικοπών) και γ) μειωμένη ενεργειακή συνεισφορά των ΥΗΣ κατά 20% επί της μέσης ετήσιας ενέργειας για την ίδια περίοδο (π.χ. ξηρό υδρολογικό έτος).

Συνεπώς, για την επίτευξη του στόχου το 2020, εκτιμάται ότι θα **πρέπει να εγκατασταθούν επιπλέον 4 – 5 GW ΑΠΕ**, ώστε η συνολική εγκατεστημένη ισχύς τους το 2020 να ανέλθει στα 9 – 10 GW περίπου, με την παραδοχή ότι η εγκατεστημένη ισχύς των ΥΗΣ θα παραμείνει σταθερή. Τέλος, σε περίπτωση που η ζήτηση παραμείνει στα επίπεδα του 2017 (π.χ. λόγω εφαρμογής μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας) θα απαιτηθούν επιπλέον 3 GW ΑΠΕ περίπου σε σχέση με το 2017 ώστε να καλυφθεί ο στόχος το 2020.

Σημείωση: στην παραπάνω ανάλυση δεν έχει ληφθεί υπόψη η ζήτηση στα ΜΔΝ και η αντίστοιχη συνεισφορά των ΑΠΕ σε αυτά.



Σχήμα 13: Προβλέψεις ΑΔΜΗΕ για την εξέλιξη της συνολικής καθαρής ζήτησης στο ΔΣ κατά την περίοδο 2017-2027 [4], [5]

Πίνακας 4: Σενάρια εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ για την κάλυψη του εθνικού στόχου διείσδυσης των ΑΠΕ& ΥΗΣ στην ηλεκτροπαραγωγή το 2020 στο 40% της ζήτησης

	Σενάριο	Χαμηλής Ζήτησης	Αναφοράς	Υψηλής Ζήτησης
Εκτιμώμενη Ζήτηση (GWh)		56.310	57.110	57.920
Απαιτούμενη Παραγωγή ΑΠΕ (GWh)		17.980	18.300	18.624
Απαιτούμενη Ισχύς ΑΠΕ (GW)	1. Βασικό Σενάριο	8,300	8,529	8,680
	2. 10% αύξηση ζήτησης	9,218	9,382	9,548
	3. 15% μείωση $CF_{ΑΠΕ}$	9,859	10,034	10,212
	4. 20% μείωση $E_{ΥΗΣ}$	10,056	10,235	10,416

4. Συμπεράσματα

Η διείσδυση των ΑΠΕ αυξάνεται συνεχώς την τελευταία δεκαετία, ως αποτέλεσμα της αύξησης της εγκατεστημένης τους ισχύος. Η διείσδυση των ΥΗΣ εξαρτάται από τις υδραυλικές συνθήκες κάθε έτους. Το 2017 η διείσδυση των ΑΠΕ (με / χωρίς ΥΗΣ) στο ΣΜ είχε ως εξής: μέγιστη ωριαία: 50,8% / 39,0%, μέγιστη ημερήσια: 39,2% / 30,3%, μέγιστη μηνιαία: 20,5% / 14,7% και ετήσια: 15,8% / 10,1%. Ένα αποτέλεσμα της αυξανόμενης διείσδυσης των ΑΠΕ είναι η αύξηση των ωρών κατά την διάρκεια του έτους που η παραγωγή των ΑΠΕ υποκαθιστά έναν ΘΗΣ. Έτσι, το 2017 η ενέργεια από ΑΠΕ (με / χωρίς ΥΗΣ) υποκατάστησε την παραγωγή ενός Λιγνιτικού ΘΗΣ 300 MW κατά 7238 / 5722 ώρες.

Η διείσδυση των ΑΠΕ στο ΔΣ έχει αυξηθεί σημαντικά από το 2010 και μετά. Ωστόσο ο ρυθμός αύξησης της νέας εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ παρουσιάζει μια μείωση τα τελευταία τέσσερα χρόνια με αποτέλεσα η ετήσια διείσδυση των ΑΠΕ να έχει φτάσει στο 20% χωρίς τους ΥΗΣ και στο 30% με την συμβολή των ΥΗΣ. Για την επίτευξη του εθνικού στόχου της χώρας για διείσδυση ΑΠΕ και ΥΗΣ στην ηλεκτροπαραγωγή μέχρι το 2020 στο 40% εκτιμάται ότι πρέπει να εγκατασταθούν επιπλέον 4 – 5 GW ΑΠΕ περίπου ώστε να καλυφθεί ο εθνικός στόχος, θεωρώντας ότι τα επόμενα τρία χρόνια η ισχύς των ΥΗΣ θα παραμείνει αμετάβλητη και η ζήτηση θα αυξηθεί σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του ΑΔΜΗΕ.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Διονύσιο Παπαχρήστου, Δρ. Ηλεκτρολόγο Μηχανικό ΕΜΠ, Ειδ. Επιστήμονα και Δ/ντη του Γραφείου Τύπου και Δημοσίων Σχέσεων της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας, για την ευκαιρία που μου έδωσε με την ανάθεση αυτής της εργασίας, στο πλαίσιο της Πρακτικής μου Άσκησης στη ΡΑΕ, να ασχοληθώ και να εμβαθύνω σε ένα τόσο ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα, όπως αυτό της διείσδυσης των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή της Ελλάδος.

Ευχαριστώ επίσης θερμά τους Ιωάννη Μαύρο και Ιωάννη Νίκα, συνεργάτες μου στην ανάλυση και επεξεργασία αυτού του θέματος, για την άψογη και εποικοδομητική συνεργασία τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Λ.ΑΓ.Η.Ε. Α.Ε., Μηνιαίο Δελτίο Συστήματος Συναλλαγών ΗΕΠ, Δεκέμβριος 2017, σελ. 4-5.

[2] Λ.ΑΓ.Η.Ε. Α.Ε, Μηνιαίο Δελτίο Ειδικού Λογαριασμού ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ Διασυνδεδεμένου Συστήματος και Δικτύου, Δεκέμβριος 2017, σελ. 4-6.

[3] Δ.Ε.Δ.Δ.Η.Ε. Α.Ε., Μηνιαία Δελτία ΑΠΕ και Θερμικής Παραγωγής στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά, Πληροφοριακό Δελτίο Παραγωγής στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά για τον Νοέμβριο 2017.

[4] Α.Δ.Μ.Η.Ε. Α.Ε., Δεκαετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς 2018-2027.

[5] Α.Δ.Μ.Η.Ε. Α.Ε., Μελέτη Επάρκειας Ισχύος για την Περίοδο 2017-2027.

ΤΟ ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ ΝΕΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΩΝ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ Η ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ

Δρ. Διονύσιος Παπαχρήστου[1]*, Παναγιώτα Καπετανά[1], Παναγιώτης Δαλιούρης[1], Θανάσης Πετμεζάς[2]

[1*] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ),
e-mail: papachristou@rae.gr
[2]cosmoONE Hellas Marketsite S.A.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πρόσφατη έγκριση του μηχανισμού στήριξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην Ελλάδα ("sliding Feed In Premium" που εγκρίθηκε και δημοσιεύτηκε στην Απόφαση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής C(2016) 7272 επί της κοινοποίησης του εθνικού σχήματος λειτουργικής ενίσχυσης ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ, SA 44666), έθεσε το πλαίσιο του ενεργειακού σχεδιασμού της χώρας για την επίτευξη των δεσμευτικών στόχων έως το 2020, με γνώμονα το μικρότερο δυνατό κόστος προς τους καταναλωτές και την ελάχιστη επιβάρυνση του Ειδικού Λογαριασμού του άρθ. 143 του ν. 4001/2011. Βάσει αυτού του πλαισίου, εκτιμάται ότι η πρόσθετη ισχύς ΑΠΕ, που θα πρέπει να εγκατασταθεί, ανέρχεται σε 2.200 – 2.700 MW.

Λαμβάνοντας υπόψη τις «*Κατευθυντήριες Γραμμές για τις κρατικές ενισχύσεις στους τομείς του περιβάλλοντος και της ενέργειας (2014-2020)*» (Ανακοίνωση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής 2014/C 200/01), καθώς και τις διατάξεις του ν. 4414/2016 «*Νέο καθεστώς στήριξης των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης - Διατάξεις για το νομικό και λειτουργικό διαχωρισμό των κλάδων προμήθειας και διανομής στην αγορά του φυσικού αερίου και άλλες διατάξεις*», η ΡΑΕ διενήργησε το 2016 την Πιλοτική Ανταγωνιστική Διαδικασία υποβολής προσφορών για επιλογή φωτοβολταϊκών (Φ/Β) εγκαταστάσεων προς ένταξη σε καθεστώς στήριξης με τη μορφή Λειτουργικής Ενίσχυσης, τηρώντας τις αρχές διαφάνειας και ισότητας, που πρέπει να διέπουν τις σχετικές ανταγωνιστικές διαδικασίες.

Το σύνολο της δημοπρατούμενης ισχύος φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων Κατηγορίας Ι (≤ 1MW) και Κατηγορίας ΙΙ (> 1MW) καθορίστηκε στην τιμή των 40 MW. Η υπ' αριθ. 417/2016 Προκήρυξη της ΡΑΕ (ΦΕΚ Β' 3627/09.11.2016) καθόρισε το πλαίσιο και τα κριτήρια συμμετοχής και αξιολόγησης, την ανώτατη επιτρεπόμενη τιμή προσφοράς, το χρονοδιάγραμμα διεξαγωγής της διαδικασίας, τις ρήτρες ολοκλήρωσης των έργων και τη διαδικασία υποβολής των προσφορών για τους συμμετέχοντες.

Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της πιλοτικής ανταγωνιστικής διαδικασίας, η οποία θα αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο κατά το σχεδιασμό των επικείμενων μόνιμων ανταγωνιστικών διαδικασιών για όλες τις τεχνολογίες ΑΠΕ που θα διεξαχθούν από τη ΡΑΕ στο πλαίσιο των αρμοδιοτήτων της και του μακροχρόνιου ενεργειακού σχεδιασμού της χώρας, αφού προηγηθεί η σχετική έγκριση του σχήματος κοινοποίησης από τη Γενική Διεύθυνση Ανταγωνισμού της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) και η έκδοση της σχετικής Υπουργικής Απόφασης.

Λέξεις Κλειδιά: *Μόνιμες Ανταγωνιστικές Διαδικασίες ΑΠΕ, Ηλεκτρονική Δημοπρασία, Πιλοτικός Διαγωνισμός Φ/Β*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με το ν. 4414/2016, και ειδικότερα το άρθρο επτά (7), οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ διέπονται από τις ακόλουθες διατάξεις: «*1. Από την 1η Ιανουαρίου 2017, τίθεται σε ισχύ καθεστώς στήριξης με τη μορφή Λειτουργικής Ενίσχυσης για τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ μέσω ανταγωνιστικής διαδικασίας υποβολής προσφορών. 2. Με απόφαση του Υπουργού Περιβάλλοντος και Ενέργειας, ύστερα από γνώμη της Ρ.Α.Ε., καθορίζονται οι τεχνολογίες ή και οι κατηγορίες σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ που εντάσσονται στην ανταγωνιστική διαδικασία υποβολής προσφορών της παρ. 1, ο χαρακτηρισμός των ανταγωνιστικών διαδικασιών υποβολής προσφορών ως «τεχνολογικά ουδέτερων» ή μη, η μεθοδολογία και η διαδικασία επιμερισμού ισχύος που προβλέπεται για συμμετοχή σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ που εγκαθίστανται σε χώρες εντός του Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου υπό την προϋπόθεση ενεργού Διασυνοριακού Εμπορίου ενέργειας με αυτές, καθώς και κάθε άλλο σχετικό θέμα.*» [9].

Περαιτέρω, το ως άνω σχετικό άρθρο 7 προβλέπει ότι «*5. Η ανταγωνιστική διαδικασία υποβολής προσφορών, προκηρύσσεται με απόφαση της Ρ.Α.Ε., στην οποία καθορίζονται τα κριτήρια συμμετοχής και αξιολόγησης, οι γεωγραφικοί ή άλλοι χωροταξικοί περιορισμοί, ο χρονικός ορίζοντας κατασκευής και λειτουργίας των επιλεγέντων σταθμών, στοιχεία για τις απαιτούμενες εγγυητικές επιστολές, τυχόν ρήτρες, τυχόν μείωση της Τ.Α. που προκύπτει στο πλαίσιο ανταγωνιστικής διαδικασίας υποβολής προσφορών για σταθμό ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ σε ένα Μ.Δ.Ν. μετά τη διασύνδεσή του με το Διασυνδεδεμένο Σύστημα και το Διασυνδεδεμένο Δίκτυο και κάθε άλλο θέμα σχετικό με τη διενέργεια της ανταγωνιστικής διαδικασίας. Για τη διενέργεια και την κατακύρωση των αποτελεσμάτων των ανταγωνιστικών διαδικασιών υποβολής προσφορών αρμόδια είναι η Ρ.Α.Ε. … 8. Ειδικά για το έτος 2016, εκδίδεται εντός τριών (3) μηνών από την έναρξη ισχύος του παρόντος, απόφαση της Ρ.Α.Ε. για την προκήρυξη της πιλοτικής ανταγωνιστικής διαδικασίας υποβολής προσφορών για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, με βάση τα αναφερόμενα στην παρ. 5, η οποία διενεργείται εντός του έτους 2016. Ειδικά για την εν λόγω διαδικασία το τέλος συμμετοχής της παρ. 6 καθορίζεται στα πεντακόσια (500) ευρώ για κάθε συμμετέχοντα σε αυτή.*» [9].

Η πιλοτική ανταγωνιστική διαδικασία διεξήχθη μέσω πρωτοποριακής, διαφανούς ηλεκτρονικής, μειοδοτικής δημοπρασίας τύπου Yankee Reverse, σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκε ηλεκτρονική υποβολή των αιτήσεων συμμετοχής, μέσω ειδικής πλατφόρμας, συνοδευόμενων από τα σχετικά απαραίτητα δικαιολογητικά, που προέβλεπε η Προκήρυξη της ΡΑΕ [9]. Στο δεύτερο στάδιο διενεργήθηκαν ηλεκτρονικές δημοπρασίες υποβολής προσφορών για κάθε Κατηγορία (Ι και ΙΙ) μεταξύ των συμμετεχόντων, που πληρούσαν τις προϋποθέσεις συμμετοχής και έγινε αποδεκτή η συμμετοχή τους στη δεύτερη φάση.

Από αυτή την πιλοτική ανταγωνιστική διαδικασία υποβολής προσφορών για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις αντλήθηκαν χρήσιμα και σημαντικά συμπεράσματα, τα οποία οδήγησαν στην υπ' αριθμ. 2/2017 Γνωμοδότηση της ΡΑΕ προς το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ) για τον τρόπο διεξαγωγής των μόνιμων ανταγωνιστικών διαδικασιών των έργων ΑΠΕ.

Με τη Γνωμοδότηση της ΡΑΕ προς το ΥΠΕΝ κατατέθηκαν οι επίσημες προτάσεις της χώρας για τη ρύθμιση του νέου πλαισίου στήριξης για τις ΑΠΕ, καθώς και ο τρόπος με τον οποίο η διαδικασία υποβολής προσφορών στο πλαίσιο ανταγωνιστικών διαδικασιών δύναται να υλοποιηθεί για ορισμένες τεχνολογίες, προκειμένου οι ενισχύσεις να χορηγούνται στο πλαίσιο αυτό βάσει σαφών, διαφανών και αμερόληπτων κριτηρίων σε συμμόρφωση με τις Κατευθυντήριες Γραμμές της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Εξαιρέσεις από το ευρωπαϊκό προτεινόμενο πλαίσιο δύνανται να γίνουν αποδεκτές, εφόσον: «*α) τα κράτη μέλη αποδεικνύουν ότι μόνον ένα ή πολύ περιορισμένος αριθμός έργων μπορούν να είναι επιλέξιμα ή β) τα κράτη μέλη αποδεικνύουν ότι μια ανταγωνιστική διαδικασία υποβολής προσφορών θα οδηγήσει σε υψηλότερα επίπεδα στήριξης (επί παραδείγματι για την αποφυγή στρατηγικής υποβολής προσφορών) ή γ) τα κράτη μέλη αποδεικνύουν ότι μια ανταγωνιστική διαδικασία υποβολής προσφορών θα οδηγήσει σε χαμηλά ποσοστά υλοποίησης του έργου (αποφυγή υπερβολικά χαμηλών προσφορών)*» [14].

Η διαδικασία αξιολόγησης της ελληνικής πρότασης από τη Γενική Διεύθυνση Ανταγωνισμού της Ε.Ε. είναι σε εξέλιξη, προκειμένου να ληφθεί η τελική επίσημη έγκριση του προτεινόμενου καθεστώτος των μόνιμων ανταγωνιστικών διαδικασιών και η διενέργειά τους υπό την αρμοδιότητα της ΡΑΕ.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η διενέργεια των ανταγωνιστικών διαδικασιών υποβολής προσφορών για σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ αποτελεί υποχρέωση της Ελλάδας ως Κράτος – Μέλος της Ε.Ε., με έναρξη ισχύος του καθεστώτος στήριξης με τη μορφή Λειτουργικής Ενίσχυσης για τους εν λόγω σταθμούς από την 1η Ιανουαρίου 2017. Προτού η ΡΑΕ διαμορφώσει τη Γνωμοδότησή της προς το ΥΠΕΝ, διενεργήθηκε, βάσει των οριζόμενων στις διατάξεις του ν. 4414/2016, υπό την πλήρη εποπτεία και αρμοδιότητά της, η πιλοτική ανταγωνιστική διαδικασία υποβολής προσφορών το Δεκέμβριο του έτους 2016. Για το λόγο αυτό συστάθηκε, κατόπιν εντολής της ολομέλειας της ΡΑΕ, μία Ομάδα Εργασίας, αποτελούμενη από επιστήμονες διαφορετικών ειδικοτήτων (ηλεκτρολόγους μηχανικούς, νομικούς, μηχανικούς Η/Υ και προγραμματιστές), στόχος της οποίας ήταν η αποτελεσματική διενέργεια της ανταγωνιστικής διαδικασίας για τις Φ/Β εγκαταστάσεις στο σύνολό της.

2.1. Προκαταρκτική ανάλυση του δυνητικού επενδυτικού ενδιαφέροντος

Προκειμένου να διενεργηθεί η ανταγωνιστική διαδικασία υποβολής προσφορών με ικανοποιητικό βαθμό ανταγωνισμού, απαιτείτο η πλήρης και σαφή εικόνα των έργων, που δυνητικά μπορούσαν να λάβουν μέρος σε αυτή. Η πιλοτική ανταγωνιστική διαδικασία για Φ/Β εγκαταστάσεις αφορούσε σε αδειοδοτικά ώριμα έργα. Ειδικότερα, για τα έργα της Κατηγορίας Ι (≤ 1MW), τα οποία εξαιρούνται από την υποχρέωση λήψης Άδειας Παραγωγής, σύμφωνα με τα άρθρα 3 και 4 του ν. 3468/2006, απαραίτητη προϋπόθεση συμμετοχής αποτελούσε η προσκόμιση Σύμβασης Σύνδεσης σε ισχύ, ενώ για τα έργα της Κατηγορίας ΙΙ (> 1MW), η Άδεια Παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή/και Σύμβαση Σύνδεσης και Οριστική Προσφορά Σύνδεσης, με την προϋπόθεση ότι έχει προσκομιστεί η εγγυητική επιστολή που απαιτείται σε κάθε περίπτωση προς το Διαχειριστή.



Εικόνα 1: Γεωγραφική απεικόνιση των έργων ΑΠΕ σε καθεστώς αξιολόγησης ή λειτουργίας [15]

Ο ν. 4414/2016 καθόρισε το ποσό της δημοπρατούμενης ισχύος για την πιλοτική ανταγωνιστική διαδικασία στα 40 MW, τα οποία θα έπρεπε να επιμεριστούν στις δύο Κατηγορίες έργων Ι και ΙΙ κατά τρόπο ώστε να τηρούνται τα οριζόμενα στις διατάξεις της Παρ. 9 του άρθρου 7 του εν λόγω Νόμου, και συγκεκριμένα: «*β) Η δημοπρατούμενη ισχύς επιμερίζεται μεταξύ φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων που υποχρεούνται σε λήψη άδειας παραγωγής και φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων που εξαιρούνται από την*

υποχρέωση λήψης άδειας παραγωγής, σύμφωνα με τα άρθρα 3 και 4 του ν. 3468/2006 (Α΄129). Ο ακριβής επιμερισμός της προς προκήρυξη ισχύος καθορίζεται στην απόφαση της παρ. 8, ενώ η προκηρυσσόμενη ισχύς για τις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις που εξαιρούνται από την υποχρέωση λήψης άδειας παραγωγής, σύμφωνα με το άρθρο 4 του ν. 3468/2006 (Α΄ 129) δεν μπορεί να υπερβαίνει το 20% της συνολικά δημοπρατούμενης ισχύος».

Η Ολομέλεια της ΡΑΕ αποφάσισε ως προς τον ακριβή επιμερισμό της ισχύος μεταξύ των δύο Κατηγοριών Ι και ΙΙ, αφού έλαβε υπόψη τα στοιχεία που κατατέθηκαν από τους Διαχειριστές Δικτύου και Συστήματος, τη ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. και την ΑΔΜΗΕ Α.Ε., τα οποία αφορούσαν στα έργα ΑΠΕ, που έχουν ολοκληρώσει την αδειοδοτική διαδικασία, όπως ορίζεται παραπάνω, και, ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ τους, έχουν καταθέσει εγγυητικές επιστολές προς τους Διαχειριστές. Η συμμετοχή των ώριμων έργων στη συγκεκριμένη διαδικασία αποτελούσε προϋπόθεση στα οριζόμενα της Παρ. 9, στο άρθρο 7 του ν. 4414/2016, σύμφωνα με τα οποία «*ε) Για τις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις που θα επιλεγούν μέσω της πιλοτικής ανταγωνιστικής διαδικασίας, η ενεργοποίηση της σύνδεσης (θέση σε κανονική ή δοκιμαστική λειτουργία) κατά περίπτωση πρέπει να λάβει χώρα εντός: αα. 18 μηνών από την οριστική κατακύρωση του αποτελέσματος της διαδικασίας για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις με ισχύ ≤1MWp, ββ. 24 μηνών από την οριστική κατακύρωση του αποτελέσματος της διαδικασίας για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις με ισχύ >1MWp*».

Βάσει των σχετικών στοιχείων, που κατατέθηκαν από τους αρμόδιους Διαχειριστές για τη δυνητική συμμετοχή των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων στην εν λόγω πιλοτική ανταγωνιστική διαδικασία, εκτιμήθηκε ότι η συνολική δημοπρατούμενη ισχύς δεν μπορεί να υπερβαίνει τα 40 MW, και σε κάθε μία από τις δύο Κατηγορίες το ποσοστό συμμετοχής πρέπει να είναι τουλάχιστον 40% πλέον της δημοπρατούμενης ισχύος, προκειμένου να ικανοποιηθεί στο ελάχιστο δυνατό επίπεδο ο επιθυμητός ανταγωνισμός. Με αυτό τον τρόπο, τέθηκε σε ισχύ ως προϋπόθεση συμμετοχής στην Προκήρυξη της ΡΑΕ ο Κανόνας 40%, ο οποίος αναλύεται στο επόμενο Κεφάλαιο. Ως αποτέλεσμα, στην Κατηγορία Ι (≤ 1MW) η δημοπρατούμενη ισχύς ορίστηκε στα 4,8 MW και στην Κατηγορία ΙΙ (> 1MW) στα 35,2 MW.

Η ανώτατη επιτρεπόμενη τιμή υποβολής προσφοράς στο πλαίσιο της πιλοτικής ανταγωνιστικής διαδικασίας ορίστηκε από το ν. 4414/2016 για τις εξαιρούμενες από την υποχρέωση λήψης άδειας παραγωγής φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις (Κατηγορία Ι, ≤ 1MW) σε 104 €/MWh και για τις υπόχρεες σε λήψη άδειας παραγωγής φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις (Κατηγορία ΙΙ, > 1MW) σε 94 €/MWh.

2.2. Όροι και Προϋποθέσεις της Προκήρυξης

Τα σημαντικότερα στοιχεία της Απόφασης της ΡΑΕ αναφορικά με την Προκήρυξη της πιλοτικής ανταγωνιστικής διαδικασίας (υπ' αριθ. 417/2016 Απόφαση ΡΑΕ, ΦΕΚ Β' 3627/09.11.2016) αφορούσαν στη διεξαγωγή της ανταγωνιστικής διαδικασίας μέσω ηλεκτρονικής πλατφόρμας, ειδικά διαμορφωμένης για το σκοπό αυτό, στον καθορισμό των κριτηρίων συμμετοχής και αξιολόγησης των συμμετεχόντων, στις απαραίτητες ρήτρες για τη συμμετοχή και την τήρηση των προθεσμιών και στην εισαγωγή Κανόνων προς τους συμμετέχοντες.

2.2.1. Διαδικασία της διεξαγωγής της πιλοτικής ανταγωνιστικής διαδικασίας

Η πιλοτική ανταγωνιστική διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια:

- Στάδιο Α': Εγγραφή στην Ηλεκτρονική Πλατφόρμα και κατάθεση Δικαιολογητικών Συμμετοχής.
- Στάδιο Β': Συμμετοχή στην Ηλεκτρονική δημοπρασία της Πιλοτικής Ανταγωνιστικής Διαδικασίας – Αποτελέσματα.

Οι συμμετέχοντες αρχικά κλήθηκαν να εγγραφούν στην ηλεκτρονική πλατφόρμα διεξαγωγής της ανταγωνιστικής διαδικασίας, ώστε να μπορούν να καταθέσουν ηλεκτρονικά την αίτηση συμμετοχής τους, καθώς και να υποβάλλουν, μέσω της πλατφόρμας σε μη επεξεργάσιμη μορφή ("pdf"), όλα τα απαραίτητα συνοδευτικά δικαιολογητικά, νομικού και τεχνικού περιεχομένου. Κάθε συμμετέχων αποκτούσε προσωπικό κωδικό πρόσβασης στην εφαρμογή του ηλεκτρονικού διαγωνισμού με την επιτυχή εγγραφή στην πλατφόρμα. Στη συνέχεια, και εντός συγκεκριμένου χρονικού πλαισίου που προσδιοριζόταν στην Προκήρυξη, απεστάλησαν και σε εκτυπωμένη μορφή ορισμένα από τα δικαιολογητικά, τα οποία απαιτούνται σε πρωτότυπη μορφή από τους γενικότερους όρους που διέπουν τις Προκηρύξεις των Διαγωνισμών Δημοσίων Φορέων. Όσες από τις αιτήσεις που υποβλήθηκαν ήταν πλήρεις ως προς το περιεχόμενό τους και ως προς τα σχετικά κριτήρια, προκρίθηκαν στο επόμενο Στάδιο Β' της διεξαγωγής της ανταγωνιστικής διαδικασίας.

2.2.2. Εγγυητικές επιστολές της πιλοτικής ανταγωνιστικής διαδικασίας

Η κατάθεση εγγυητικών επιστολών των επενδυτών σε εγκαταστάσεις έργων ΑΠΕ στους Διαχειριστές αποτελεί προϋπόθεση για να τεθούν σε ισχύ οι Συμβάσεις Σύνδεσης, και, εν συνεχεία, προϋπόθεση για τη συμμετοχή αυτών των επενδυτών στην πιλοτική ανταγωνιστική διαδικασία. Επιπλέον, η ΡΑΕ έκρινε σκόπιμη την υποβολή Εγγυητικών Επιστολών από τους συμμετέχοντες προκειμένου να εξασφαλιστούν η επίτευξη των στόχων του ν. 4414/2016 και η δέσμευση των συμμετεχόντων για τη συνέχιση της συμμετοχής τους καθ' όλη τη διάρκεια της ανταγωνιστικής διαδικασίας, ώστε να επιτυγχάνεται η αποτελεσματική διεξαγωγή του Διαγωνισμού και να μην αλλοιώνονται τα αποτελέσματά του.

Συγκεκριμένα, η υποβολή Εγγυητικής Επιστολής Συμμετοχής και Εγγυητικής Επιστολής Καλής Εκτέλεσης του έργου αποτέλεσε προϋπόθεση συμμετοχής στην πιλοτική ανταγωνιστική διαδικασία.

Α. Εγγυητική Επιστολή Συμμετοχής: Κατατέθηκε στη ΡΑΕ στο Στάδιο Α' υποβολής της αίτησης συμμετοχής. Το ποσό της εν λόγω Εγγυητικής Επιστολής ορίστηκε σε ποσοστό 1% της συνολικής επένδυσης, θεωρώντας ως βάση υπολογισμού, ότι το κόστος ενός τυπικού έργου φωτοβολταϊκής εγκατάστασης Κατηγορίας Ι και ΙΙ υπολογίζεται στο ποσό των 1.000 €/kW εγκατεστημένης ισχύος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Β. Εγγυητική Επιστολή Καλής Εκτέλεσης: Ορίστηκε με σκοπό την εξασφάλιση της υλοποίησης του έργου, σύμφωνα με τα ειδικότερα προβλεπόμενα στις διατάξεις της περίπτωσης (ε) της παραγράφου 9 του άρθρου 7 του ν. 4414/2016 και, ειδικότερα, για την ενεργοποίηση της σύνδεσης (θέση σε κανονική ή δοκιμαστική λειτουργία), κατά περίπτωση του Σταθμού, παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκό σταθμό του συμμετέχοντα, εφόσον επιλεγεί μέσω της Ανταγωνιστικής Διαδικασίας προς ένταξη σε καθεστώς στήριξης με τη μορφή Λειτουργικής Ενίσχυσης, εντός των οριζόμενων χρονικών πλαισίων που έχουν τεθεί από τον ως άνω νόμο. Στο πλαίσιο υπολογισμού του ποσού της εν λόγω Εγγυητικής Επιστολής καθορίστηκε και ο «*Κανόνας 4%*», ο οποίος αναλυτικά περιγράφεται στην ακόλουθη Παράγραφο 2.2.3.Β..

2.2.3. Κανόνες πιλοτικής ανταγωνιστικής διαδικασίας

Α. Κανόνας 40%: Προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητικός ανταγωνισμός και να υπάρξει επιτυχία της εν λόγω πιλοτικής ανταγωνιστικής διαδικασίας, τέθηκε ο ακόλουθος βασικός κανόνας: το άθροισμα της ισχύος όλων των Συμμετεχόντων του Οριστικού Καταλόγου Συμμετεχόντων (έπειτα από την ολοκλήρωση του Σταδίου Α'), σε κάθε μία Κατηγορία, πρέπει να υπερβαίνει κατά 40% τη δημοπρατούμενη ισχύ της Κατηγορίας αυτής.

Λαμβάνοντας υπόψη τον Κανόνα αυτό, και τον Οριστικό Κατάλογο Συμμετεχόντων, η ΡΑΕ με Απόφασή της οριστικοποίησε την ακριβή ισχύ δημοπράτησης για κάθε μία από τις δύο Κατηγορίες, η οποία ορίστηκε στην Κατηγορία Ι (≤ 1MW) στα 4,8 MW και στην Κατηγορία ΙΙ (> 1MW) στα 35,2 MW, ώστε ταυτόχρονα το άθροισμα της δημοπρατούμενης ισχύος των δύο Κατηγοριών Ι και ΙΙ να είναι το σύνολο της δημοπρατούμενης ισχύος, δηλαδή 40 MW.

Σε περίπτωση που δεν ήταν εφικτό να ικανοποιηθεί ο ανωτέρω Κανόνας σε μία από τις Κατηγορίες Ι ή/και ΙΙ, τότε η εν λόγω πιλοτική ανταγωνιστική διαδικασία της Κατηγορίας, για την οποία δεν ικανοποιείται ο όρος αυτός, επρόκειτο να ακυρωθεί.

Β. Ποσό της Εγγυητικής Επιστολής Καλής Εκτέλεσης «Κανόνας 4%»: Για την εξασφάλιση της υλοποίησης του έργου, θα πρέπει το άθροισμα του ποσού των εγγυητικών επιστολών, που έχει καταθέσει ο κάθε επιλεγμένος συμμετέχων για το συγκεκριμένο έργο στον αρμόδιο Διαχειριστή, στο πλαίσιο της αδειοδοτικής διαδικασίας για την έκδοση της αντίστοιχης Οριστικής Προσφοράς Σύνδεσης, και στη ΡΑΕ, στο πλαίσιο της εν λόγω πιλοτικής ανταγωνιστικής διαδικασίας, να ανέρχεται στο ποσοστό του τέσσερα τοις εκατό (4%) του συνόλου της επένδυσης, θεωρώντας ως βάση υπολογισμού ένα τυπικό κόστος 1.000 €/kW εγκατεστημένης ισχύος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Είναι ευθύνη του κάθε συμμετέχοντα, επί ποινή έκπτωσής του, να φροντίζει για την πλήρη τήρηση του εν λόγω κανόνα του 4%, καθ' όλη τη διάρκεια υλοποίησης του έργου μέχρι τη σύνδεσή του με το δίκτυο, εντός του διατιθέμενου χρόνου υλοποίησης κατά τις προβλέψεις της παρούσας Προκήρυξης.

Γ. Κανόνας καλύτερης προσφοράς

Κατά τη διάρκεια της ηλεκτρονικής δημοπρασίας, το σύστημα δεσμεύει προσωρινά ποσότητες ισχύος υπέρ των συμμετεχόντων, ώστε να δύνανται, με βάση τις ενδείξεις, τις οποίες οι συμμετέχοντες παρακολουθούν σε συνεχή ροή στο σύστημα, να αποφασίζουν για την περαιτέρω συμμετοχή τους και τη στρατηγική τιμών, που θα ακολουθήσουν στη συνέχεια της

δημοπρασίας. Στο τέλος της ηλεκτρονικής δημοπρασίας, το σύστημα οριστικοποιεί την κατανομή της διαθέσιμης ποσότητας ισχύος με βάση την κατάταξη των τελευταίων αποδεκτών προσφορών κάθε συμμετέχοντα. Η προσωρινή δέσμευση ποσοτήτων κατά τη διάρκεια της δημοπρασίας και η τελική οριστικοποίηση γίνονται με τον ακόλουθο «ΚΑΝΟΝΑ», ως εξής:

α. Καλύτερη θεωρείται η προσφορά, που έχει τη χαμηλότερη αριθμητική παράμετρο τιμής, δηλαδή τη χαμηλότερη τιμή σε €/MWh. Το σύστημα δεσμεύει προσωρινά στη συγκεκριμένη προσφορά την αντίστοιχη ποσότητα εγκατεστημένης ισχύος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης του συμμετέχοντος και προχωρά στην επόμενη καλύτερη (κατ' αύξουσα τιμή) αριθμητική παράμετρο τιμής, που έχει προσφερθεί. Από την εναπομείνασα ποσότητα δημοπρατούμενης ισχύος το σύστημα δεσμεύει προσωρινά ποσότητα ισχύος, που αναλογεί στην εγκατεστημένη ισχύ της φωτοβολταϊκής του εγκατάστασης, στο δεύτερο κατά σειρά μειοδότη, και προχωρά στην επόμενη αριθμητική παράμετρο τιμής κ.ο.κ..

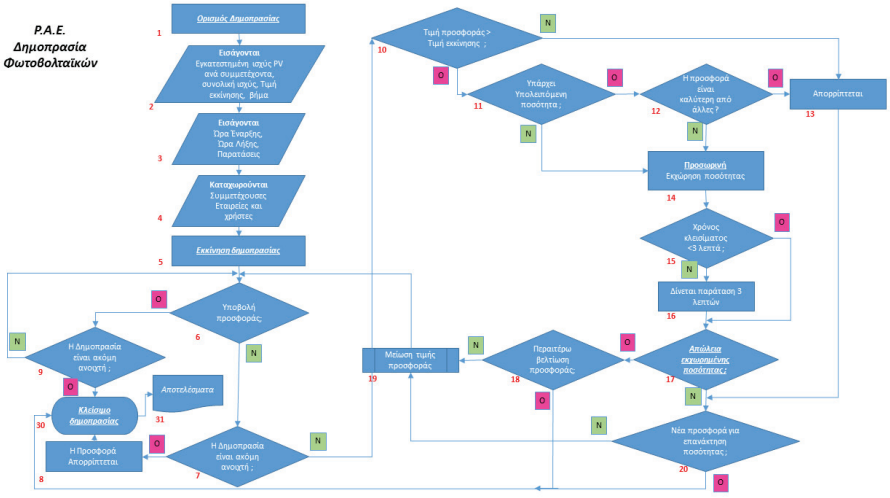
β. Αν δύο προσφορές έχουν ίδια παράμετρο τιμής, τότε «καλύτερη» είναι αυτή, της οποίας ο σταθμός έχει τη μικρότερη εγκατεστημένη ισχύ (παράμετρος ποσότητας).

γ. Αν δύο προσφορές έχουν την ίδια παράμετρο τιμής και την ίδια εγκατεστημένη ισχύ (παράμετρο ποσότητας), τότε «καλύτερη» είναι αυτή που υποβλήθηκε στην ηλεκτρονική δημοπρασία νωρίτερα (ήτοι, γίνεται κατακύρωση στην προσωρινή δέσμευση κατά χρονική προτεραιότητα).

δ. Με τη λήξη της δημοπρασίας, οι προσωρινές δεσμεύσεις γίνονται οριστικές και «κλειδώνουν» στους αντίστοιχους συμμετέχοντες με βάση την τελική λίστα προτεραιότητας «καλύτερης προσφοράς» (δηλαδή παράμετρος τιμής, παράμετρος ποσότητας και παράμετρος χρόνου). Επισημαίνεται ότι, στη διαδικασία των διαδοχικών δεσμεύσεων, αν η εγκατεστημένη ισχύς μίας προσφοράς είναι μεγαλύτερη από την εναπομείνασα ποσότητα (είτε στη διάρκεια της δημοπρασίας με τις προσωρινές δεσμεύσεις, είτε στο κλείσιμο με την οριστικοποίηση), η προσφορά δεν εξυπηρετείται καθόλου και το σύστημα προχωρά στην επόμενη προσφορά προς εξυπηρέτηση.

2.3. Ορισμός και παραμετροποίηση της Δημοπρασίας

Η διεξαγωγή των ηλεκτρονικών ανταγωνιστικών διαδικασιών για τις δύο Κατηγορίες Ι και ΙΙ, διάρκειας μισής ώρας εκάστη, χωρίς δυνατότητα παρατάσεων, πραγματοποιήθηκε βάσει του ακόλουθου αλγόριθμου:



Εικόνα 2: Ο αλγόριθμος διεξαγωγής των μειοδοτικών δημοπρασιών τύπου Yankee Reverse

Ο αλγόριθμος επεξεργάζεται τα βήματα με τον εξής τρόπο:

1. Ορισμός και παραμετροποίηση της Δημοπρασίας.

   Στα βήματα 2-4 της Εικόνα 2 περιλαμβάνονται ολες οι απαραίτητες ενέργειες που απαιτούνται από την πλευρά του διαχειριστή και παρόχου της πλατφόρμας (cosmoONE), ώστε να οριστεί και να παραμετροποιηθεί στο σύστημα, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της ΡΑΕ, η ηλεκτρονική δημοπρασία τύπου “αμερικάνικη μειοδοτική” (YANKEE reverse).

2. Ορισμός και πρόσκληση συμμετεχόντων.

   Ο διαχειριστής προσκαλεί στο σύστημα τους επιτυχόντες συμμετέχοντες του Σταδίου Α’ στην ηλεκτρονική δημοπρασία. Δημιουργείται μία λίστα εταιριών, που θα μπορούν να έχουν πρόσβαση στη συγκεκριμένη δημοπρασία. Οι εταιρίες, που κατέχουν κωδικούς πρόσβασης στην πλατφόρμα από συμμετοχή τους σε άλλες δημοπρασίες, αλλά δεν είναι προσκεκλημένες στη συγκεκριμένη, όχι μόνο δεν έχουν πρόσβαση στη συγκεκριμένη δημοπρασία, αλλά δεν γνωρίζουν καν την ύπαρξη και διεξαγωγή της.

3. Ορισμός της εγκατεστημένης ισχύος.

   Ο διαχειριστής εισάγει ως σταθερές και αμετάβλητες παραμέτρους για όλη τη διάρκεια της δημοπρασίας, την εγκατεστημένη ισχύ της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης κάθε συμμετέχοντος. Εισάγονται επίσης η συνολική διαθέσιμη ισχύς, η τιμή εκκίνησης στη μονάδα μέτρησης, καθώς και το βήμα της δημοπρασίας, που αντιπροσωπεύει το ελάχιστο ποσό βελτίωσης της τιμής ανά προσφορά.

4. Ορισμός Χρονικών Παραμέτρων.

   Ο διαχειριστής εισάγει επίσης την ημερομηνία και ώρα έναρξης της δημοπρασίας, τη διάρκειά της, την ύπαρξη ή όχι παρατάσεων και των κανόνων παρατάσεων κ.λπ.. Στη συγκεκριμένη δημοπρασία της ΡΑΕ, δεν ενεργοποιήθηκαν παρατάσεις, με Απόφαση της ΡΑΕ.

5. ***Εκκίνηση Δημοπρασίας.***

   Η δημοπρασία ανοίγει στον καθορισμένο χρόνο και κάθε συμμετέχων μπορεί να υποβάλει προσφορά, όσο η δημοπρασία είναι ακόμη ανοικτή.

6. Το σύστημα ελέγχει διαρκώς, αν έχει υποβληθεί προσφορά.

7. Εάν δεν υποβληθεί προσφορά σε όλη τη διάρκεια της δημοπρασίας, τότε η δημοπρασία κλείνει ως «άγονη» (διαδρομή 5-6-9-6-9-….-30).

8. Αν υποβληθεί κάποια προσφορά, ο πρώτος έλεγχος, που εκτελείται, είναι αυτός του χρόνου, δηλ. ελέγχεται από το σύστημα, κατά πόσο η δημοπρασία είναι ακόμη ανοικτή. Αν έχει παρέλθει ο χρόνος διάρκειάς της (είτε της κανονικής είτε των τυχόν παρατάσεων), η προσφορά απορρίπτεται και η δημοπρασία αλλάζει κατάσταση σε «κλειστή» (διαδρομή 5-6-7-8-30).

9. Τα αποτελέσματα της δημοπρασίας δημιουργούνται αυτόματα με το κλείσιμο της δημοπρασίας και το σύστημα παράγει μια αναλυτική λίστα όλων των προσφορών όλων των συμμετεχόντων, με το αποτέλεσμα κάθε προσφοράς (αποδοχή, ποσότητα, τιμή, απόρριψη, λόγος απόρριψης κ.λπ.), καθώς και μια λίστα καλύτερων προσφορών με τις τελικές κατανεμημένες ποσότητες και τις σχετικές τιμές στη μονάδα μέτρησης (διαδρομή 30-31).

10. Στην περίπτωση υποβολής προσφοράς, όσο η δημοπρασία είναι ακόμη ανοιχτή, υπάρχει ένα δεύτερο σημείο ελέγχου, όπου το σύστημα ελέγχει την υποβληθείσα τιμή (της μονάδας μέτρησης) έναντι της τιμής εκκίνησης (διαδρομή 6-7-10).

11. Αν η υποβληθείσα τιμή είναι μεγαλύτερη της τιμής εκκίνησης, η προσφορά απορρίπτεται και το σύστημα επιτρέπει στο συμμετέχοντα να υποβάλλει εκ νέου τιμή, και να βελτιώσει την προσφορά του (διαδρομή 10-13-20-19).

12. Στην περίπτωση, που η υποβληθείσα τιμή είναι μικρότερη ή ίση της τιμής εκκίνησης, το σύστημα πραγματοποιεί έναν τρίτο έλεγχο σχετικά με την ποσότητα, που έχει εκχωρηθεί στον συγκεκριμένο συμμετέχοντα, έναντι της υπολειπόμενης ποσότητας (δηλ. αυτής που δεν έχει προσωρινά εκχωρηθεί στους συμμετέχοντες).

Αν η υπολειπόμενη ποσότητα είναι ίση ή μεγαλύτερη της ζητηθείσας, το σύστημα αποδέχεται την προσφορά και εκχωρεί προσωρινά τη ζητηθείσα ποσότητα στο συμμετέχοντα (διαδρομή 10-11-14).

13. Αν η υπολειπόμενη ποσότητα είναι ίση ή μικρότερη της ζητηθείσας, το σύστημα συγκρίνει την προσφορά με τις υπόλοιπες προσφορές, που έχουν ήδη δεσμεύσει ποσότητα.

    Αν η προσφορά του συμμετέχοντα είναι "καλύτερη" από τις υπάρχουσες αποδεκτές προσφορές σύμφωνα με τον "ΚΑΝΟΝΑ", το σύστημα αφαιρεί την ποσότητα από έναν ή περισσότερους συμμετέχοντες με τη χαμηλότερη ταξινόμηση (κατάταξη) εκείνη τη στιγμή και προσωρινά εκχωρεί την ποσότητα στο συγκεκριμένο συμμετέχοντα (διαδρομή 10-11-12-14). Οι συμμετέχοντες, που χάνουν ποσότητα, ενημερώνονται αμέσως από το σύστημα.

    Στην περίπτωση, που η υποβληθείσα προσφορά είναι "χειρότερη" από τις υπάρχουσες αποδεκτές προσφορές σύμφωνα με τον "ΚΑΝΟΝΑ", η προσφορά δεν ικανοποιείται και το σύστημα επιτρέπει στο συμμετέχοντα να βελτιώσει την προσφορά του (διαδρομή 10-11-12-13).

14. Ελεγχος τυχόν Παρατάσεων.

    Οποτεδήποτε μια προσφορά γίνει αποδεκτή, το σύστημα ελέγχει αν η προσφορά υποβλήθηκε εντός του χρονικού ορίου, που ενεργοποιεί τις παρατάσεις. Αν ο χρόνος υποβολής είναι εντός αυτής της περιόδου, το σύστημα δίνει αυτόματα παράταση (διαδρομή 14-15-16). Σημειώνεται πως οι συγκεκριμένες ανταγωνιστικές διαδικασίες για τις Κατηγορίες I και II του πιλοτικού διαγωνισμού δεν επέτρεπαν παράταση του χρόνου διάρκειας υποβολής προσφορών.

17. <u>Απώλεια προσωρινά δεσμευμένης ποσότητας.</u>

    Κατά τη διάρκεια της δημοπρασίας, κάθε συμμετέχων μπορεί να απωλέσει την ποσότητά του, εξαιτίας υποβολής καλύτερης προσφοράς από άλλο συμμετέχοντα. Αυτό είναι εμφανές στην οθόνη και ο συμμετέχων έχει το δικαίωμα να υποβάλει νέα προσφορά για να επανακτήσει την ποσότητά του.

20. Απώλεια ποσότητας και ο συμμετέχων δε θέλει να υποβάλει βελτιωμένη προσφορά.

    Ο συμμετέχων δεν υποβάλει περαιτέρω προσφορές και περιμένει μέχρι να κλείσει η δημοπρασία, καθώς υπάρχει περίπτωση να ανακτήσει ποσότητα κάτω από κάποιες προϋποθέσεις, που απορρέουν από τον "ΚΑΝΟΝΑ" (διαδρομή 17-20-30-31).

19. Απώλεια ποσότητας και ο συμμετέχων θέλει να υποβάλει βελτιωμένη προσφορά.

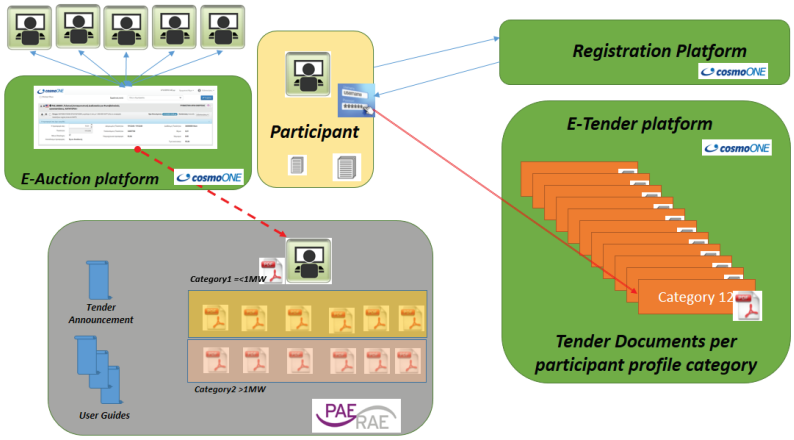
    Ο συμμετέχων υποβάλει βελτιωμένη προσφορά, μειώνοντας την τιμή της προσφοράς του και υποβάλλοντάς την εκ νέου στο συστημα (διαδρομή 17-20-19-6).

18. Δεν/συμβαίνει απώλεια ποσότητας, αλλά ο συμμετέχων θέλει να βελτιώσει την προσφορά του.

    Αν ο συμμετέχων θέλει να ισχυροποιήσει τη θέση του στη δημοπρασία και να βρεθεί σε πλεονεκτικότερη θέση έναντι άλλων συμμετεχόντων, σύμφωνα με τον ΚΑΝΟΝΑ, έχει τη δυνατότητα να υποβάλει νέα προσφορά. Για να το επιτύχει πρέπει να βελτιώσει την τιμή του και να υποβάλει τη νέα προσφορά (διαδρομή 17-18-19-6).

2.4. Ηλεκτρονική πλατφόρμα διεξαγωγής της πιλοτικής ανταγωνιστικής διαδικασίας

Η ηλεκτρονική υποβολή των αιτήσεων συμμετοχής αποτέλεσε καινοτόμο βήμα σε ευρωπαϊκό επίπεδο στο πλαίσιο των ανταγωνιστικών διαδικασιών, αλλά και στον τομέα των διαγωνισμών Δημοσίου στο σύνολό τους. Η διαδικασία ήταν, τόσο για τους συμμετέχοντες όσο και για την Ομάδα αξιολόγησης της ΡΑΕ, σαφής, απλή, και σύντομη, εξασφαλίζοντας την απρόσκοπτη υποβολή των δικαιολογητικών και των αιτήσεων, αλλά και την αξιολόγησή τους με σαφήνεια, διαφάνεια και αμεσότητα, εκμηδενίζοντας τη γραφειοκρατία. Στην Εικόνα 3 καταγράφεται σχηματικά η διαδικασία υποβολής των αιτήσεων.



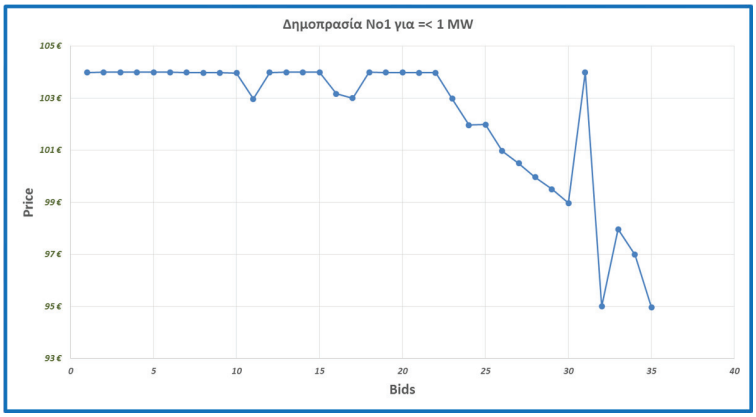
Εικόνα 3: Διαδικασία υποβολής των αιτήσεων και των δικαιολογητικών συμμετοχής

Έπειτα από την πρόκριση στο Στάδιο Β', οι συμμετέχοντες είχαν τη δυνατότητα εξοικείωσης με την ηλεκτρονική πλατφόρμα διεξαγωγής της ανταγωνιστικής διαδικασίας μέσω εικονικών δημοπρασιών. Σε τακτά χρονικά διαστήματα οι συμμετέχοντες λάμβαναν μέρος σε δημοπρασίες, που προσομοίωναν την πιλοτική ανταγωνιστική διαδικασία και σκοπό είχαν να τους εξοικειώσουν με το περιβάλλον εργασίας της ηλεκτρονικής πλατφόρμας, αλλά και με τον καινοτόμο τρόπο διεξαγωγής ηλεκτρονικών δημοπρασιών. Κατ' αυτό τον τρόπο, τα πιθανά ερωτήματα ή/και προβλήματα εξοικείωσης με την ηλεκτρονική πλατφόρμα λύθηκαν πριν τη διεξαγωγή της ανταγωνιστικής διαδικασίας.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

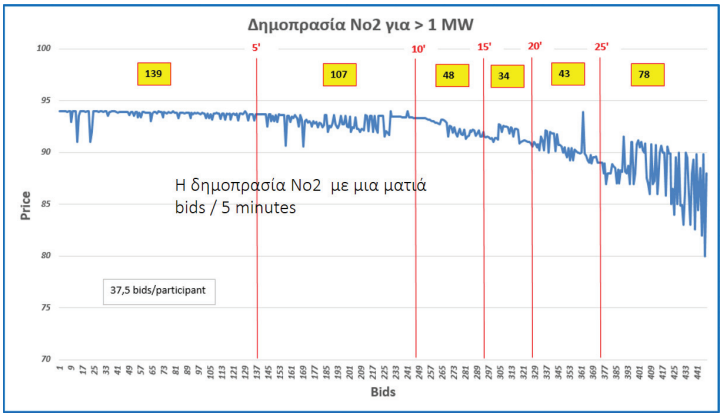
Τα αποτελέσματα της ανταγωνιστικής διαδικασίας παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα και συνοψίζονται στα παρακάτω σημεία:

- Η δημοπρατούμενη ισχύς εξαντλήθηκε και στις δύο περιπτώσεις, γεγονός που επιβεβαίωσε την επιλογή του «Κανόνα 40%»:
  - I. Σύνολο ισχύος της Κατηγορίας Ι που κατακυρώθηκε: 4,797 MW.
    Σύνολο αδιάθετης ισχύος της Κατηγορίας Ι: 2,810 kW.
  - II. Σύνολο ισχύος της Κατηγορίας ΙΙ που κατακυρώθηκε: 35,123 MW.
    Σύνολο αδιάθετης ισχύος της Κατηγορίας ΙΙ: 76,8 kW.
- Από τους δεκατέσσερις (14) συμμετέχοντες στην Κατηγορία Ι (≤ 1 MW), εννέα (9) ήταν επιτυχόντες και κατακύρωσαν τιμή για την εγκατεστημένη ισχύ του έργου τους.
- Από τους δεκατέσσερις (14) συμμετέχοντες στην Κατηγορία ΙΙ (> 1 MW), επτά (7) ήταν επιτυχόντες και κατακύρωσαν τιμή για την εγκατεστημένη ισχύ του έργου τους.
- Στην Κατηγορία Ι, η χαμηλότερη προσφορά τιμής ήταν 94,97 €/MWh (με την υψηλότερη αποδεκτή τιμή στα 104 €/MWh, βάσει και των οριζόμενων του ν. 4414/2016), με τη μεσοσταθμική τιμή των επιτυχόντων προσφορών να κυμαίνεται στα 98,78 €/MWh. Δηλαδή, επιτεύχθηκε μείωση της τιμής προς όφελος των καταναλωτών. Η διακύμανση των προσφορών κατά τη διάρκεια της δημοπρασίας για την Κατηγορία Ι είναι αποτυπωμένη στην ακόλουθη Εικόνα 4.



Εικόνα 4: Διεξαγωγή της ηλεκτρονικής δημοπρασίας για τα έργα Φ/Β εγκαταστάσεων της Κατηγορίας Ι (≤ 1MW)

- Στην Κατηγορία ΙΙ, η χαμηλότερη προσφορά τιμής ήταν 79,97 €/MWh (με την υψηλότερη αποδεκτή τιμή στα 88 €/MWh), με τη μεσοσταθμική τιμή των επιτυχόντων προσφορών να κυμαίνεται στα 83,3 €/MWh. Κατ' αυτό τον τρόπο επιτεύχθηκε μείωση της τιμής σε ποσοστό 15%, προς όφελος των καταναλωτών. Η διακύμανση των προσφορών κατά τη διάρκεια της δημοπρασίας για την Κατηγορία ΙΙ είναι αποτυπωμένη στην παρακάτω Εικόνα 5.



Εικόνα 5: Διεξαγωγή της ηλεκτρονικής δημοπρασίας για τα έργα Φ/Β εγκαταστάσεων της Κατηγορίας ΙΙ (> 1MW)

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα βασικότερα συμπεράσματα της πιλοτικής ανταγωνιστικής διαδικασίας συνοψίζονται στα εξής σημεία:

- Αναπτύχθηκε καινοτόμος, ειδική ηλεκτρονική πλατφόρμα, σύμφωνα με τις κατευθύνσεις και τις Αποφάσεις της Ολομέλειας της ΡΑΕ. Η διεξαγωγή της ανταγωνιστικής διαδικασίας μέσω της ηλεκτρονικής πλατφόρμας ελαχιστοποίησε το χρόνο ολοκλήρωσης της όλης διαδικασίας, σχεδόν μηδένισε τη γραφειοκρατία και ενίσχυσε τη διαφάνεια.
- Εφαρμόστηκε πλήρως ο Κανόνας της Προκήρυξης για τον ανταγωνισμό της τάξεως τουλάχιστον 40%, επιλογή που τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν, καθώς τα οφέλη που προέκυψαν από τη μείωση των τιμών είναι εξαιρετικά σημαντικά για τον Καταναλωτή.
- Επετεύχθη σημαντική μείωση των τιμών, προς όφελος των καταναλωτών:

- Κατηγορία Ι (≤ 1MW): 94,97 €/MWh έως 104 €/MWh -> μεσοσταθμική τιμή: 98,78 €/MWh.
- Κατηγορία ΙΙ (> 1MW): 79,97 €/MWh έως 88 €/MWh -> μεσοσταθμική τιμή: 83,3 €/MWh.

- Δε σημειώθηκαν προβλήματα στην κατανόηση και τη χρήση των εφαρμογών κατά τη διάρκεια εκπαίδευσης των χρηστών. Προς αυτή την κατεύθυνση συνέβαλαν και οι «εικονικές δημοπρασίες», οι οποίες προετοίμασαν και εξοικείωσαν τους συμμετέχοντες με το νέο σύστημα.
- Δεν παρουσιάστηκε κανένα λάθος στη διαδικασία εγγραφής των συμμετεχόντων, στη διαδικασία υποβολής της αίτησης και της ανάρτησης των δικαιολογητικών στην ηλεκτρονική πλατφόρμα. Καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας, από το πρώτο στάδιο μέχρι και την τρέχουσα φάση παρακολούθησης της εξέλιξης των έργων, οι συμμετέχοντες είχαν τη δυνατότητα να επιλύσουν όποιες δυσκολίες προέκυπταν.
- Η διαδικασία αξιολόγησης των αναρτημένων αρχείων στην ηλεκτρονική πλατφόρμα διεξήχθη από τη ΡΑΕ άμεσα, μειώνοντας σημαντικά τον απαιτούμενο, υπό άλλες συνθήκες, χρόνο.
- Η κάθε δημοπρασία διήρκησε τριάντα (30) λεπτά, χωρίς παρατάσεις, και ο αριθμός των συνολικών προσφορών ανήλθε, για την Κατηγορία Ι σε 35 και την Κατηγορία ΙΙ σε 446, δηλαδή σημειώθηκαν στο σύνολο 481 προσφορές, αποδεικνύοντας τον έντονο ανταγωνισμό, που επετεύχθη.
- Η διάθεση των δημοπρατούμενων ποσοτήτων ισχύος άγγιξε το 100% και έγινε με βάση τη μεθοδολογία της Προκήρυξης της ΡΑΕ.
- Όλοι οι επιλεγέντες των Κατηγοριών Ι και ΙΙ τήρησαν πλήρως τον «Κανόνα 4%» σχετικά με την Εγγύηση Καλής Εκτέλεσης.
- Η όλη διαδικασία ήταν καινοτόμος, σαφής, διαφανής, έγκυρη και αξιόπιστη.
- Η επιλογή για διενέργεια δύο δημοπρασιών, μία για «μικρά έργα» και μία για «μεγάλα έργα», ήταν εξαιρετικά εύστοχη, καθώς το επίπεδο ανταγωνισμού υπήρξε ικανοποιητικό στην πρώτη και εξαιρετικά υψηλό στη δεύτερη δημοπρασία.

Συνολικά, η εμπειρία και τα εξαιρετικά χρήσιμα συμπεράσματα της πιλοτικής ανταγωνιστικής διαδικασίας Φ/Β εγκαταστάσεων, από το πρώτο βήμα του σχεδιασμού της έως και το στάδιο της παρακολούθησης της πορείας των επιτυχόντων έργων Φ/Β εγκαταστάσεων από τη ΡΑΕ, που βρίσκεται σε εξέλιξη, αποτελούν πυλώνες για τις μετέπειτα αποφάσεις στον τομέα των ΑΠΕ. Αναγνωρίζεται ως ένα σημαντικό εργαλείο, που θα αξιοποιηθεί κατάλληλα κατά το σχεδιασμό των μόνιμων ανταγωνιστικών διαδικασιών για όλες τις τεχνολογίες ΑΠΕ, που θα διεξαχθούν από τη ΡΑΕ, κατόπιν σχετικής έγκρισης του σχήματος κοινοποίησης από την αρμόδια Δ/νση της Ε.Ε. και την έκδοση της σχετικής Υπουργικής Απόφασης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), *www.rae.gr*.

[2] Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) Α.Ε., *www.admie.gr*.

[3] Λειτουργός της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΛΑΓΗΕ) Α.Ε., *www.lagie.gr*.

[4] Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ) Α.Ε., *www.deddie.gr*.

[5] EU Decision C (2016) 7272 final, Brussels, 16.11.2016: "*State Aid SA.44666 – Greece. New operating aid scheme for the production of electricity from RES and HECHP*".

[6] Ανακοίνωση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής «*Κατευθυντήριες γραμμές για τις κρατικές ενισχύσεις στους τομείς του περιβάλλοντος και της ενέργειας (2014-2020) (2014/C 200/01)*».

[7] Νόμος 3468/2006 (ΦΕΚ Α' 129/27.06.2006) «*Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης και λοιπές διατάξεις*».

[8] Νόμος 4001/2011 (ΦΕΚ Α' 179/22.08.2011) «*Για τη λειτουργία Ενεργειακών Αγορών Ηλεκτρισμού και Φυσικού Αερίου, για Έρευνα, Παραγωγή και δίκτυα μεταφοράς Υδρογονανθράκων και άλλες ρυθμίσεις*».

[9] Νόμος 4414/2016 (ΦΕΚ Α' 149/09.08.2016) «*Νέο καθεστώς στήριξης των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης - Διατάξεις για το νομικό και λειτουργικό διαχωρισμό των κλάδων προμήθειας και διανομής στην αγορά του φυσικού αερίου και άλλες διατάξεις*».

[10] Η υπ' αριθ. 417/2016 Απόφαση ΡΑΕ «*Διενέργεια Πιλοτικής Ανταγωνιστικής Διαδικασίας υποβολής προσφορών για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 7 παρ. 8 του Ν. 4414/2016*» (ΦΕΚ Β' 3627/09.11.2016, ΑΔΑ: ΩΠΛΗΙΔΞ-Δ32).

[11] Η υπ' αριθ. 513/2016 Απόφαση ΡΑΕ «*Προσωρινός Κατάλογος Συμμετεχόντων στο Στάδιο Β' της Πιλοτικής Ανταγωνιστικής Διαδικασίας για τις Κατηγορίες Ι και ΙΙ και Προσωρινός Κατάλογος Αποκλεισθέντων για τις Κατηγορίες Ι και ΙΙ, σύμφωνα με τα οριζόμενα στην υπ' αριθμ. 417/2016 Απόφαση Προκήρυξης Πιλοτικής Ανταγωνιστικής Διαδικασίας (ΦΕΚ Β' 3672/09.11.2016)*», (ΑΔΑ: 6ΥΥΩΙΔΞ-5ΩΨ).

[12] Η υπ' αριθ. 545/2016 Απόφαση ΡΑΕ «*α) Επί της υπ' αριθμ. πρωτ. ΡΑΕ Ι-214873/02.12.2016 ένστασης του κου Νικολάου Σύρπα του Νικολάου, στρεφόμενη κατά της υπ' αριθμ. 513/2016 Απόφασης ΡΑΕ με θέμα: "Προσωρινός Κατάλογος Συμμετεχόντων στο Στάδιο Β' της Πιλοτικής Ανταγωνιστικής Διαδικασίας για τις Κατηγορίες Ι και ΙΙ και Προσωρινός Κατάλογος Αποκλεισθέντων για τις Κατηγορίες Ι και ΙΙ, σύμφωνα με τα οριζόμενα στην υπ' αριθμ. 417/2016 Απόφαση Προκήρυξης Πιλοτικής Ανταγωνιστικής Διαδικασίας (ΦΕΚ Β' 3672/09.11.2016)» β) Οριστικοποίηση Καταλόγου Συμμετεχόντων για το Στάδιο Β' γ) Οριστικοποίηση της ισχύος Δημοπράτησης για κάθε μία από τις Κατηγορίες Ι και ΙΙ*» (ΑΔΑ: Ψ007ΙΔΞ-Ρ3Σ).

[13] Η υπ' αριθ. 570/2016 Απόφαση ΡΑΕ «*Επί των οριστικών αποτελεσμάτων της Ηλεκτρονικής Δημοπρασίας της 12ης Δεκεμβρίου 2016, και επί της υπ' αριθμ. πρωτ. ΡΑΕ Ι-215192/12.12.2016 ένστασης της εταιρείας "PRIME ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΑΝΩΝΥΜΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ" η οποία υποβλήθηκε σύμφωνα με την παρ. 14.3 του άρθρου 14 της υπ' αριθμ. 417/Απόφασης ΡΑΕ "Διενέργεια Πιλοτικής Ανταγωνιστικής Διαδικασίας υποβολής προσφορών για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 7 παρ. 8 του Ν. 4414/2016" (ΦΕΚ Β' 3627, ΑΔΑ: ΩΠΛΗΙΔΞ-Δ32)*» (ΑΔΑ: ΩΧ40ΙΔΞ-Φ3Γ).

[14] Η υπ' αριθ. 2/2017 Γνωμοδότηση ΡΑΕ «*Σύμφωνα με τις διατάξεις της παραγράφου 2 του άρθρου 7 του ν. 4414/2016, ως προς: α) το χαρακτηρισμό των ανταγωνιστικών διαδικασιών υποβολής προσφορών ως «τεχνολογικά ουδέτερων» ή μη, β) τις τεχνολογίες ή/και κατηγορίες σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ που εντάσσονται στην ανταγωνιστική διαδικασία υποβολής προσφορών, και γ) τη μεθοδολογία και τη διαδικασία επιμερισμού ισχύος που προβλέπεται για συμμετοχή σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ που εγκαθίστανται σε χώρες εντός του Ευρωπαϊκού Οικονομικού Χώρου υπό την προϋπόθεση ενεργού Διασυνοριακού Εμπορίου ενέργειας με αυτές, καθώς και κάθε άλλο σχετικό θέμα*».

[15] Γεωπληροφοριακός Χάρτης Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας, *http://www.rae.gr/geo/*

[16] ΑΔΜΗΕ Α.Ε., Διεύθυνση Σχεδιασμού Ανάπτυξης Συστήματος, «*Μελέτη Επάρκειας Ισχύος για την περίοδο 2017 – 2027, Αθήνα, Μάιος 2017*».

[17] ΑΔΜΗΕ Α.Ε., Διεύθυνση Σχεδιασμού Ανάπτυξης Συστήματος, «*Δεκαετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς 2017 – 2026*».

[18] Δημόσια Διαβούλευση – Ημερίδα της ΡΑΕ: «*Η πιλοτική ανταγωνιστική διαδικασία υποβολής προσφορών για φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις*», Δρ. Διονύσιος Παπαχρήστου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 21.10.2016.

[19] Δημόσια Διαβούλευση – Ημερίδα της ΡΑΕ: «*Μόνιμες ανταγωνιστικές διαδικασίες υποβολής προσφορών έργων ΑΠΕ*», Δρ. Διονύσιος Παπαχρήστου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 10.02.2017.

[20] Παρουσίαση «*Αιολικοί Σταθμοί και Ανταγωνιστικές Διαδικασίες*», Δρ. Διονύσιος Παπαχρήστου, Ημερίδα Ελληνικής Επιστημονικής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ) «*Η νέα αγορά ηλεκτρικής ενέργειας*», Έκθεση VERDE TEC, ΜΕC Παιανίας, 03.03.2017.

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΝΟΙΚΟΚΥΡΙΩΝ ΣΤΗ Β. ΕΛΛΑΔΑ – ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΦΤΩΧΕΙΑΣ

Σοφία – Ναταλία Μποέμη[1]*, Άγις Παπαδόπουλος[1] και Γιώργος Πανάρας [2]

[1]Εργαστήριο Κατασκευής Συσκευών Διεργασιών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Αριστοτέλειο Παν. Θεσσαλονίκης, Θυρίδα 487, ΤΚ 54124, Θεσσαλονίκη
*e-mail: nboemi@auth.gr
[2] Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας, Μπακόλα και Σιαλβέρα, ΤΚ50132, Κοζάνη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ενεργειακή φτώχεια εισήλθε για πρώτη φορά στο λεξιλόγιο των θεσμικών οργάνων της ΕΕ στη διαδικασία της προετοιμασίας του Τρίτου Ενεργειακού Πακέτου. Η αυξανόμενη σπουδαιότητα της ενεργειακής φτώχειας εντός της πολιτικής σφαίρας της ΕΕ αποδεικνύεται με τη γνωμοδότηση με θέμα «Ενεργειακή φτώχεια στο πλαίσιο της απελευθέρωσης και της οικονομικής κρίσης», που εκδόθηκε από την Ευρωπαϊκή Οικονομική και την Κοινωνική Επιτροπή (ΕΟΚΕ) στις 14 Ιουλίου του 2010, η οποία κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η «ενεργειακή φτώχεια επηρεάζει τον τομέα της ενέργειας», ενώ επίσης επηρεάζει και «την υγεία, τις συνήθειες των καταναλωτών και τη στέγαση».

Παρόλα αυτά, το φαινόμενο της ενεργειακής φτώχειας στην Ελλάδα είναι ένα φαινόμενο που άρχισε να εισέρχεται στο λεξιλόγιο των ερευνητών τα τελευταία τέσσερα χρόνια. Συγκεκριμένα, είναι ένα πιεστικό πρόβλημα με παράγοντες που επηρεάζονται από την πολύπλοκη αλληλεπίδραση της αύξησης των τιμών της ενέργειας και της αδυναμία των ανθρώπων να πληρώσουν τους λογαριασμούς τους, τη στασιμότητα ή μείωση των εισοδημάτων, τα υψηλά επίπεδα της ανεργίας και το χαμηλό ρυθμός ανάπλασης για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στα κτίρια κατοικιών.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η έρευνα πεδίου που διεξήχθη από τον Ιανουάριο 2015 έως και τον Ιούνιο 2016 αναφορικά με την διερεύνηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των νοικοκυριών στη Β. Ελλάδα και τα αποτελέσματα της. Δεδομένης της έλλειψης και του κατακερματισμού των επιστημονικών στοιχείων σχετικά με τη δυναμική του φαινομένου της ενεργειακής φτώχειας, στην παρούσα εργασία γίνεται μία προσπάθεια στατιστικής ανάλυσης του φαινομένου. Στόχος είναι να καταστεί σαφής η σύνδεση μεταξύ των συνθηκών διαβίωσης, της ενεργειακής φτώχειας και των άλλων δεικτών. Ενώ τα αποτελέσματα της έρευνας, αποτελούν βάση για την περαιτέρω διερεύνηση του φαινομένου και την αντιμετώπιση του.

Λέξεις Κλειδιά: Ενεργειακή φτώχεια, Β. Ελλάδα, Κοινωνικοοικονομικοί π0αράγοντες, Κατανάλωση ενέργειας, Ευάλωτοι καταναλωτές

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενεργειακή φτώχεια αρχίζει να αναγνωρίζεται σε παγκόσμιο επίπεδο ως ένα κοινωνικό πρόβλημα με αυξάνουσα σημασία και σοβαρές επιπτώσεις στην υγεία πολλών εκατομμυρίων πολιτών. Σε ό,τι αφορά την Ευρώπη, το φαινόμενο της ενεργειακής φτώχειας επιδεινώνεται τα τελευταία χρόνια ακόμη και στις οικονομικά εύρωστες χώρες, καθώς η τελική τιμή της ενέργειας αυξάνεται, δίχως όμως να υπάρχει ανάλογη αύξηση στα εισοδήματα των οικονομικά ασθενέστερων στρωμάτων. Οι συνέπειες της ενεργειακής φτώχειας είναι ποίκιλες και αφορούν κυρίως την έλλειψη θέρμανσης η οποία πλήττει την υγιεινή, την υγεία και συχνά οδηγεί σε αύξηση της θνησιμότητας, υπερχρέωση, κοινωνική και γεωγραφική απομόνωση [1], [2].

Η ενεργειακή φτώχεια εισήλθε για πρώτη φορά στο λεξιλόγιο των θεσμικών οργάνων της ΕΕ στη διαδικασία της προετοιμασίας του Τρίτου Ενεργειακού Πακέτου, όταν η πολιτική δράση εντός του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου οδήγησε στην ένταξη της ενεργειακής φτώχειας εντός των οδηγιών 2009/72/ΕΚ και του 2009/73/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, «Σχετικά με τους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και την προμήθεια φυσικού αερίου»[3],[4]. Το συμβιβαστικό κείμενο των οδηγιών αναγνώρισε την ύπαρξη ενός «αναπτυσσόμενου» προβλήματος ενεργειακής φτώχειας στην Ευρώπη, που απαιτεί τη κινητοποίηση των κρατών-μελών ώστε να εξασφαλίσουν τον αναγκαίο ενεργειακό εφοδιασμό για τους ευάλωτους καταναλωτές για να μειωθεί ο αριθμός των ατόμων που πάσχουν από αυτή την κατάσταση.

Στις 14 Ιουλίου το 2010 η Ευρωπαϊκή Οικονομική και Κοινωνική Επιτροπή (ΕΟΚΕ) της ΕΕ εξέδωσε γνωμοδότηση με θέμα «Ενεργειακή φτώχεια στο πλαίσιο της απελευθέρωσης και της οικονομικής κρίσης» καθιστώντας ακόμα μεγαλύτερη την σπουδαιότητα της ενεργειακής φτώχειας εντός της πολιτικής σφαίρας της ΕΕ[5]. Η έκθεση αυτή κατέληγε στο συμπέρασμα ότι η «ενεργειακή φτώχεια επηρεάζει τον τομέα της ενέργειας», ενώ επηρεάζει «την υγεία, τις συνήθειες των καταναλωτών και τη στέγαση». Επιπλέον, η Επιτροπή πρότεινε ότι «η ΕΕ πρέπει να υιοθετήσει ένα κοινό ορισμό γενικού χαρακτήρα για την ενεργειακή φτώχεια που να μπορεί στη συνέχεια να προσαρμοστεί από κάθε κράτος.

Το φαινόμενο αυτό, δηλαδή ο αποκλεισμός ή η ανεπαρκής πρόσβαση των νοικοκυριών στην ενέργεια, το οποίο περιγράφεται ως ενεργειακή φτώχεια, έχει βρεθεί τα τελευταία χρόνια στο επίκεντρο της δημόσιας συζήτησης στην Ελλάδα και είναι από τα πιο καταγεγραμμένα [6], [7], [8], [9], [10], [11], [13]. Παράλληλα, οι Κολοκοτσά και Σανταμούρης [13]προσπάθησαν να κατανοήσουν την επίδραση του στις εσωτερικές κλιματικές συνθήκες. Με βάση την παραπάνω βιβλιογραφία, φαίνεται ότι η ενεργειακή φτώχεια επηρεάζεται από τρεις (3) παραμέτρους: την αδυναμία διατήρησης της εσωτερικής θερμοκρασίας, την καθυστέρηση της αποπληρωμής των λογαριασμών ενέργειας και τις ακατάλληλες συνθήκες διαβίωσης.

Ωστόσο, δεν υπάρχει ένας κοινώς αποδεκτά ορισμός. Ο πρώτος ορισμός που δόθηκε σε ευρωπαϊκό επίπεδο είναι από το BPIE[14] και βασίστηκε στον πλέον συνηθισμένο ορισμό της Ευρωπαϊκής Επιτροπής του 1984 «φτωχοί είναι εκείνα τα άτομα, οι οικογένειες ή οι ομάδες των οποίων οι υλικοί, πολιτισμικοί και κοινωνικοί πόροι είναι τόσο ανεπαρκείς ώστε να τους αποκλείουν από το ελάχιστα αποδεκτό βιοτικό επίπεδο της κοινωνίας που ζουν».

Το παραπάνω σε συνδυασμό με την οικονομική ύφεση, τη στασιμότητα ή μείωση των εισοδημάτων, τα υψηλά επίπεδα της ανεργίας και το χαμηλό ρυθμό ανάπλασης για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στα κτίρια κατοικιών δημιουργεί ακόμα πιο έντονα την ανάγκη για καταγραφή πρωτογενή δεδομένων αναφορικά με την ενεργειακή φτώχεια.

Πρόσθετης σημασίας στην περίπτωση της ενεργειακής φτώχειας είναι η ενεργειακή αποδοτικότητα της κατοικίας αλλά και η απόδοση του συστήματος θέρμανσης καθώς που αποτελούν και την πιο βιώσιμη λύση εξοικονόμησης ενέργειας [15],[16]. Προς αυτή την κατεύθυνση κινήθηκε η ελληνική κυβέρνηση με τους επιδοτώντας μέτρα αύξησης της ενεργειακής απόδοσης στα κτίρια. Ο Ν.4122/ 19.02.2013 περί της Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων[15]– Εναρμόνιση με την Οδηγία 2010/31/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου και λοιπές διατάξεις[17]επίβαλλε την ενεργειακή αναβάθμιση των κτιρίων, την ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης σε υφιστάμενα κτίρια και την αναβάθμιση της ποιότητας ζωής των ενοίκων. Επιπρόσθετα, η έντονη αυξητική τάση των τιμών ηλεκτρικού ρεύματος, του φυσικού αερίου, του πετρελαίου και των άλλων καυσίμων, η οποία οφείλεται στην αύξηση του κόστους των ενεργειακών πόρων στις διεθνείς αγορές ή στην επιβάρυνση της τελικής ενέργειας με υψηλούς ειδικούς φόρους, οδηγεί στην επιδείνωση της ενεργειακής φτώχειας[18].

Όλα τα παραπάνω οδηγούν στην ενεργειακή φτώχεια με ποίκιλες συνέπειες. Στη Βόρεια Ελλάδα οι συνέπειες αφορούν κυρίως την έλλειψη θέρμανσης και στην Νότια Ελλάδα την έλλειψη ψύξης. Ενώ, σε κάθε περίπτωση πλήττονται η υγιεινή και η υγεία των κατοίκων(ακόμη και με καταγραφές αύξησης της θνησιμότητας). Γεγονός, που οδηγεί τις πληθυσμιακές ομάδες σε κοινωνική και γεωγραφική απομόνωση[1], [2].Επομένως, δεν είναι έκπληξη ότι οι επίσημες στατιστικές δείχνουν ότι σχεδόν το 17% του πληθυσμού της ΕΕ-28 είναι σε κίνδυνο εισοδηματικής φτώχειας, το 9,9% διατρέχει κίνδυνο υλικής στέρησης και περίπου το 23% του πληθυσμού θεωρείται ότι βρίσκεται σε κίνδυνο φτώχειας ή κοινωνικού αποκλεισμού[19].

Στο πλαίσιο αυτό, η συγκεκριμένη εργασία αναλύει και προσδιορίζει τους παράγοντες που οξύνουν και επηρεάζουν το εν λόγω πολύπλοκο φαινόμενο με τη συγκέντρωση δεδομένων από έρευνα πεδίου. Η καινοτομία της εν λόγω εργασία έγκειται στο ότι προσπαθεί να προσδιορίσει, να καταγράψει και να μελετήσει τη μεταξύ αλληλεπίδραση των παραγόντων αυτών. Συγκριμένα, στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η έρευνα πεδίου που διεξήχθη από τον Ιανουάριο 2015 έως και τον Ιούνιο 2016 αναφορικά με την διερεύνηση της ενεργειακής συμπεριφοράς των νοικοκυριών σε περιοχές που χρησιμοποιούν σύστημα θέρμανσης διαφορετικό από τη τηλεθέρμανση και κυρίως στη Βόρεια Ελλάδα. Δεδομένης της έλλειψης και του κατακερματισμού των επιστημονικών στοιχείων σχετικά με τη δυναμική του φαινομένου της ενεργειακής φτώχειας, στην παρούσα εργασία θα γίνει μία προσπάθεια καταγραφής και στατιστικής ανάλυσης του φαινομένου. Στόχος είναι να καταστεί σαφής η σύνδεση μεταξύ των συνθηκών διαβίωσης, της ενεργειακής φτώχειας και των άλλων δεικτών.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην παρούσα έρευνα η λογική που ακολουθήθηκε για τη δημιουργία του πλαισίου απόφασης της μεθοδολογίας συνίσταται σε διακριτά βήματα. Η μεθοδολογία που υιοθετήθηκε για τη συλλογή δεδομένων ήταν με τη βοήθεια ερωτηματολογίου και στην πορεία στατιστικής ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, το μεθοδολογικό πλαίσιο που χρησιμοποιείται αφορά την εξέταση και συλλογή δεδομένων που σχετίζονται με την ενεργειακή φτώχεια. Η συλλογή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ποσοτικών μεθόδων για τη συλλογή δεδομένων με τη χρήση ερωτηματολογίου που σχετίζεται με την οικονομική κατάσταση των κατοίκων, τις συνθήκες διαβίωσής τους και τα χαρακτηριστικά της κατοικίας τους, συμπεριλαμβανομένου του συστήματος θέρμανσης. Οι τρεις αυτοί παράγοντες είναι αυτοί σχετίζονται άμεσα με την ύπαρξη ενεργειακής φτώχειας.

Το αρχικό ερωτηματολόγιο στάλθηκε σε έντυπη μορφή σε παραπάνω από 100 άτομα, ωστόσο απάντησαν μόνο 10. Η βασική αιτία μη αποδοχής του ήταν το γεγονός ότι ήταν προσωποπαγές και παράλληλα περιλάμβανε ερωτήσεις οικονομικών δεδομένων. Επομένως, το ερωτηματολόγιο αναδιαμορφώθηκε. Η δεύτερη έκδοση του ήταν απρόσωπη και περιλάμβανε περισσότερες κλειστές ερωτήσεις. Η δεύτερη έκδοση μοιράστηκε σε 35 άτομα με προσωπική συνέντευξη. Με βάση τις παρατηρήσεις και τις υποδείξεις τους διαμορφώθηκε η τρίτη και τελική έκδοση του ερωτηματολογίου.

Το τελικό ερωτηματολόγιο είναι απρόσωπο. Περιλαμβάνει 5 διαφορετικές ενότητες, 65 ερωτήσεις (28 ερωτήσεις ανοικτού τύπου και 37 κλειστές ερωτήσεις – τύπου Likert). Στόχος του ήταν η καταγραφή των συνηθειών θέρμανσης των κατοίκων της περιοχής μελέτης και η δημιουργία προφίλ χρήστη. Το ερωτηματολόγιο συμπληρώθηκε κυρίως με τη μορφή συνέντευξής. Επιπλέον, δημιουργήθηκε ένα διαδικτυακό ερωτηματολόγιο[1] για να είναι πιο εύκολη η πρόσβαση στα άτομα με ευχέρεια χρήσης υπολογιστή.

Για τη δημιουργία και προετοιμασία αποστολής του υπήρξε μία συγκεκριμένη διαδικασία. Συγκεκριμένα, με βάση τη βιβλιογραφία [20],[21],[22],[23]σχετικά με τις αρχές της Delphi Analysis, δηλαδή μίας μεθόδου συλλογής δεδομένων, δημιουργήθηκε μία λογική συνέχεια για τη διανομή των ερωτηματολογίων. Στόχος ήταν η μέγιστη συγκέντρωσή δεδομένων, ώστε να είναι πιο αντιπροσωπευτικό τα αποτέλεσμα που θα προκύψει.

Οι Γ[2] και Δ[3] κλιματικές ζώνες ήταν αυτές που επιλέχθηκαν για να αποσταλούν ερωτηματολόγια και συγκεκριμένα οι περιφέρειες Δυτικής Μακεδονίας, Κεντρικής Μακεδονίας και Ανατολικής Μακεδονίας

[1] Το ερωτηματολόγιο βρίσκεται στο παρακάτω Link:
https://docs.google.com/forms/d/1Lc1553EZkQbwyimtnlUJUi5nPWP2Ql1-dp5P1LBBuZ0/viewform

[2] Οι περιοχές που υπάγονται στην Γ κλιματική ζώνη με βάση τον ΚΕΝΑΚ είναι οι νομοί: Ευρυτανίας, Ιωαννίνων, Λάρισας, Καρδίτσας, Τρικάλων, Πιερίας, Ημαθίας, Πέλλας, Θεσσαλονίκης, Κιλκίς, Χαλκιδικής, Σερρών (εκτός ΒΑ τμήματος), Καβάλας, Ξάνθης, Ροδόπης, Έβρου και το κομμάτι της ορεινής Αρκαδίας.

και Θράκης. Η επιλογή έγινε με κριτήριο τις ψυχρές κλιματικές συνθήκες, που εκφράζονται με τον υψηλό αριθμό των βαθμοημερών θέρμανσης(κλιματική ζώνη Γ: 1601–2200 βαθμοημέρες θέρμανσης, κλιματική ζώνη Δ: 2201–2620 βαθμοημέρες θέρμανσης), και την πληθυσμιακή συγκέντρωση στα αστικά κέντρα των περιοχών. Επιπλέον, στόχος της έρευνας είναι η καταγραφή των συνεπειών της ενεργειακής φτώχειας αναφορικά με το σύστημα θέρμανσης. Δεδομένου, ότι με βάση τη βιβλιογραφία, μόνο στη Βόρεια Ελλάδα οι συνέπειες αφορούν κυρίως την έλλειψη θέρμανσης, το δείγμα επικεντρώθηκε στην περιοχή αυτή.

Περίπου 1000 ερωτηματολόγια μοιράστηκαν σε έντυπη μορφή σε νοικοκυριά στις προαναφερθείσες περιοχές. Η έρευνα άρχισε τον Ιανουάριο του 2015.

Τα ερωτηματολόγια που συμπληρώθηκαν ήταν συνολικά 764, κυρίως από την περιοχή της Κεντρικής και Δυτικής Μακεδονίας. Ωστόσο, μετά από αξιολόγηση των δεδομένων που συγκεντρώθηκαν, αλλά και συνεκτιμώντας την ανάγκη να εστιάσουμε στα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα συστήματα θέρμανσης, επιλέχθηκε να παρουσιαστούν τα δεδομένα από περιοχές που δεν υπάρχει τηλεθέρμανση. Οι περιοχές αυτές εμφανίζουν περισσότερα κοινά χαρακτηριστικά, ενώ οι περιοχές με τηλεθέρμανση θα αποτελέσουν ιδιαίτερη ομάδα κτιρίων προς διερεύνηση. Αυτή είναι η βασική αντίθεση με το δείγμα που παρουσιάστηκε στην εργασία[24]. Επιπροσθέτως, απορρίφτηκαν τα ερωτηματολόγια που δεν απαντήθηκαν επαρκώς ή που υπήρχαν σημαντικές αντιφάσεις στις απαντήσεις σε τεχνικά ερωτήματα. Κατόπιν όλων αυτών, το δείγμα που παρουσιάζεται στην εν λόγω εργασία αφορά 491ερωτηματολόγια και νοικοκυριά.

Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε με βάση τους κανόνες της τυχαιότητας και το δείγμα θεωρείται στατιστικά επαρκές. Υπενθυμίζεται ότι ένα τυχαίο δείγμα έχει την ιδιότητα ότι το κάθε στοιχείο του πληθυσμού έχει την ίδια πιθανότητα να συμπεριληφθεί στο δείγμα με οποιοδήποτε άλλο. Έτσι, ένα δείγμα που λαμβάνεται τυχαία είναι αμερόληπτο με την έννοια ότι κανένα στοιχείο του πληθυσμού δεν έχει περισσότερες πιθανότητες να επιλεχθεί από οποιοδήποτε άλλο στοιχείο [25].Το δείγμα αναλύεται παρακάτω με τη βοήθεια της περιγραφικής στατιστικής.

Στόχος είναι η λήψη συμπερασμάτων σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή φτώχεια.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Δημογραφικά στοιχεία

Το μεγαλύτερο μέρος του δείγματος προέρχεται από τη Κεντρική Μακεδονία με ποσοστά 59% (εικόνα 1). Οι κύριες εξεταζόμενες περιοχές της Κεντρικής Μακεδονίας είναι η Πέλλα (66%) και η Θεσσαλονίκη (29%). Από τη Δυτική Μακεδονία κυρίως η Καστοριά, η Φλώρινα και η Κοζάνη, ενώ από την Ανατολική Μακεδονία και Θράκη κυρίως η Καβάλα. Το υπόλοιπο 4% του δείγματος προέρχεται κυρίως από την περιφέρεια της Θεσσαλία και την Ήπειρο, που έχουν παρόμοιες κλιματικές συνθήκες με τη υπόλοιπη Βόρεια Ελλάδα.

Το δείγμα του πληθυσμού περιλαμβάνει άτομα από όλες τις ηλικιακές ομάδες και κυρίως τις ηλικιακά ενεργές ομάδες. Συγκεκριμένα, το 65,6% αφορά πληθυσμό από 30 έως 67 ετών. Σε σύγκριση με τα δεδομένα της ΕΛΣΤΑΤ, η ηλικιακή κατανομή του δείγματος πλησιάζει αρκετά με την κατανομή του συνόλου του ελληνικού πληθυσμού όπου το 53% ανήκει στην ίδια ηλικιακή κατανομή.

Όσον αφορά την οικογενειακή κατάσταση των ερωτηθέντων το 40,6% του δείγματος δηλώνουν έγγαμοιμε 2 τέκνα και το 35,1%άγαμοι. Οι ποσοστώσεις δεν έχουν σημαντική απόκλιση από τις ποσοστώσεις του συνολικού ελληνικού πληθυσμού όπου το 39% του συνόλου είναι άγαμοι και το 50% άγαμοι.

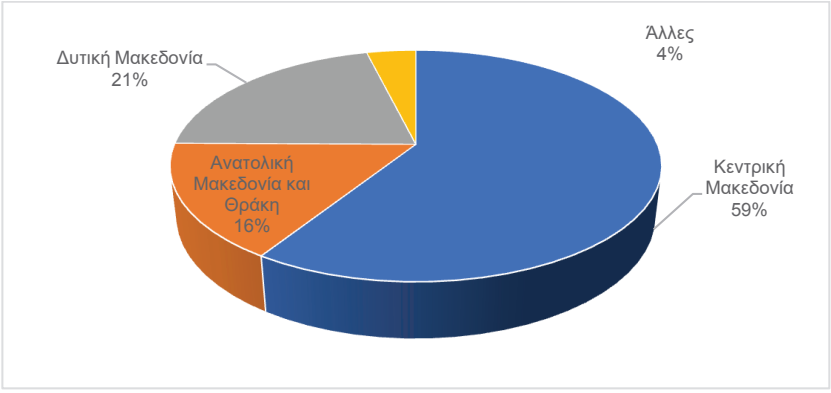
Σχετικά με το επίπεδο μόρφωσης του πληθυσμού που εξετάστηκε, το 59% είναι τριτοβάθμιας εκπαίδευσης. Τα δεδομένα αυτά δε συμπίπτουν με τα δεδομένα της ΕΛΣΤΑΤ, καθώς το 53% των Ελλήνων έχουν υποχρεωτική εκπαίδευση ή είναι αγράμματοι ενώ το ποσοστό των κατόχων πτυχίου τριτοβάθμιας εκπαίδευσης αγγίζει μόλις το 17%.

Το ποσοστό απασχόλησης, δηλαδή το ποσοστό του πληθυσμού εργάσιμης ηλικίας που απασχολείται, θεωρείται ότι αποτελεί βασικό κοινωνικό δείκτη όταν μελετώνται οι εξελίξεις στο εσωτερικό των

[3] Οι περιοχές που υπάγονται στην Δ κλιματική ζώνη με βάση τον ΚΕΝΑΚ είναι οι νομοί: Γρεβενά, Κοζάνη, Καστοριά, Φλώρινα, Σέρρες (ΒΑ τμήμα) και Δράμας καθώς και οι περιοχές της Γ' κλιματικής ζώνης με υψόμετρο πάνω από 500 m.

αγορών εργασίας. Στο συγκριμένο πληθυσμό του δείγματος το ποσοστό απασχόλησης ανέρχεται στο 67.2%, δηλαδή 14% υψηλότερο από το συνολικό ποσοστό απασχόλησης με βάση την ΕΛΣΤΑΤ [26]. Το 41,3% του δείγματος είναι μόνιμοι υπάλληλοι και το 14% ελεύθεροι επαγγελματίες. Το ποσοστό ανεργίας ανέρχεται στο 7,3%, δηλαδή αρκετά χαμηλότερο από το γενικό ποσοστό ανεργίας που είναι 21,1%. Διαχωρισμός με βάση το φύλο δε μπορεί να πραγματοποιηθεί καθώς δε ζητούνταν τέτοιου είδους στοιχεία από το ερωτηματολόγιο καθώς ήταν απρόσωπο.

Το 73% του δείγματος διαθέτει μεταφορικό μέσο και συγκεκριμένα το 55.8% αυτών διαθέτει ΙΧ. Σε σύγκριση με την ΕΛΣΤΑΤ, υπάρχει απόκλιση περίπου 10 ποσοστιαίων μονάδων, αφού εκτιμά ότι το 66% του πληθυσμού διαθέτει ΙΧ. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι περίπου 20% του δείγματος απαρτίζεται από άτομα κάτω των 29 ετών (19%).



Εικόνα 1: Περιοχή της μελέτης του δείγματος.

Το συνολικό διαθέσιμο εισόδημα του νοικοκυριού συμπεριλαμβάνει:

- το εισόδημα που προέρχεται από εργασία (εισόδημα μισθωτών και εισόδημα από αυτοαπασχόληση),
- το ατομικό εισόδημα από επενδύσεις και ακίνητη περιουσία.
- τις χρηματικές μεταβιβάσεις από άλλα νοικοκυριά και
- τα κοινωνικά επιδόματα που λαμβάνονται σε μετρητά συμπεριλαμβανομένων και των συντάξεων.

Επομένως, αναλόγως το ύψος των παραπάνω εισροών, το διαθέσιμο εισόδημα κάθε νοικοκυριού διαμορφώνεται διαφορετικά, με αποτέλεσμα να σχηματίζονται εισοδηματικές ανισότητες, οι οποίες είναι άμεσα συνδεδεμένες με την ποιότητα ζωής.

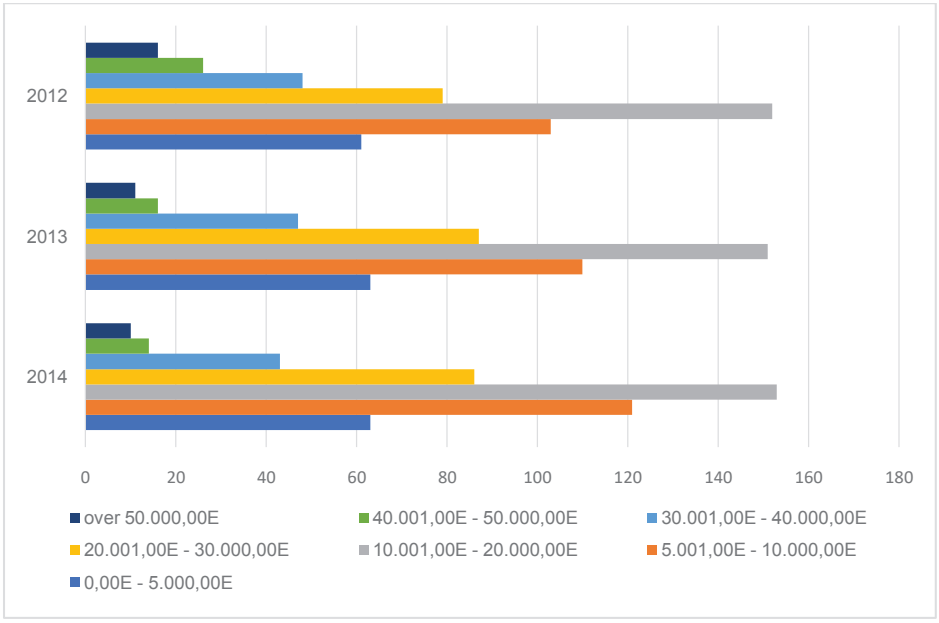
Όσον αφορά το ετήσιο οικογενειακό εισόδημα των νοικοκυριών, στις χαμηλές τάξεις, μέχρι 10.000€ ανήκει το 37,6% των νοικοκυριών, με το 12% αυτών να είναι από 18 έως 29 ετών από τις περιοχές του νομού Πέλλας και Κοζάνης. Το 49% των νοικοκυριών ανήκει στις μεσαίες εισοδηματικές τάξεις από 10.000 μέχρι 30.000€, με το 26% αυτών να είναι κυρίως άτομα 30 έως 39 ετών τα οποία κατοικούν στην Κοζάνη. Τέλος, στις υψηλές εισοδηματικές τάξεις άνω των 30.001€, ανήκει το 14% του πληθυσμού κυρίως από το Νομό Θεσσαλονίκης. Επιπλέον, όσοι είχαν εισόδημα 10.001,00€-20.000,00€ και 0,00€ – 5.000,00€ το διατήρησαν σχετικά σταθερό, ενώ στις υπόλοιπες εισοδηματικές κλίμακες παρατηρούνται σχετικές αυξομειώσεις την τελευταία τριετία (εικόνα 2).

Το 75,1% των κατοικιών που εξετάστηκαν είναι ιδιόκτητες, ποσοστό που προσεγγίζει αρκετά τα δεδομένα της ΕΛΣΤΑΤ (73%) (2016). Το 56,8% του δείγματος ζει σε διαμερίσματα, ποσοστό που απέχει από αυτό της ΕΛΣΤΑΤ (45%). Αυτό συμβαίνει γιατί το δείγμα προέρχεται κυρίως από αστικά κέντρα, όπως η Θεσσαλονίκη και η Κοζάνη.

Το μεγαλύτερο ποσοστό των διαμερισμάτων είναι από 50έως 100m^2. (49,5%) και από 101.-149m^2(37%) στα οποία το 29% των ατόμων είναι μεταξύ 30-39 ετών, με μόνιμη εργασία και μεσαίας

εισοδηματικής τάξης (10.001,00€ – 20.000,00€). Το 37% των ατόμων που κατοικεί σε διαμερίσματα από 100m^2 - 149m^2 είναι κυρίως άνω των 40, με μόνιμη εργασία και με εισόδημα 10.001,00€ – 20.000,00€. Συνολικά, το 75,1% των κατοικιών είναι ιδιόκτητες.

Τέλος, το 56,6% των εξεταζόμενων νοικοκυριών βρίσκεται σε αστικές περιοχές, ενώ το 19,8% σε ημιαστικές-περιαστικές περιοχές. Το ποσοστό των νοικοκυριών που βρίσκονται σε αγροτικές είναι της τάξεως του 18,5% ενώ σε ορεινές περιοχές είναι μόλις 5,1%.



Εικόνα 2: Εξέλιξη του εισοδήματος του δείγματος από 2012 έως το 2015.

3.2. Δεδομένα σχετικά τη με θερμική άνεση και την υγεία

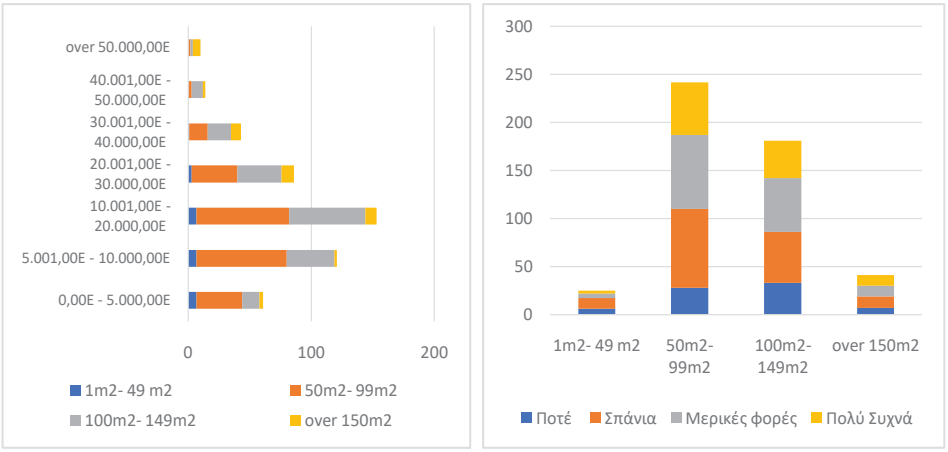
Τα δεδομένα αυτά σχετίζονται άμεσα με τις ώρες θέρμανσης της κατοικίας. Ο δείκτης που αφορά τις ώρες θέρμανσης απεικονίζει το ποσοστό των νοικοκυριών που δηλώνει την αδυναμία να διατήρησης του σπιτιού επαρκώς ζεστό. Ο δείκτης αυτός είναι ο κύριος δείκτη που χρησιμοποιεί ως συγκριτικό εργαλείο μέτρησης της ενεργειακής φτώχειας στη Ευρώπη [14].

Ο δείκτης αυτός αποτελεί το σημαντικότερο κριτήριο για τη θερμική άνεση και σχετίζεται με τον αριθμό των χώρων που θερμαίνονται, τις ώρες λειτουργίας του συστήματος θέρμανσης και την αποδοτικότητα των υφιστάμενων κτιρίων ως προς την εμφάνιση μούχλας και ύπαρξης θορύβου. Ενώ, αποτελεί τον κύριο παράγοντα για την υγεία των κατοίκων καθώς η ύπαρξης θερμοκρασιών κάτω από τους 18ºCδημιουργεί προβλήματα στο ανοσοποιητικό σύστημα των ανθρώπων[27].

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας το 74,7% των νοικοκυριών έχει θερμάνει ολόκληρη την κατοικία του (εικόνα 4). Ενώ, σχεδόν ένα στα πέντε νοικοκυριά είναι οικονομικά αδύναμα, με αποτέλεσμα να θερμάνουν ορισμένους χώρους.

Επιπλέον, το 48% των εξεταζόμενων νοικοκυριών θερμαίνουν την κατοικία τους από 4 έως 10 ώρες με προτιμητέα εσωτερική θερμοκρασία εντός του χώρου της κατοικίας τους 21ºC, με το 47,7% να καταφέρνει να διατηρεί σταθερή αυτή τη θερμοκρασία.

Αναφορικά, με το επίπεδο της υγείας λόγω κακών συνθηκών θέρμανσης, το 48,7% δηλώνει ότι είναι το άριστο. Ενώ, το 1,4%, δηλαδή 7 άτομα, δηλώνουν ότι έχουν έντονα προβλήματα ασθένειας που, κατά τη γνώμη τους, συνδέονται με την ανεπαρκή θέρμανση στο σπίτι.



Εικόνα 3: Μέγεθος κατοικίας σε συνάρτηση με το εισόδημα και τη διατήρηση σταθερής της θερμοκρασίας.

Σχετικά με το σύστημα θέρμανσης, το 79,2% του δείγματος έχει αυτόνομη θέρμανση και κυρίως λέβητα πετρελαίου 54%. Το σύστημα θέρμανσης με Φ.Α. εμφανίζεται μόνο στην περιοχή της Θεσσαλονίκης. Όσοι διαθέτουν σύστημα θέρμανσης πετρελαίου το συνδυάζουν σε μεγάλο ποσοστό (άνω του 25%) με κάποιο άλλο σύστημα θέρμανσης με κυρίαρχο το σύστημα βιομάζας (κυρίως τζάκι). Ενδιαφέρον παρουσιάσει το γεγονός ότι το 5% χρησιμοποίησε 3 και παραπάνω συστήματα θέρμανσης για να καταφέρει να θερμάνει την κατοικία του ενώ, υπήρχαν 2 άτομα από το σύνολο του δείγματος που δήλωσαν ότι δε μπορούσαν οικονομικά να χρησιμοποιήσουν θέρμανση.

Ένα σύστημα θέρμανσης για να είναι αποδοτικό θα πρέπει να εξασφαλίζει ομοιόμορφη και επαρκή αισθητή θερμοκρασία στο θερμαινόμενο χώρο και ταυτόχρονα το κόστος λειτουργίας του να συμβαδίζει με την οικονομική κατάσταση των χρηστών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας το 24,4% των χρηστών είναι δεν ευχαριστημένοι με το υφιστάμενο σύστημα θέρμανσης. Ο κυριότερος λόγος είναι τα υψηλά λειτουργικά κόστη. Επομένως, λογικό είναι ότι το 50,7% έχει αντικαταστήσει το προηγούμενο σύστημα θέρμανσης του κυρίως με σύστημα βιομάζας.

Τέλος, τα αποτελέσματα δε δείχνουν καμία συσχέτιση της επιλογής του συστήματος θέρμανσης με το εισόδημα ή με το μέγεθος της κατοικίας.

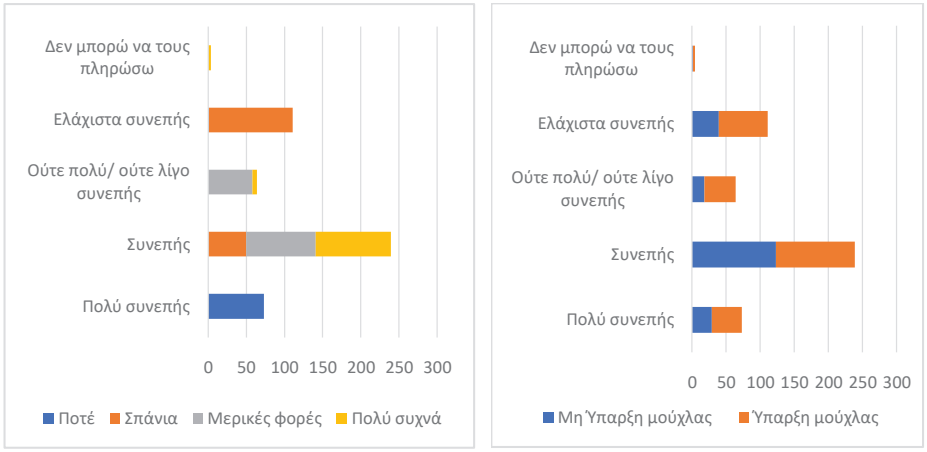
3.3. Δεδομένα σχετικά με αποπληρωμή λογαριασμών ενέργειας

Ο δείκτης των καθυστερημένων λογαριασμών ΔΕΗ ή θέρμανσης προέρχεται από τον ευρύτερο Ευρωπαϊκό στατιστικό δείκτη «Arrears on utility bills», ο οποίος αναφέρεται σε καθυστερημένες οφειλές λογαριασμών κοινής ωφέλειας, όπως θέρμανση, ηλεκτρισμό, νερό, αποχέτευση κλπ. και ο οποίος αποτελεί το δεύτερο υποκειμενικό δείκτη, ευρέως χρησιμοποιούμενο στην Ευρώπη ως εργαλείο μέτρησης της ενεργειακής φτώχειας [14].

Το 63,6% των νοικοκυριών δηλώνει ότι είναι πάρα πολύ έως πολύ συνεπές στην αποπληρωμή των λογαριασμών ενέργειας, με αποτέλεσμα να πληρώνουν τους λογαριασμούς τους μόλις τους λαμβάνουν και πριν λήξουν. Ωστόσο, ένα στα τέσσερα νοικοκυριά, συχνά αργεί ή έχει καθυστερήσει παραπάνω από μια φορά στην αποπληρωμή των λογαριασμών του και 4 νοικοκυριά να μη διαθέτουν τους κατάλληλους πόρους για την αποπληρωμή τους.

Με βάση τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η διάθεση και η πληρωμή των λογαριασμών ενέργειας δε σχετίζεται με το σύστημα θέρμανσης μιας κατοικίας. Συγκεκριμένα, ανεξάρτητα από το είδος θέρμανσης που διαθέτουν, όπως δηλώθηκε και παραπάνω, οι περισσότεροι χρήστες είναι τυπικοί στην αποπληρωμή των ωφελειών τους.

Σχετικά με την αδυναμία διατήρησης σταθερής της θερμοκρασία εντός της κατοικίας, φάνηκε από το δείγμα ότι όσο μεγαλύτερη οικονομική δυσχέρεια αντιμετωπίζει τόσο πιο ασυνεπείς είναι στην πληρωμή των οφειλών τους. Παρόλα αυτά, ακόμα και οι συνεπείς συχνά και πολύ συχνά αντιμετωπίζουν πρόβλημα διατήρησης σταθερής της εσωτερικής θερμοκρασίας εντός της κατοικίας τους (εικόνα 4).



Εικόνα 4: Αποπληρωμή λογαριασμών ενέργειας σε συνάρτηση με τη διατήρηση σταθερής της θερμοκρασίας και την ύπαρξη μούχλας.

Ανάλογα είναι τα αποτελέσματα σχετικά με την αποπληρωμή λογαριασμών ενέργειας σε συνάρτηση με την ύπαρξη μούχλας. Όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 4 η συνέπεια στην πληρωμή λογαριασμών ωφέλειας δε σχετίζεται με τις εσωκλιματικές συνθήκες της κατοικίας και κατ' επέκταση με τη δημιουργία μούχλας. Έτσι, ακόμα και το δείγμα που είναι συνεπές αντιμετωπίζει μούχλα εντός της κατοικίας του.

3.4. Δεδομένα σχετικά με την ποιότητα διαβίωσης

Η ποιότητα διαβίωσης σχετίζεται άμεσα με την ύπαρξη προβλημάτων υγρασίας, μούχλας ή διαρροών. Ο δείκτης αυτός, αναφέρεται στην έρευνα EU–SILC[28] και αποτελεί τον τρίτο υποκειμενικό δείκτη που χρησιμοποιείται ευρέως σε Ευρωπαϊκό επίπεδο ως εργαλείο μέτρησης της ενεργειακής φτώχειας.

Ο δείκτης αυτός, όμως, στην παρούσα έρευνα σχετίζεται με την ύπαρξη κακών συνθηκών θέρμανσης και όχι με την ενδεχόμενης παραμέλησης/εγκατάλειψης του σπιτιού.

Τα αποτελέσματα, έδειξαν ότι το 57,2% έχει πρόβλημα με την εμφάνιση μούχλας εντός της κατοικίας του, κυρίως στο μπάνιο και στα υπνοδωμάτια. Το ποσοστό αυτό είναι ιδιαίτερα υψηλό σε σύγκριση με τα εθνικά δεδομένα: 15,2% για την εμφάνιση μούχλας ΕΛΣΤΑΤ [26].

Στην ερώτηση «Θεωρείτε πως η ποιότητα ζωής σας υποβαθμίστηκε το χειμώνα λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης τα τελευταία τρία (3) χρόνια (2012-2015);» το 34,2% δήλωσε ότι ενοχλείται λίγο, ενώ σχεδόν το ίδιο ποσοστό (34,8%) δήλωσε ότι δεν ενοχλήθηκε από την ατμοσφαιρική ρύπανση. Ωστόσο το 1/4 του δείγματος θεωρεί ότι η ζωή του υποβαθμίστηκε περιβαλλοντικά τα τελευταία 3 χρόνια.

Τα παραπάνω αποτελέσματα συμπίπτουν απόλυτα και με τις απαντήσεις των ερωτηθέντων σχετικά με το κύριο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν στη γειτονιά τους, καθώς το 55,6% δήλωσε ότι δεν αντιμετωπίζει κανένα πρόβλημα. Ενδιαφέρον παρουσιάζει ότι το 2,6% θεωρεί ως το πιο σημαντικό πρόβλημα στη γειτονιά του την ύπαρξη αδέσποτων ζώων. Ένα στα τέσσερα νοικοκυριά βρίσκεται σε περιοχές με λίγο έως καθόλου πράσινο (27,7%).

Το 53% των εξεταζόμενων νοικοκυριών έχει λάβει μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας για το χειμώνα του 2014-2015. Το πιο σύνηθες μέτρο είναι η λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης, φωτισμού όταν δεν είναι απαραίτητα (23,2%). Δηλαδή, ένα σημαντικό ποσοστό προσεγγίζει την αντιμετώπιση της ενεργειακής φτώχειας με αναγκαστικές περικοπές προκειμένου να ικανοποιήσει και να ανταπεξέλθει στις απαραίτητες ενεργειακές ανάγκες. Ενδιαφέρον, παρουσιάζει ότι το 18,9% πέρα από τις περικοπές συνδύασε και άλλες λύσεις εξοικονόμησης ενέργειας για να πετύχει καλύτερο αποτέλεσμα. Παρόλα αυτά, φαίνεται ότι η υιοθέτηση ή μη μέτρων ΕΞΕ δεν επηρεάζεται άμεσα από το διαθέσιμο εισόδημα του δείγματος αλλά εξαρτάται από τη διάθεση αναβάθμισης της ποιότητας ζωής.

Στις ερωτήσεις σχετικά με την καθαριότητα και τον θόρυβο, ο πληθυσμός του δείγματος απάντησε ότι διαβεί σε καθαρές γειτονιές με μέτριο πρόβλημα θορύβου. Δεδομένου ότι το δείγμα προέρχεται κυρίως από αστικά κέντρα λογικό είναι ότι το περίπου το 1/4 δήλωσε ότι υπάρχει έντονο πρόβλημα θορύβου εντός της κατοικίας. Σε γενικές γραμμές ο πληθυσμός του δείγματος είναι ευχαριστημένος από τις εσωτερικές συνθήκες διαβίωσης.

Όπως προαναφέρθηκε, οι παράγοντες που επιδρούν στην ενεργειακή φτώχεια είναι το εισόδημα, το κόστος ενέργειας και η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, οι οποίοι μπορούν να αναλυθούν σε επιμέρους υποπαραμέτρους, όπως οι ώρες θέρμανσης, η εμφάνιση μούχλας και θορύβου εντός της κατοικίας, που αποτελούν τεκμήριο για την ποιότητα εσωτερικού περιβάλλοντος.

Με βάση την βιβλιογραφία που αφορά την ελληνική πραγματικότητα [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [15] δεν έχει επιτευχθεί ποσοτικοποίηση της σχέσης της με τους παράγοντες αυτούς. Επομένως, έως τώρα δεν είναι δυνατή η εκ των προτέρων εκτίμηση της επίδρασης στην ενεργειακή φτώχεια των μέτρων που στοχεύουν στην αντιμετώπισή της.

Για το σκοπό αυτό, οι παραπάνω παράγοντες εξετάστηκαν με τη βοήθεια στατιστικών μεθόδων. Βασικός Στόχος είναι να εντοπιστούν οι παράγοντες εκείνοι που συμβάλλουν καθοριστικά στην ένταση του προβλήματος. Συγκεκριμένα, συσχετίστηκε η ενεργειακή φτώχεια με τον τρόπο θέρμανσης μιας κατοικίας, το εισόδημα, τη λήψη μέτρων εξοικονόμησής ενέργειάς και τη δυνατότητα αποπληρωμής των λογαριασμών ενέργειας.

Η διεξαγωγή των υποθέσεων πραγματοποιήθηκε αρχικά με τη διεξαγωγή ελέγχων γραμμικής συσχέτισης. Αρχικά ελέγχθηκαν αν οι τιμές ακολουθούν κανονική κατανομή. Δυστυχώς η υπόθεσης απορρίπτεται καθώς η p-value είναι μικρότερη από το 0,05. Δηλαδή, στατιστικά όλες οι μεταβλητές δεν περιγράφονται ικανοποιητικά από το υφιστάμενο δείγμα.

Στην πορεία, μετρήθηκε ο συντελεστής συσχέτισης Pearson ώστε να βρεθούν οι συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων που παρουσιάζονται στον πίνακα 1. Όπως φαίνεται, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι δεν υπάρχει καμία γραμμική συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων. Ωστόσο, φαίνεται ότι τα αποτελέσματα έχουν λογική εξήγηση καθώς όσο αυξάνεται το εισόδημα αυξάνονται και οι ώρες θέρμανσης αλλά και βελτιώνονται οι συνθήκες διαβίωσης. Δηλαδή, τα νοικοκυριά με ένα σχετικά μικρό οικογενειακό προϋπολογισμό δε θέτουν τη θέρμανση ως προτεραιότητα, ενώ τα νοικοκυριά με έναν υψηλό λόγο ενεργειακού κόστους/εισοδήματος, η θέρμανση θεωρείται μια βασική ανάγκη.

Πίνακας 1: Συσχέτιση παραγόντων αναφορικά με τις συνθήκες διαβίωσης.

	Σύστημα θέρμανσης	Εισόδημα	Μέτρα ΕΞΕ	Αποπληρωμή ΔΕΚΟ
Ώρες θέρμανσης	-0,039	0,118	-0,039	0,310
Μούχλα	-0.29	-0.81	-0.103	0.106
Θόρυβος	0.017	0.037	0.02	-0.09

Δηλαδή, οι συνθήκες διαβίωσης σχετίζονται με το εισόδημα. Η ενεργειακή φτώχεια μειώνεται στις υψηλότερες εισοδηματικές κατηγορίες και αυξάνεται στις υψηλότερες κατηγορίες ενεργειακού κόστους, όπως είναι αναμενόμενο. Δηλαδή, η πρόσβαση σε υπηρεσίες ενέργειας είναι αυτή που καθορίζει την ύπαρξη ποιότητας ζωής. Αυτό συνάδει και με τους στόχους που καθόρισαν τα Ηνωμένα Έθνη αναφορικά με την μείωση της φτώχειας, την προστασία του πλανήτη, αλλά και την διασφάλιση της ευημερίας στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης [29]. Τα ίδια αποτελέσματα προέκυψαν και από την έρευνα που διενεργήθηκε σε ορεινές περιοχές στην Ελλάδα [30].

Συνδυάζοντας και άλλες παραμέτρους, φαίνεται ότι η δυνατότητα αποπληρωμής λογαριασμών ενέργειας έχει έντονη εξάρτηση με την ύπαρξη μούχλας και με τις ώρες θέρμανσης. Δηλαδή, η ενεργειακή φτώχεια αυξάνεται όσο μειώνεται η εισοδηματική κατηγορία. Το αποτέλεσμα αυτό βρίσκεται σε αναλογία με την αντικειμενική μέτρηση της ενεργειακής φτώχειας και εκφράζει μία διαφορετική πλευρά του προβλήματος.

4. ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΦΤΩΧΕΙΑΣ

Την τελευταία δεκαετία η Ελλάδα εισήλθε σε μία κρίσιμη καμπή της σύγχρονης ιστορίας της, καθώς οι οικονομικές πολιτικές των τελευταίων δεκαετιών την οδήγησαν στα πρόθυρα της χρεοκοπίας. Στα μέσα του 2010 η ελληνική κυβέρνηση αδυνατούσε να δανειστεί με λογικά επιτόκια από τις αγορές για τη χρηματοδότηση του τρέχοντος δημοσιονομικού ελλείμματος και την αναχρηματοδότηση του χρέους. Η προσπάθεια της κυβέρνησης να ανακτήσει την αξιοπιστία της χώρας στις διεθνείς αγορές και να πετύχει μείωση των επιτοκίων οδήγησε σε λήψη μέτρων μείωσης των δαπανών, τα οποία δεν κατάφεραν να ανατρέψουν το αρνητικό κλίμα. Επομένως, προέβη σε χρηματοδότηση από τον μηχανισμό στήριξης με ορούς δημοσιονομικών μέτρων με στόχο την εξυγίανση. Έτσι, αποφεύχθηκε ο άμεσος κίνδυνος στάσης πληρωμών της Ελλάδας, που θα είχε πιθανές ανεξέλεγκτες συνέπειες και για όλη τη ζώνη του ευρώ. Τα πρώτα μέτρα ανακοινώθηκαν από τον πρωθυπουργό τον Μάιο του 2010. Η Ελληνική Οικονομία συνέχισε και συνεχίζει να βρίσκεται σε κατάσταση δημοσιονομικής ανισορροπίας με την κυβέρνηση να καταφεύγει σε νέα προγράμματα λιτότητας και περικοπές.

Ως αποτέλεσμα αυτών, η κρίση έγινε αισθητή σε όλους τους τομείς της καθημερινότητας και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την καθημερινότητα των ανθρώπων. Συγκεκριμένα, ένα από τα μετρά που λήφθηκαν ήταν η αύξηση του ειδικού φόρου κατανάλωσης του πετρελαίου θέρμανσης κατά τη χειμερινή περίοδο 2012 – 2013. Η περίοδος αυτή ήταν μία από τις δυσχερέστερες για τα ελληνικά νοικοκυριά τα οποία δεν μπόρεσαν να προσαρμοστούν σε αυτήν την αλλαγή. Ειδικότερα, ο φόρος αυξήθηκε από τα 0,06€/lt στα 0,33€/lt και εξισώθηκε με τον φόρο του πετρελαίου κίνησης. Το αποτέλεσμα ήταν η μείωση της κατανάλωσης πετρελαίου θέρμανσης κατά 71%. Οι καταναλωτές κατά την περίοδο αυτή, εξαναγκάστηκαν τόσο να μειώσουν την θέρμανσή τους, όσο και να χρησιμοποιήσουν σε πολλές περιπτώσεις πιο ρυπογόνες μορφές καυσίμων, όπως είναι τα καυσόξυλα. Η καύση αυτή είχε ως συνέπεια την πολύ μεγάλη αύξηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε όλες τις ελληνικές πόλεις και την εμφάνιση αιθαλομίχλης ακόμα και στις πιο μικρές πόλεις, εκτός από την Αθήνα και την Θεσσαλονίκη [31].

Η αύξηση του ειδικού φόρου κατανάλωσης οδήγησε την κυβέρνηση στη χορήγηση επιδόματος βάσει εισοδηματικών κριτηρίων και κριτηρίων ακίνητης περιουσίας. Το ποσό επιδόματος ήταν 0,25€/l με όρια ανώτατης κατανάλωσης βάση της Κλιματικής Ζώνης στην οποία εντάσσεται το κάθε νοικοκυριό. Παρά τις συνεχόμενες αυξήσεις της τιμής του πετρελαίου το ποσό αυτό παρέμεινε μέχρι και το 2017 σταθερό γεγονός που καθιστά το μέτρο αναποτελεσματικό.

Παραπλήσια πολιτική εφαρμόστηκε και για την ηλεκτρική ενέργεια :η ΔΕΗ έλαβε μέτρα για τους απλήρωτους λογαριασμούς που έχουν συσσωρευτεί, μέσω ενός προγράμματος σταδιακής εξόφλησης. Ως τον Ιανουάριο του 2017 είχαν εγγραφεί συνολικά 625.000 καταναλωτές, συνολικού ύψους απλήρωτων λογαριασμών 1,3 δισ.€ [32], ενώ τα συνολικά ληξιπρόθεσμα χρέη για το 2016 ανέρχονται σε 2,4 δισ. ευρώ[33].

Δεδομένης της συνέχειας της οικονομικής ύφεσης και των οικονομικών δυσχερειών των ελληνικών νοικοκυριών η κυβέρνηση προχώρησε σε πολιτικές όπως η επέκταση του «Κοινωνικού τιμολογίου», με το οποίο παρέχεται έκπτωση στο οικιακό τιμολόγιο της ΔΕΗ σε ευπαθείς οικονομικά ομάδες. Επιπλέον, αναμένεται να θεσπιστούν αλλαγές στα κλιμάκια χρέωσης της παροχής ενέργειας έτσι ώστε να μην «τιμωρείται» η υψηλή κατανάλωση. Το πρόβλημα αυτό αφορά σχεδόν το 95% των καταναλωτών που λόγω των ακραίων καιρικών συνθηκών του χειμώνα 2016-17 εισήλθαν στην υψηλή κλίμακα κατανάλωσης και επιβαρύνθηκαν για το σύνολο της ενέργειας που κατανάλωσαν με την υψηλότερη τιμή της επόμενης κλίμακας, και όχι μόνο για την υπερβάλλουσα ποσότητα. Τέλος, πρόσφατα εξαγγελθέντα μέτρα κατά της ενεργειακής φτώχειας περιλαμβάνουν την υποστήριξη για την επανασύνδεση του ρεύματος στα ευάλωτα νοικοκυριά, ώστε αφενός μεν αυτά να στηριχθούν, αφετέρου δε να μπορέσουν σταδιακά να καταβάλλουν τις ληξιπρόθεσμες οφειλές τους προς τους προμηθευτές ηλεκτρικής ενέργειας.

Ωστόσο, για την ολιστική λύση του προβλήματος της ενεργειακής φτώχειας απαιτούνται οικονομικές ενισχύσεις για την ενεργειακή ανακατασκευή των κτιρίων και χορήγηση διαφόρων κινήτρων για τον σκοπό αυτό. Επομένως, δίκαια το πρόγραμμα «Εξοικονόμηση Κατ' Οίκον» χαρακτηρίζεται ως η πιο

σημαντική και μακροπρόθεσμη πολιτική ως σήμερα. Πρόκειται για συγχρηματοδοτούμενο πρόγραμμα που παρέχει κίνητρα στους πολίτες (15% έως 70% επιδότηση)προκειμένου να βελτιώσουν την ενεργειακή απόδοση του σπιτιού τους, εξοικονομώντας χρήματα και ενέργεια και αυξάνοντας την αξία του. Ωστόσο, στην πρώτη της φάση η δράση αυτή, αν και οδήγησε σε παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας ύψους μέχρι 55% της πρωτογενούς κατανάλωση ενέργειας μια κατοικίας, δεν κατάφερε να προσελκύσει τη συμμετοχή των πολιτών που είχε τεθεί ως στόχος. Γραφειοκρατικές δυσκολίες καθώς και η εμπλοκή των τραπεζών στη διαδικασία δανειοδότησης, είχε ως αποτέλεσμα ευάλωτα νοικοκυριά να θεωρούνται μη φερέγγυα και να μην μπορούν να τύχουν των ευεργετημάτων του προγράμματος. Στη δεύτερη φάση του προγράμματος, η οποία αναμένεται να ξεκινήσει το 2018, προβλέπονται σημαντικές αλλαγές, ώστε να ξεπεραστούν αυτά τα προβλήματα.

Δεδομένης, λοιπόν, της δημοσιονομικής πολιτικής με τις τιμές ενέργειας να επιβαρύνονται με πολλούς φόρους και με την ύφεση να οδηγεί συνολικά στη δραστική μείωση του διαθέσιμου εισοδήματος των καταναλωτών κρίνεται ως επιτακτικά αναγκαία η διαμόρφωση ενός εθνικού σχεδίου αντιμετώπισης της ενεργειακής φτώχειας, με μακροπρόθεσμες δράσεις που θα δίνουν έμφαση στην αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητα των κτιρίων. Οι αποσπασματικές και όχι επαρκώς μελετημένες πολιτικές επιδοτήσεων προσφέρουν μια πρόσκαιρη ανακούφιση, χωρίς όμως να αντιμετωπίζουν τα αίτια της ενεργειακής φτώχειας, η οποία υποβόσκει και θα επανεμφανίζεται μόλις παύσει η χορήγηση των επιδομάτων.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ενεργειακή φτώχεια συνδέεται με την κατάσταση στην οποία ευρισκόμενο ένα νοικοκυριό δεν έχει τη δυνατότητα να θερμάνει ή να ψύξει την κατοικία του έτσι, ώστε να αισθάνεται θερμικά άνετα. Η ενεργειακή φτώχεια προκαλείται από έναν συνδυασμό τριών παραγόντων [14]:

- Αναποτελεσματική ενεργειακή απόδοση των κτιρίων λόγω των ακατάλληλων συνθηκών διαβίωσης (διαρροές στη στέγη, υγρασία στους τοίχους, τα δάπεδα ή τα θεμέλια).
- Αδυναμία διατήρησης επαρκούς θέρμανσης στις κατοικίες.
- Καθυστέρηση αποπληρωμής λογαριασμών κοινής ωφέλειας που σχετίζεται άμεσα με το χαμηλό ετήσιο εισόδημα και τις υψηλές τιμές πετρελαίου, ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου.

Η έρευνα που παρουσιάζεται στην εργασία αυτήν, αποτελεί μία ουσιαστική συνεισφορά στη μελέτη της ενεργειακής φτώχειας, επικεντρωνόμενη στη Βόρεια Ελλάδα, όπου οι απαιτήσεις θέρμανσης είναι πολύ αυξημένες. Για λόγους ομοιομορφίας του δείγματος, αποκλείστηκαν οι περιοχές με σύστημα τηλεθέρμανσης, καθώς εκεί ισχύουν ιδιαίτερες οικονομικές συνθήκες.

Για να παρουσιαστούν αυτές οι σχέσεις και τα αποτελέσματα της έρευνας χρησιμοποιήθηκε η περιγραφική στατιστική. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η σχέση του εισοδήματος με την ηλικία και το μέγεθος της κατοικίας. Επίσης, συσχετίστηκε το είδος της θέρμανσης που χρησιμοποιεί το κάθε νοικοκυριό και η αποδοτικότητά του με το ετήσιο εισόδημά του, το μέγεθος της κατοικίας του, το εργασιακό καθεστώς και την περιοχή στην οποία βρίσκεται. Τέλος, εξετάστηκε η αδυναμία των νοικοκυριών να πληρώσει τους λογαριασμούς κοινής ωφέλειας.

Στην πορεία, και προκειμένου να γίνει εφικτή η ανάδειξη του φαινομένου της ενεργειακής φτώχειας με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, τα δεδομένα κατηγοριοποιήθηκαν με βάση το μορφωτικό επίπεδο των χρηστών, το εισόδημα των νοικοκυριών, το σύστημα θέρμανσης και την ποιότητα διαβίωσης, ώστε να προκύψουν δείκτες της υφιστάμενης κατάστασης.

Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα της έρευνας, είναι εύλογο ότι το εισόδημα σχετίζεται με την ικανότητα διατήρησης σταθερής της εσωτερικής θερμοκρασίας και με την ικανοποίηση από το υφιστάμενο σύστημα θέρμανσης και την επιθυμητή θερμοκρασία. Ωστόσο, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και το μορφωτικό επίπεδο του χρήστη. Όσο πιο μορφωμένος είναι κάποιος, τόσο καλύτερα μπορεί να κατανοήσει τις αρχές και τα όρια θερμικής άνεσης του, ενώ όσο αυξάνεται το επίπεδο μόρφωσης τόσο βελτιώνεται και η κατάσταση της υγείας του χρήστη. Το μορφωτικό επίπεδο δεν έχει προφανή συσχετισμό με το οικογενειακό εισόδημα, δίνοντας μία ακόμη ένδειξη του πως η μακροχρόνια ύφεση άλλαξε παραδοσιακές συσχετίσεις.

Στην ίδια κατεύθυνση, διαπιστώνεσαι ότι περισσότερο επλήγησαν από την ενεργειακή φτώχεια τα νοικοκυριά μεσαίας εισοδηματικής τάξης. Τα νοικοκυριά αυτά δεν μπορούν πλέον να καλύψουν τις ανάγκες για επαρκή θέρμανση, γεγονός που τους οδήγησε στη χρήση συμπληρωματικού συστήματος θέρμανσης, όπως η χρήση τζακιού ή ξυλόσομπας, με προφανή όμως την υποβάθμιση της θερμικής

άνεσης. Επιπρόσθετα, η εξομοίωση του ειδικού φόρου κατανάλωσης καυσίμων δημιούργησε τις κατάλληλες συνθήκες, ώστε η θέρμανση με ηλεκτρισμό να γίνει, έστω και βραχυπρόθεσμα, μία συμφέρουσα λύση, με προφανείς επιπτώσεις στην ενεργειακή οικονομία της χώρας.

Με βάση τα στοιχεία της έρευνας, οι κατοικίες που χρησιμοποιούν σύστημα πετρελαίου θέρμανσης εμφανίζουν την υψηλότερη αδυναμία διατήρησης σταθερής της εσωτερικής θερμοκρασίας, ανεξαρτήτως της εισοδηματικής τάξης του νοικοκυριού. Το γεγονός αυτό οδήγησε αρκετά νοικοκυριά στην αντικατάσταση του με πιο αποδοτικά συστήματα θέρμανσης, όπως λέβητες πέλλετ. Παρ' όλ' αυτά, ένα στα τέσσερα νοικοκυριά δεν προχώρησε στην αντικατάσταση τους.

Παρά το ό,τι το φαινόμενο έχει γίνει αντιληπτό, τα νοικοκυριά δεν έχουν μπορέσει να λάβουν ουσιαστικά μέτρα αντιμετώπισης του, καθώς η μεγαλύτερη αδυναμία στη διατήρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας εμφανίζεται στα νοικοκυριά με εισόδημα 5.000,00€-10.000,00€.

Καταλήγοντας, δεδομένου ότι η ενεργειακή φτώχεια αποτελεί μείζον κοινωνικό πρόβλημα και τα μέτρα που έχουν ληφθεί για την αντιμετώπισης της, δεν έχουν παράξει τα προσδοκώμενα αποτελέσματα, κρίνεται αναγκαίο να δρομολογηθούν συγκεκριμένες δράσεις: (α) να εφαρμοστεί ένας ενιαίος τρόπος καταγραφής δεδομένων, ώστε να μπορεί να αναλυθεί, αντικειμενικά και σε όλη τη χώρα, το πρόβλημα(β) να επιδιωχθούν ολιστικές λύσεις του φαινομένου και (γ) να σχεδιαστούν εστιασμένες και στοχοθετημένες δράσεις στήριξης των ευάλωτων πληθυσμιακών ομάδων. Στο πλαίσιο αυτό, τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας μπορούν να αποτελέσουν χρήσιμο υπόβαθρο, επιτρέποντας την εστίαση σε επιμέρους τεχνικές, οικονομικές και κοινωνικές διαστάσεις του προβλήματος, στοχεύοντας στην αποτελεσματική και αποδοτική αντιμετώπισή του.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τους προπτυχιακούς φοιτητές και το κοινό που βοήθησε στη συλλογή δεδομένων. Επιπλέον, θα ήθελαν να ευχαριστήσουν το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών που χρηματοδότησε την έρευνα στο πλαίσιο της μεταδιδακτορικής υποτροφίας «ΥΠΟΤΡΟΦΙΕΣ ΑΡΙΣΤΕΙΑΣ Ι.Κ.Υ. ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗΝΕΛΛΑΔΑ – ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ SIEMENS».

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Healy J.D., Clinch P., 2004. Quantifying the severity of fuel poverty, its relationship with poor housing and reasons for non-investment in energy-saving measures in Ireland. Energy Policy 32, pp 207-220.

[2] Howden-Chapman P., Viggers H., Chapman R., O'Sullivan K., Telfar Barnard L., Lloyd B., 2012. Tackling cold housing and fuel poverty in New Zealand: A review of policies, research, and health impacts. Energy Policy 49, pp 134-142.

[3] Directive 2012/27/EU "Energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC".

[4] Directive 2009/73/EC "Common rules for the internal market in natural gas and repealing Directive 2003/55/EC".

[5] ΕΟΚΕ - Ευρωπαϊκή Οικονομική και Κοινωνική Επιτροπή, 2013. ΓΝΩΜΟΔΟΤΗΣΗ του ειδικευμένου τμήματος «Μεταφορές, ενέργεια, υποδομές, κοινωνία των πληροφοριών» με θέμα « Για μια συντονισμένη ευρωπαϊκή δράση για την πρόληψη και την καταπολέμηση της ενεργειακής φτώχειας».

[6] Atsalis A., Mirasgedis S., Tourkolias C., Diakoulaki D., 2016. Fuel povertyin Greece: Quantitative analysis and implications for policy. Energy andBuildings 131, pp 87–98.

[7] Boemi S.-N., Avdimiotis S., PapadopoulosA. M., 2017. Domestic energydeprivation in Greece: A field study. Energy and Buildings144, pp 167–174.

[8] Boemi S.-N., Papadopoulos A. M., 2017. Monitoring energy poverty inNorthern Greece: The energy poverty phenomenon. International Journal ofSustainable Energy 0, pp 1–15

[9] Katsoulakos N. M., Kaliampakos D. C., 2016. Mountainous areas and decentralizedenergy planning: Insights from Greece. Energy Policy 91, pp 174–188.

[10] Papada L., Kaliampakos D., 2017. Energy poverty in Greek mountainousareas: A comparative study. Journal of Mountain Science 14, pp 1229–1240.

[11] Petrova S., 2017. Illuminating austerity: Lighting poverty as an agent and signifierof the Greek crisis. European Urban and Regional Studies. https://doi.org/10.1177/0969776417720250.

[12] Santamouris M., Alevizos S. M., Aslanoglou L., Mantzios D., Milonas P., Sarelli, I., Karatasou S., Cartalis K., Paravantis, J. A. (2014). Freezing the poor—Indoor environmental quality in low and very low-income households during the winter period in Athens. Energy and Buildings 70, pp 61–70.

[13] KolokotsaD.,Santamouris M., 2015. Review of the indoor environmental quality and energy consumption studies for low income households in Europe.Science of the Total Environment 536, pp 316–330.

[14] BPIE, 2015. Building Performance Institute Europe “Alleviating fuel poverty in the EU”. Url: http://bpie.eu/wp-content/uploads/2015/10/Alleviating-fuel-poverty.pdf (τελ. ημερ. πρόσβασης 20/09/2016).

[15] Dagoumas A., Kitsios F., 2014. Assessing the impact of the economic crisis on energy poverty in Greece. Sustainable Cities and Society 13, pp 267–278.

[16] Buzar S., 2007. When homes become prisons: the relational spaces of post-socialist energy poverty. Environment and Planning A 39, pp 1908-1925.

[17] Ν. 4122/ 19.02.2013, ″Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων – Εναρμόνιση με την Οδηγία 2010/31/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου και λοιπές διατάξεις″.

[18] BegN., MorlotJ.C., DavidsonO., Afrane-OkesseL., TyaniL., DentonF., SokomaY., ThomasJ.P., LaRovereE.L., ParikhJ.K., ParikhK., AtiqRahmanA., 2002. Linkanges between climate change and sustainable development. Climate policy 2, pp 129-144.

[19] Eurostat, 2017. The EU in the world – the living conditions. URL: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/The_EU_in_the_world_-_living_conditions (τελ. ημερ. πρόσβασης 15/11/2017)

[20] Derian J.D., Morize F., 1973. Delphi in the assessment of research and development projects. Futures 5, pp 469-483.

[21] Green H., Hunter C., Moore Br., 1990. Assessing the environmental impact of tourism development: Use of the Delphi technique. Tourism Management 11, pp 111-120.

[22] Miller G., 2001. The development of indicators for sustainable tourism: results of a Delphi survey of tourism researchers. Tourism Management 22, pp 351-362.

[23] Chris Choi H.S., Sirakaya, E., 2006. Sustainability indicators for managing community tourism. Tourism Management 27, pp 1274-1289.

[24] Boemi S.N., Papadopoulos A.M., 2016. Monitoring energy poverty in Northern Greece: the energy poverty phenomenon. International Journal of Sustainable Energy, pp 1-15

[25] Creswell J.W., 1998. Qualitative Inquiry and Research Design: Choosing among Five Traditions. London and Thousand Oaks, CA; Sage Publications.

[26] ΕΛΣΤΑΤ, 2017. Η ελληνική οικονομία. Στοιχεία για την Απασχόληση, Url: http://www.statistics.gr/documents/20181/7146171/greek_economy_19_01_2018.pdf/073874ef-84ca-4a58-be03-c7ece85a3dcc?version=1.0 (τελ. ημερ. πρόσβασης 30/01/2018).

[27] The Energy Action Project (ENACT), 2017. What do cold homes cost a country?Url: http://www.coldathome.today/what-do-cold-homes-cost-a-country?utm_content=bufferb3357&utm_medium=social&utm_source=facebook.com&utm_campaign=buffer (τελ. ημερ. πρόσβασης 30/01/2018).

[28] EU Silk, 2017. Housing statistics. Url: http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Housing_statistics (τελ. ημερ. πρόσβασης 30/01/2018).

[29] Ηνωμένα Έθνη, 2017. Sustainable Development Knowledge Platform, Sustainable Development Goals. Url: https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs(τελ. ημερ. πρόσβασης 30/01/2018).

[30] Παπαδά Λ., 2017. Ανάπτυξη στοχαστικού μοντέλου για την ανάλυση της ενεργειακής φτώχειας στην Ελλάδα. Η περίπτωση τωνορεινών περιοχών. Διδακτορική Διατριβή στοΕΜΠ.

[31] Μποέμη Σ.Ν., Ζέρβας Ε., 2014. Οι επιπτώσεις της οικονομικής κρίσης στον τρόπο θέρμανσης και στη θερμική άνεση των κατοίκων της Αθήνας. 10^{o}Εθνικό συνέδριο για τις ήπιες μορφές ενέργειας, Θεσσαλονίκη, 26 - 28 Νοεμβρίου.

[32] Reuters, 2017. Greece's dark age: how austerity turned off the lights. Url: http://www.reuters.com/article/us-eurozone-greece-poverty-electricity-idUSKBN1781IQ (τελ. ημερ. πρόσβασης 30/01/2018).

[33] CNN, 2017. Σε κρίση ρευστότητας η ΔΕΗ – Κρίσιμοι οι επόμενοι 15 μήνες. Url: http://www.cnn.gr/oikonomia/story/101710/se-krisi-reystotitas-i-deh-krisimoi-oi-epomenoi-15-mines (τελ. ημερ. πρόσβασης 30/01/2018).

ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΑΠΟΔΟΧΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΕΡΓΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΤΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΚΡΙΣΗΣ

Δ. Μπουλογιώργου[1], Κ. Χριστόπουλος[1], Χρ. Παπαποστόλου[2], Ι.Κ. Καλδέλλης[1*]

[1]Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ, ΤΘ 41046, 12201 Αθήνα
**Corresponding author: jkald@puas.gr*

[2]Εργαστήριο Αριστοποίησης Παραγωγικών Συστημάτων,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ,
Πέτρου Ράλλη & Θηβών 250, 12244 Αιγάλεω

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια η παρουσία των αιολικών πάρκων και των φωτοβολταϊκών σταθμών στη χώρα μας έχει αυξηθεί σημαντικά, καθώς σήμερα η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των τεχνολογιών αυτών ξεπερνά τα 5000MW_e. Ειδικά κατά την περίοδο της οικονομικής κρίσης η "επανάσταση" στην εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών κάθε μεγέθους καθώς και η σταθερή επενδυτική επιλογή δημιουργίας νέων αιολικών πάρκων αποτέλεσαν τις πλέον σημαντικές οικονομικές δραστηριότητες στη χώρα μας, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα και αρκετές εξειδικευμένες θέσεις εργασίας. Στα πλαίσια αυτά, όπως προκύπτει και από σειρά δημοσιευμένων ερευνητικών εργασιών τα τελευταία χρόνια, το κοινωνικό σύνολο στη χώρα μας είχε στη μεγάλη του πλειοψηφία θετική άποψη για τους ενεργειακούς σταθμούς ανανεώσιμης βάσης.

Ωστόσο, από τη στιγμή που οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έπαψαν να είναι "εναλλακτικές" ενεργειακές επιλογές μικρής δυναμικότητας, σε αρκετές περιπτώσεις νέο-σχεδιαζόμενα έργα άρχιζαν να αντιμετωπίζονται -όχι πάντα άδικα- με έντονη κριτική διάθεση. Ειδικότερα κατά τα τελευταία χρόνια όπου διάφοροι επενδυτικοί όμιλοι, διεθνών κατά κανόνα συμφερόντων, άρχισαν να ανακοινώνουν "φαραωνικού" τύπου έργα χωρίς να έχει προηγηθεί επικοινωνία με τις τοπικές κοινωνίες, η κοινωνική στάση έναντι των έργων ΑΠΕ φαίνεται να αλλάζει δραματικά.

Σε μια προσπάθεια αντικειμενικής διερεύνησης του θέματος, ομάδα μεταπτυχιακών φοιτητών του Εργαστηρίου Ηπίων Μορφών Ενέργειας και Προστασίας του Περιβάλλοντος (ΗΜΕ & ΠΡΟΠΕ), καθώς και του Εργαστηρίου Αριστοποίησης Παραγωγικών Συστημάτων του ΑΕΙ Πειραιά ΤΤ, διεξήγαγε σχετική έρευνα σε ικανό δείγμα πολιτών από διάφορες αστικές και αγροτικές περιοχές, με στόχο να αποτυπωθεί η άποψη της κοινής γνώμης απέναντι στα υφιστάμενα αλλά κυρίως στα νέα αιολικά πάρκα και στους νέους φωτοβολταϊκούς σταθμούς.

Ακολούθησε στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων της έρευνας και σύγκρισή τους με παλαιότερες σχετικές ελληνικές και διεθνείς έρευνες. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν δεν ανατρέπουν προς το παρόν το θετικό κλίμα υπέρ των εφαρμογών ΑΠΕ στη χώρα μας, ωστόσο υπογραμμίζουν την ανάγκη για παροχή διαβεβαιώσεων τόσο για την ωφέλιμη λειτουργία τους όσο και περί της οικονομικής βιωσιμότητας των προτεινόμενων έργων, προκειμένου να γίνουν αποδεκτά από τις εκάστοτε τοπικές κοινωνίες.

Λέξεις Κλειδιά*: Αιολικά Πάρκα, Φωτοβολταϊκοί Σταθμοί, Φέρουσα Ικανότητα, Έρευνα Κοινής Γνώμης, Επενδύσεις ΑΠΕ*

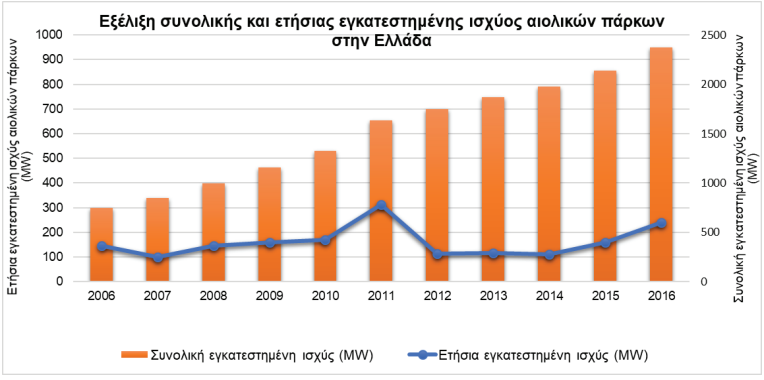
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια αποτελούν συνειδητή επιλογή οι επενδύσεις τόσο στην αντικατάσταση υπαρχουσών ενεργειακών μονάδων συμβατικών καυσίμων με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) όσο και σε νέες μονάδες, με έμφαση στους φωτοβολταϊκούς σταθμούς και στα αιολικά πάρκα. Σύμφωνα με την έκθεση προόδου του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου για την ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές (ΑΠΕ) [1], οι ΑΠΕ έχουν καθοριστικό ρόλο στην ενεργειακή ασφάλεια, με τη συμβολή τους στην εξοικονόμηση εισαγωγών ορυκτών καυσίμων το 2015 να εκτιμάται στα 16 δισ. Ευρώ, εξοικονόμηση που προβλέπεται ότι θα ανέλθει σε 58 δισ. Ευρώ το 2030. Επιπλέον, χάρη στο ταχέως μειούμενο κόστος που αποδίδεται στην τεχνολογική πρόοδο, ιδιαίτερα στον τομέα της ενέργειας, οι ΑΠΕ μπορούν σταδιακά να ενταχθούν περαιτέρω στην αγορά. Η εν λόγω ένταξή τους θα υποστηριχθεί από την αναδιατύπωση της σχετικής οδηγίας για την περίοδο μετά το 2020, σε συνδυασμό με προτάσεις για το σχεδιασμό της αγοράς στο πλαίσιο της πρότασης για «Καθαρή Ενέργεια για όλους τους Ευρωπαίους»[2].

Παράλληλα, οι ΑΠΕ, διαδραματίζουν μείζονα ρόλο στην προσπάθεια να καταστεί η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) παγκόσμια ηγετική δύναμη στην καινοτομία. Η ΕΕ, στην οποία αντιστοιχεί το 30% των σχετικών ευρεσιτεχνιών παγκοσμίως, είναι πρωτοπόρος στον συγκεκριμένο τομέα και έχει δεσμευτεί να θέσει σε προτεραιότητα την έρευνα και την καινοτομία για την περαιτέρω προώθηση της ενεργειακής μετάβασης, με τη δημιουργία παράλληλα, κατάλληλων θέσεων εργασίας.

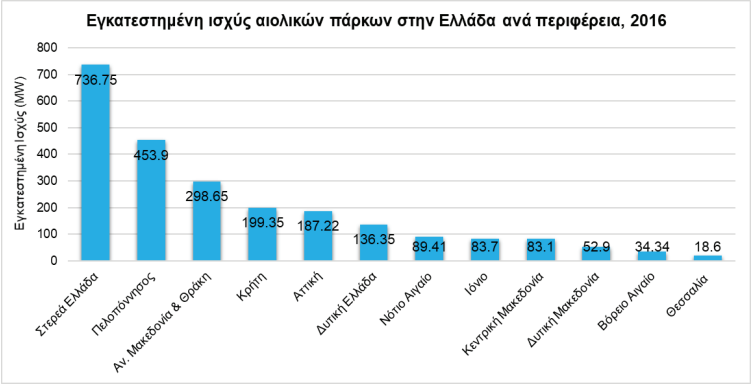
Επομένως, η επενδυτική επιλογή στις ΑΠΕ τόσο σε Ευρωπαϊκό επίπεδο όσο και σε εθνικό, τείνει να καταστεί ασφαλής επενδυτική επιλογή, η οποία ενισχύεται από την ύπαρξη κατάλληλου νομοθετικού πλαισίου με φορολογικές προβλέψεις και χρηματοδοτικά εργαλεία για τους επενδυτές καθώς και από την πλήρη συνειδητοποίηση για την αναγκαιότητα της εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων φυσικών πόρων που διατίθενται σε ανεξάντλητη βάση, έναντι των πεπερασμένων ορυκτών πόρων, που επιπλέον επιβαρύνουν το περιβάλλον.

Στα πλαίσια αυτά, στην Ελλάδα την τελευταία δεκαετία (2006-2016), έχει καταγραφεί σημαντική αύξηση στην εγκαταστημένη ισχύ των αιολικών πάρκων, ακολουθώντας ένα μέσο ρυθμό αύξησης 12% (Σχήμα 1.1), πλήρως αντιπροσωπευτικό και για το έτος 2015-16, με τον κύριο όγκο των εγκατεστημένων αιολικών πάρκων να φιλοξενούνται στη Στερεά Ελλάδα, στην Πελοπόννησο και στην Ανατολική Μακεδονία – Θράκη, με ποσοστά 31%, 19% και 12,6% αντίστοιχα (Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.1: Εξέλιξη συνολικής και ετήσιας εγκατεστημένης ισχύος αιολικών πάρκων στην Ελλάδα [3]

Παράλληλα, τα φωτοβολταϊκά πάρκα, των οποίων η σχετική αγορά ξεκίνησε ιδιαίτερα ενθαρρυντικά (2011-13), την τελευταία τριετία παρουσιάζει σταθεροποιητικές τάσεις, και σε επίπεδο ετήσιας ποσοστιαίας αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος έπεσε στα επίπεδα του 2007-2008 (Σχήμα 1.3), κυρίως λόγω της καθυστέρησης της υιοθέτησης του νέου θεσμικού πλαισίου [4], με το ηπειρωτικό δίκτυο να συμμετέχει σε ποσοστό 93% έναντι των Μη Διασυνδεδεμένων Νησιών.



Σχήμα 1.2: Συνολική εγκατεστημένης ισχύς Α/Γ στην Ελλάδα ανά περιφέρεια, για το 2016 [3]



Σχήμα 1.3: Εξέλιξη της ετήσιας εγκατεστημένης ισχύος φωτοβολταϊκών πάρκων στην Ελλάδα [4]

Παρόλη τη σχετικά περιορισμένη ακόμα συμμετοχή των ΑΠΕ στα νησιωτικά δίκτυα, ιδιαίτερο ενδιαφέρον υπάρχει πλέον για τη διανεμημένη παραγωγή ενέργειας, η οποία αποτελούμενη από πολλές, μικρές και γεωγραφικά διεσπαρμένες μονάδες, παρέχει τη δυνατότητα για λύσεις άμεσης ηλεκτρικής αυτονομίας, ακόμα και σε δυσπρόσιτες περιοχές και αντίστοιχους καταναλωτές. Στον τομέα αυτό, που αποτελεί και άξονα προτεραιότητας της ΕΕ, έχουν σχεδιαστεί και βρίσκονται προς υλοποίηση ενεργειακές επενδύσεις και ερευνητικά έργα που στοχεύουν στην ικανοποίηση της ζήτησης με λύσεις κατάλληλης κλίμακας μεγέθους, με την ελάχιστη δυνατή επιβάρυνση του περιβάλλοντος και της σχετικής τοπικής κοινωνίας.

Σε μονάδες αυτής της κλίμακας η κοινωνική αποδοχή της προτεινόμενης πράξης αποτελεί στην πραγματικότητα μία συνεργατική διαδικασία μεταξύ της τοπικής κοινωνίας και του υπεύθυνου του έργου, με διαρκή αλληλεπίδραση, ενημέρωση και συμμετοχή στη λήψη των αποφάσεων. Οι κάτοικοι, στις περιπτώσεις αυτές, όχι μόνο αποδέχονται θετικά την προς υλοποίηση πράξη, αλλά διευκολύνουν και επικοινωνούν τα οφέλη του έργου, αναλαμβάνοντας ενεργό δράση. Κατά περίπτωση η ενεργός αυτή δράση δύναται να φτάσει σε σχήματα οργανωμένα, δημιουργώντας οικονομικές προοπτικές κερδοφορίας για τις ίδιες τις τοπικές κοινωνίες με τη σύσταση των ενεργειακών συνεταιρισμών.

Η κοινωνική αποδοχή των ΑΠΕ αποτελεί σημαντικό μέλημα και της ΕΕ. Η αναγκαιότητα συμμέτοχης των πολιτών στην υγιή ανάπτυξη της πολιτικής, της τεχνολογίας και της επιχειρηματικότητας μπορεί να διασφαλιστεί μόνο με τη συνεργασία. Ωστόσο, η απομάκρυνση των πολιτών από τα κοινά, και η επιβολή ενεργειακών λύσεων οι οποίες ξεπερνούν τα «όρια» της περιοχής, δημιουργούν δυσλειτουργίες, τόσο σε επίπεδο διοίκησης όσο και σε επίπεδο κοινωνίας. Υπάρχουν δε περιπτώσεις όπου η κλίμακα του προτεινόμενου έργου, έχει ενθαρρύνει την αμφισβήτηση και απόρριψη της επενδυτικής πρότασης για λόγους μη καταλληλόλητας ή αδυναμίας ενσωμάτωσης του έργου στην υπό μελέτη περιοχή.

Αναλογιζόμενοι τα ως άνω, η έρευνα που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία αποσκοπούσε στην καταγραφή της κοινωνικής αποδοχής έργων ΑΠΕ (αιολικών και φωτοβολταϊκών πάρκων) σε αγροτικές και αστικές περιοχές στην ηπειρωτική Ελλάδα, όπου συγκεντρώνεται ο κύριος όγκος των εγκαταστάσεων ΑΠΕ. Στόχος ήταν, αφενός να ενημερώσει-ευαισθητοποιήσει την εκάστοτε τοπική κοινωνία για την προτεινόμενη πράξη και αφετέρου να καταγράψει τις πεποιθήσεις και τις απόψεις αναφορικά με τα νέα έργα ΑΠΕ στις περιοχές μελέτης. Επιπλέον, στις περιπτώσεις που κατέστη δυνατό, αποτυπώθηκε η διάθεση και οι προϋποθέσεις της συμμετοχής των κατοίκων σε τέτοιου τύπου έργα.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Οι υπό μελέτη περιοχές και το δείγμα των ερωτηθέντων

Η παρούσα έρευνα, η οποία διεξήχθη μέσω προσωπικών ερωτηματολογίων, είχε ως στόχο την αποτύπωση της γνώσης του κοινού σχετικά με τις ΑΠΕ καθώς και της γνώμης του για την εγκατάσταση νέων έργων κοντά στην περιοχή κατοικίας του(ς). Στην έρευνα συμμετείχαν συνολικά 66 άτομα, κατά βάση δευτεροβάθμιας και τριτοβάθμιας εκπαίδευσης, απλοί πολίτες και νοικοκυριά.

Στην πλειοψηφία τους, 34 άτομα, οι ερωτηθέντες ήταν κάτοικοι της περιοχής της πόλης των Αθηνών (Αθήνα, Ηλιούπολη, Νέα Ιωνία, Δάφνη), 9 κάτοικοι ημιαστικών και αγροτικών περιοχών των προαστίων της Αττικής, 17 από την περιοχή της Πελοποννήσου και οι υπόλοιποι από την περιοχή της Ευβοίας. Το πλήθος των συμμετεχόντων θεωρείται ικανοποιητικό και αξιόπιστο σύμφωνα με την εμπειρικά θεμελιωμένη θεωρία “Grounded Theory” [5], καθώς επιλέχθηκε με βάση την ακόλουθη διαδικασία: Συλλέγονται απαντήσεις μέχρι να μην καταγράφονται σημαντικές διαφορές από τις καινούργιες απαντήσεις. Αυτό το σημείο λέγεται σημείο κορεσμού (saturation point) και στην παρούσα περίπτωση ήταν το μέγεθος το οποίο συμπεριελήφθη στην έρευνα.

Επί του δείγματος υπήρξε ικανοποιητικός βαθμός ανταπόκρισης (~85%), και τα ερωτηματολόγια συμπληρώθηκαν δια ζώσης, με προσωπική επικοινωνία/συνάντηση με τους ερωτηθέντες. Συμπληρώθηκαν 56 ερωτηματολόγια που αφορούσαν στην ηλιακή ενέργεια και 57 στην αιολική ενέργεια. Μέσος όρος ηλικίας των ερωτηθέντων είναι τα 42 έτη, με ηλικιακό εύρος από 19 έως 77 έτη. Θα πρέπει να υπογραμμιστεί επίσης, ότι στις αστικές περιοχές κατοικίας των ερωτηθέντων κατά πλειοψηφία δεν υπάρχουν έργα ΑΠΕ σε κοντινή απόσταση, ενώ οι αγροτικές περιοχές έχουν σημαντικό ιστορικό τόσο εγκατεστημένων πάρκων όσων και κοινωνικής εναντίωσης σε αντίστοιχα έργα.

2.2. Το ερωτηματολόγιο

Το ερωτηματολόγιο που χρησιμοποιήθηκε, τόσο για τα φωτοβολταϊκά όσο και για τα αιολικά πάρκα, συντάχθηκε με βάση τις ήδη υλοποιηθείσες μελέτες αναφορικά με την αποτύπωση έργων ΑΠΕ στην Ελλάδα [6-9] και στην Ευρώπη [10-12] και περιλάμβανε ερωτήσεις:

- γνώσης – αναγνώρισης των υπό εξέταση τεχνολογιών ΑΠΕ
- καταγραφής του περιβαλλοντικού αντίκτυπου και αισθητικής όχλησης των εν λόγω τεχνολογιών
- αποδοχής των υφιστάμενων εγκαταστάσεων στις υπό μελέτη περιοχές, καθώς και
- αναγνώρισης-διάθεσης εμπλοκής/συμμετοχής, σε αντίστοιχα μελλοντικά έργα.

Πιο συγκεκριμένα, οι δύο πρώτες κύριες ερωτήσεις, πέραν των δημογραφικών στοιχείων, αφορούσαν στις σχετικές γνώσεις των ερωτηθέντων αναφορικά με τις δύο υπό εξέταση ΑΠΕ. Η τρίτη ερώτηση αποσκοπούσε στην αποτύπωση της γνώμης του κοινού αναφορικά με τη συμβολή της αιολικής και φωτοβολταϊκής ενεργειακής παραγωγής στην προστασία ή μη του φυσικού περιβάλλοντος, σε συνάρτηση μάλιστα με τη μείωση των εισαγόμενων ποσοτήτων πετρελαίου. Η τέταρτη και πέμπτη ερώτηση στόχευαν στην αποτύπωση της πιθανής όχλησης του κοινού είτε με βάση την εμπειρία από την ίδια τους την περιοχή, είτε δηλώνοντας εν γένει την άποψή τους για τις σχετικές τεχνολογίες ΑΠΕ. Η έκτη ερώτηση αφορούσε στην άποψη του κοινού αναφορικά με τις υφιστάμενες εγκαταστάσεις. Η έρευνα καταλήγει σε δύο ερωτήσεις αποδοχής ή μη της εγκατάστασης νέων έργων ΑΠΕ στην περιοχή των ερωτηθέντων, και στη διερεύνηση της πρόθεσης συμμετοχής τους στα έργα αυτά, συνυπολογίζοντας και το πιθανό οικονομικό όφελος γι’ αυτούς.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ερωτηματολογίων, διαπιστώνονται υψηλά επίπεδα αποδοχής και για τις δύο τεχνολογίες ΑΠΕ που εξετάστηκαν. Ωστόσο, ορισμένοι ερωτηθέντες εμφανίστηκαν

σκεπτικοί σχετικά με τα ενεργειακά έργα που αφορούν στην περιοχή τους, εκτός εάν ήταν πεπεισμένοι για την αποτελεσματικότητά τους. Σε όλες τις περιπτώσεις, το σύνολο των ατόμων που ανταποκρίθηκαν ήταν εξοικειωμένα με τις βασικές αρχές των αιολικών και των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, καθώς ήταν καλά ενημερωμένοι σχετικά με τη χρήση και τα αποτελέσματα της κάθε μιας από τις υπό μελέτη ενεργειακές πηγές.

Πιο συγκεκριμένα, η αποδελτίωση των ερωτηματολογίων που αφορούν στη φωτοβολταϊκή ενέργεια (Ερώτηση 3, Σχήμα 3.1), κατέδειξε ότι περίπου το 80% των ερωτηθέντων δήλωσαν πληροφορημένοι για τα εν δυνάμει περιβαλλοντικά της οφέλη, αναγνωρίζοντας ότι η τεχνολογία αυτή είναι σημαντική για τη μείωση των εισαγωγών πετρελαίου στην Ελλάδα, ενώ μόνο το 5% υποστήριξε ότι ακόμη και αν υπάρχει εξοικονόμηση ενέργειας μέσω των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, εκτιμά ότι σημειώνονται και επιζήμιες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Το υπόλοιπο 15% των ερωτηθέντων δήλωσε άγνοια αναφορικά με την επίδραση της συγκεκριμένης ενεργειακής τεχνολογίας στο περιβάλλον και στις εισαγωγές πετρελαίου.

Αντίστοιχη εικόνα παρουσιάζουν και τα αποτελέσματα που αφορούν στην αιολική ενέργεια (Ερώτηση 3, Σχήμα 3.1): περίπου το 14% των ερωτηθέντων είχε την πεποίθηση ότι η λειτουργία των αιολικών πάρκων είναι επιβλαβής για το περιβάλλον, ακόμη και αν εξοικονομούνται μεγάλες ποσότητες συμβατικών καυσίμων, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό (75%) απάντησε θετικά σχετικά με τη συνεισφορά της αιολικής ενέργειας στην προστασία του περιβάλλοντος και στη μείωση της κατανάλωσης των ορυκτών καυσίμων. Το υπολειπόμενο 11% των ερωτηθέντων, φαίνεται να μη γνωρίζει ποια είναι η επίδραση της αιολικής ενέργειας στο περιβάλλον και στην εξοικονόμηση πετρελαίου.



Σχήμα 3.1: Η κοινή γνώμη σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ΑΠΕ (Ερώτηση 3)



Σχήμα 3.2: Η κοινή γνώμη για την οπτική αποδοχή υφιστάμενων εγκαταστάσεων ΑΠΕ (Ερώτηση 4)

Όσον αφορά στην οπτική όχληση που προκαλούν οι υφιστάμενες ανεμογεννήτριες (Α/Γ) και τα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) πάρκα στις περιοχές των ερωτηθέντων (Ερώτηση 4), το κοινό

εμφανίστηκε αρκετά διχασμένο (Σχήμα 3.2). Συγκεκριμένα, το 33% των ερωτηθέντων εξέφρασαν θετική στάση αναφορικά με την οπτική επίδραση των αιολικών πάρκων, δηλώνοντας ότι δεν επηρεάζονται οπτικά από την παρουσία ανεμογεννητριών. Ένα ακόμη μεγαλύτερο ποσοστό της τάξης του 48% εμφανίστηκε να μην ενοχλείται (οπτικά) από τα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά συστήματα. Το σημαντικό είναι πως ένα αξιοσημείωτο ποσοστό από τους ερωτηθέντες (16%), θεωρεί ότι οι ανεμογεννήτριες της περιοχής του είναι οπτικά ελκυστικές. Αντιθέτως, το ποσοστό όσον αφορά στην ελκυστικότητα των φωτοβολταϊκών, είναι μόνο 4%.

Από την άλλη πλευρά, με ποσοστά της τάξης του 32% για τις Α/Γ και 29% για τις Φ/Β εγκαταστάσεις, οι ερωτηθέντες βρήκαν τις εγκαταστάσεις αυτές είτε οπτικά ενοχλητικές (11% για Α/Γ και Φ/Β) είτε όχι αισθητικά σωστές (21% για Α/Γ και 18% για Φ/Β). Αρκετά σημαντικό ήταν το μερίδιο εκ των ερωτηθέντων, που δεν εξέφρασαν γνώμη για τις αισθητικές επιπτώσεις των ΑΠΕ της περιοχής τους, με ποσοστά 19% για τα υφιστάμενα αιολικά και 20% για τα φωτοβολταϊκά αντίστοιχα.

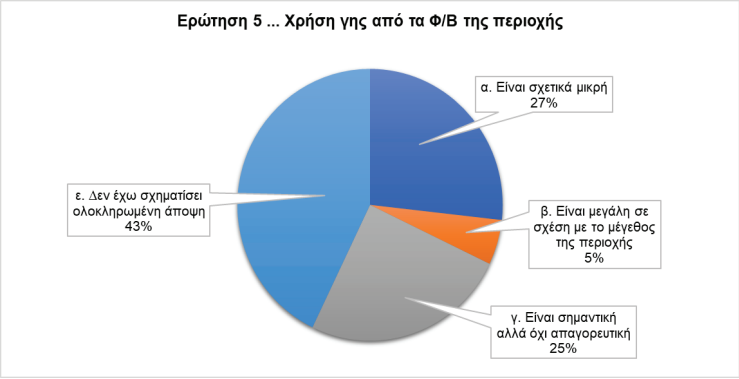
Σε θετικότερα επίπεδα από αυτά που αφορούσαν στις οπτικές επιπτώσεις κυμάνθηκαν οι απαντήσεις σχετικά με την ακουστική όχληση εξαιτίας των υφιστάμενων ανεμογεννητριών (Σχήμα 3.3, Ερώτηση 5α). Η πλειοψηφία των ερωτηθέντων (58%), δεν αισθάνεται ενοχλημένη από το θόρυβο που παράγεται. Επιπρόσθετα, ένα ποσοστό της τάξης του 7%, χαρακτήρισε το θόρυβο που παράγεται ως ευχάριστο, ενώ τέλος το 20% των ερωτηθέντων δεν ενοχλείται, λόγω κάλυψης του θορύβου από τον περίγυρο.



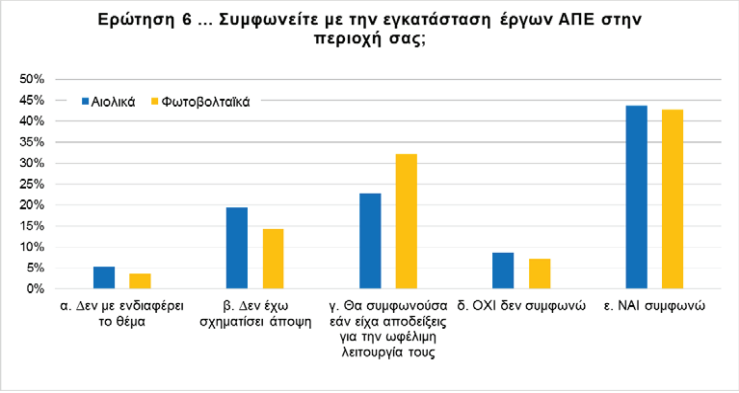
Σχήμα 3.3: Η κοινή γνώμη σχετικά με την ακουστική όχληση από τις υφιστάμενες εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας (Ερώτηση 5α)

Όσον αφορά στη χρήση γης των υφιστάμενων Φ/Β πάρκων στις περιοχές τους (Σχ. 3.4, Ερώτηση 5β), το 27% των ερωτηθέντων απάντησε ότι η γη που καταλαμβάνουν τα συγκεκριμένα έργα είναι σχετικά μικρή, σε αντίθεση με ένα 5% που είχε την πεποίθηση πως τα έργα καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις. Αξιοσημείωτο είναι πως οι ερωτηθέντες κατά το ήμισυ περίπου (43%), εμφανίζονται να μην έχουν διαμορφωμένη άποψη επί του θέματος, ενώ το 25%, αν και θεωρεί σημαντικές τις εκτάσεις που καλύπτονται στις περιοχές τους, δεν τις θεωρεί απαγορευτικές.

Στη συνέχεια, όσον αφορά τα τρία τελευταία ερωτήματα που υποβλήθηκαν σχετικά με υφιστάμενες και νέες εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων και φωτοβολταϊκών στις περιοχές των ερωτηθέντων, η κοινή γνώμη φαίνεται αρκετά θετική (Σχήματα 3.5, 3.6 & 3.7). Πιο συγκεκριμένα, ένα σημαντικό μέρος των ερωτηθέντων ήταν σίγουρα θετικό στην ερώτηση που αφορούσε στις υπάρχουσες εγκαταστάσεις έργων ΑΠΕ στις περιοχές τους (44% και 43% αντίστοιχα), ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά απόλυτης αντίθεσης στις εγκαταστάσεις αυτές ήταν μόλις 9% και 7% (Σχήμα 3.5, Ερώτηση 6).



Σχήμα 3.4: Η κοινή γνώμη σχετικά με τη χρήση γης των υφιστάμενων Φ/Β πάρκων (Ερώτηση 5β)



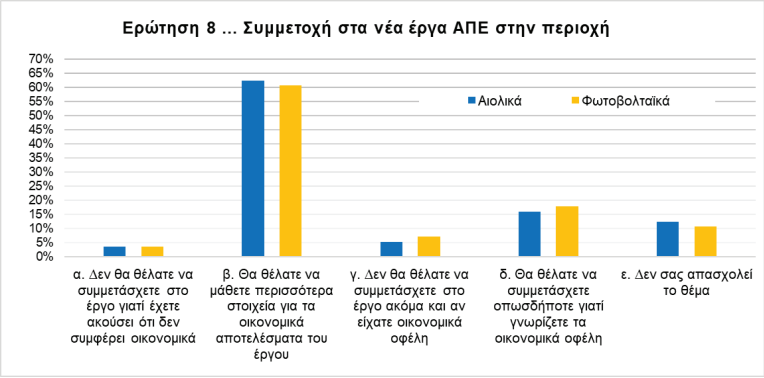
Σχήμα 3.5: Η κοινή γνώμη σχετικά με υφιστάμενα έργα ΑΠΕ στην περιοχή (Ερώτηση 6)



Σχήμα 3.6: Η κοινή γνώμη σχετικά με νέα έργα ΑΠΕ στην περιοχή (Ερώτηση 7)

Επιπλέον, αρκετοί ήταν αυτοί που δήλωσαν σύμφωνοι με τις υπάρχουσες εγκαταστάσεις, με την προϋπόθεση να υπάρξουν σαφείς αποδείξεις ως προς την ωφέλεια της λειτουργίας τους (23% για αιολικά και 32% για τα Φ/Β). Το υπόλοιπο των ερωτηθέντων δήλωσαν είτε αδιάφοροι είτε δίχως σαφή γνώμη επί του θέματος. Όπως ήταν αναμενόμενο, παρόμοια ποσοστά προέκυψαν και σχετικά με

τυχόν αντιδράσεις σε νέες εγκαταστάσεις (Σχήμα 3.6, Ερώτηση 7), καθώς πάνω από το 30% του δείγματος θα συμφωνούσε πλήρως στις εγκαταστάσεις αιολικών (38%) και Φ/Β (32%) στην εκάστοτε περιοχή, ενώ οι περισσότεροι από τους ανταποκρινόμενους θα συμφωνούσαν υπό την προϋπόθεση διερεύνησης σχετικά με τα διαθέσιμα στοιχεία. Ακόμη μικρότερο, σε σχέση με την αρνητική στάση για τα υπάρχοντα έργα ΑΠΕ, εμφανίστηκε το ποσοστό των κατοίκων που θα αντιδρούσε στις νέες εγκαταστάσεις, καθώς και των αδιάφορων ή χωρίς άποψη ερωτηθέντων.



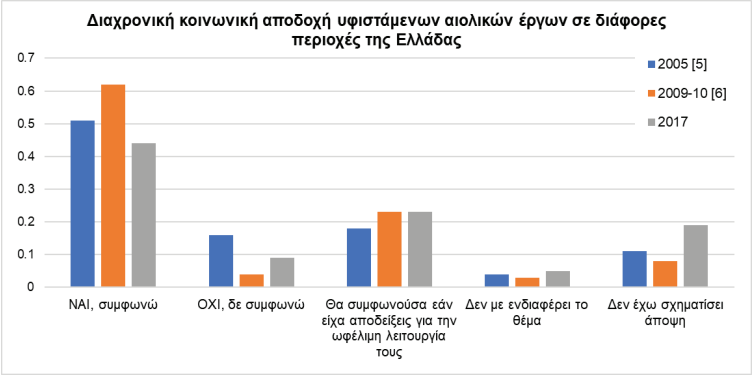
Σχήμα 3.7: Κοινή γνώμη σχετικά με συμμετοχή σε νέα έργα ΑΠΕ (Ερώτηση 8)

Τέλος, θετική υπό όρους εμφανίστηκε η πλειοψηφία των ερωτηθέντων, καθώς με ποσοστά πάνω από 60%, απάντησε πως σε περίπτωση νέων αιολικών ή Φ/Β έργων στην περιοχή του, θα συμμετείχε ενεργά εφόσον γνώριζε επαρκή στοιχεία ως προς το οικονομικό όφελος των επενδύσεων αυτών (Σχήμα 3.7, Ερώτηση 8). Επιπλέον, αρκετοί ήταν αυτοί που θα συμμετείχαν οπωσδήποτε (16% και 18%, για Α/Γ και Φ/Β), καθώς φαίνεται να γνωρίζουν και να εμπιστεύονται τις επενδύσεις στο συγκεκριμένο τομέα. Τέλος, αξίζει να επισημανθεί ότι τα ποσοστά των ερωτηθέντων που δήλωσαν αδιαφορία ή κατηγορηματική άρνηση συμμετοχής στα έργα αυτά, κυμαίνονται στα ίδια επίπεδα με αυτά των ερωτήσεων σχετικά με τη αποδοχή υφιστάμενων και νέων έργων ΑΠΕ.

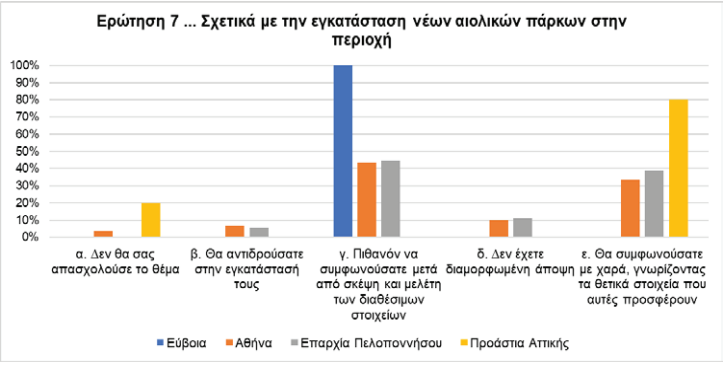
4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της έρευνας είχε θετικό πρόσημο, με τους περισσότερους εκ των ερωτηθέντων να εμφανίζονται υποστηρικτικοί τόσο με τις υπάρχουσες τεχνολογίες ΑΠΕ όσο και με την προοπτική της μελλοντικής τους εφαρμογής σε τοπικό επίπεδο. Σε όλες τις περιπτώσεις, το 100% των ατόμων που ανταποκρίθηκαν ήταν εξοικειωμένοι με τις βασικές αρχές λειτουργίας και ενεργειακής παραγωγής των αιολικών και Φ/Β πάρκων, μια τάση που παρατηρείται τα τελευταία δεκαπέντε και πλέον χρόνια (~ 94%, 2005 [6], ~ 94%, 2010 [9], ~92% 2013 [8]). Ωστόσο, ένα σημαντικό ποσοστό εμφανίστηκε σκεπτικό σχετικά με τα ενεργειακά έργα κοντά στον τόπο κατοικίας του, εκτός εάν ήταν πεπεισμένο για την αποτελεσματικότητά τους. Η παρούσα έρευνα έρχεται να αναδείξει και να επισημάνει ότι το αξιοσημείωτο ενδιαφέρον για την εγκατάσταση ΑΠΕ στην περιοχή των ερωτηθέντων, θα πρέπει πλέον να συνοδεύεται με τεκμηριωμένες αποδείξεις τόσο για το ωφέλιμο της λειτουργίας των σταθμών ΑΠΕ όσο και για την οικονομική βιωσιμότητα του εγχειρήματος, κάτι που δεν ήταν τόσο απαιτητό τα προηγούμενα χρόνια (Σχήμα 4.1).

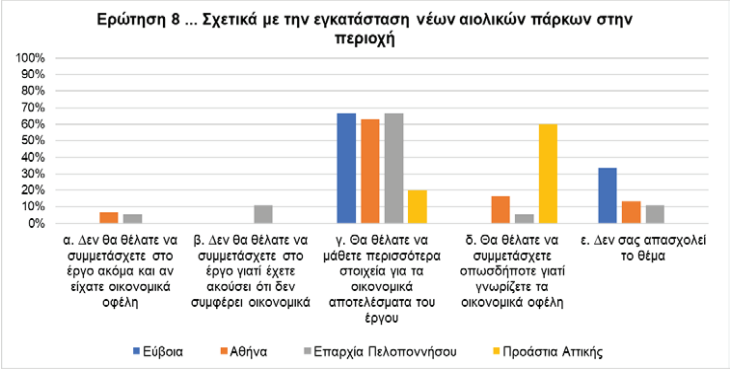
Ενδιαφέρον ιδιαίτερο προκύπτει από τη σύγκριση αποδοχής και διάθεσης συμμετοχής κοινού σε νέα έργα αιολικών πάρκων ανά περιοχή (Ερωτήσεις, 7,8). Με βάση την ανάλυση των αποτελεσμάτων ανά περιοχή, οι κάτοικοι των προαστίων της Αττικής εμφανίζονται ιδιαίτερα ενθουσιώδεις (80%) αναφορικά με τη δημιουργία νέων έργων ΑΠΕ στην περιοχή τους ενώ ένα πολύ μεγάλο ποσοστό (67%) θα ήθελε να συμμετάσχει στο έργο καθότι γνωρίζουν πλέον τα οικονομικά οφέλη του εγχειρήματος.



Σχήμα 4.1: Διαχρονική κοινωνική αποδοχή υφιστάμενων αιολικών έργων στην Ελλάδα

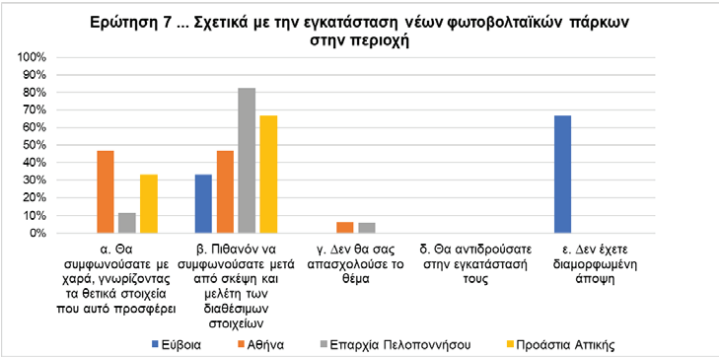


Σχήμα 4.2: Αποδοχή και διάθεση συμμετοχής κοινού σε νέα έργα αιολικών πάρκων ανά περιοχή (Ερώτηση 7)

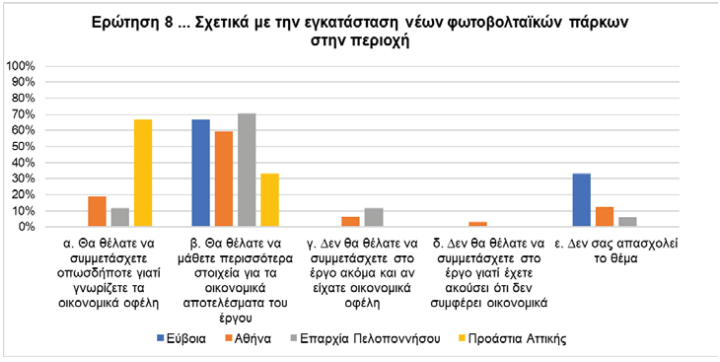


Σχήμα 4.3: Αποδοχή και διάθεση συμμετοχής κοινού σε νέα έργα αιολικών πάρκων ανά περιοχή (Ερώτηση 8)

Αντίθετη άποψη εμφανίζει η Εύβοια, μία περιοχή με βεβαρυμένο ιστορικό κοινωνικής εναντίωσης στα έργα που έχουν πραγματοποιηθεί εκεί. Στη συγκεκριμένη περιοχή το κοινό εμφανίζεται συνολικά (100%) προβληματισμένο και θετικό υπό προϋποθέσεις για τα νέα έργα, και ζητά αποδείξεις πλέον του 60% για την οικονομική βιωσιμότητα των νέων έργων, μία τάση που παρουσιάζεται εξίσου ισχυρή τόσο στην Πελοπόννησο όσο και στην Αθήνα (Σχήματα 4.2 & 4.3).



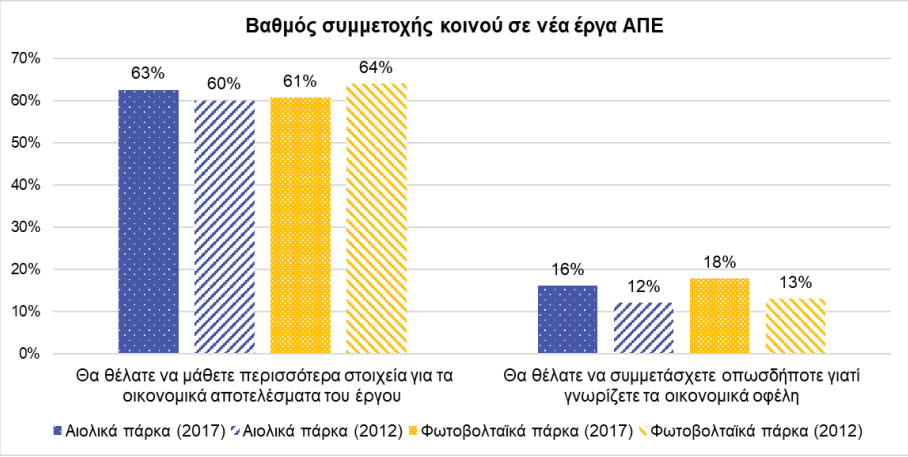
Σχήμα 4.4: Αποδοχή και διάθεση συμμετοχής κοινού σε νέα έργα φωτοβολταϊκών πάρκων ανά περιοχή (Ερωτήση 7)



Σχήμα 4.5: Αποδοχή και διάθεση συμμετοχής κοινού σε νέα έργα φωτοβολταϊκών πάρκων ανά περιοχή (Ερωτήση 8)

Τελείως διαφορετική εικόνα παρουσιάζεται στις ερωτήσεις για τη δημιουργία νέων φωτοβολταϊκών πάρκων (Σχήματα 4.4 και 4.5). Στην περίπτωση αυτή, η Εύβοια εμφανίζεται πλέον του 60% να μην έχει διαμορφωμένη άποψη και σχεδόν ένας προς ένα θα ήθελαν να συμμετάσχουν στο έργο υπό τον όρο της ύπαρξης αποδείξεων οικονομικής βιωσιμότητας. Τα προάστια της Αττικής εξακολουθούν (αν και με μικρότερα ποσοστά) να επικροτούν τα νέα έργα και να θέλουν να συμμετάσχουν σε αυτά λόγω αναγνώρισης της κερδοφορίας της επένδυσης, ενώ ιδιαίτερα σκεπτική εμφανίζεται η επαρχία της Πελοποννήσου: περισσότεροι από το 80% πιθανώς θα συμφωνούσαν στη δημιουργία νέων Φ/Β πάρκων μόνο μετά τη μελέτη των διαθέσιμων στοιχείων και το 70% θα ήθελε να μάθει περισσότερα για τα οικονομικά στοιχεία του έργου προκειμένου να συμμετάσχει, ενώ μόνο το 10% δηλώνει σίγουρο για τη συμμετοχή του.

Συνοψίζοντας τη συζήτηση των αποτελεσμάτων, τα τελευταία χρόνια το ποσοστό των ιδιαίτερα επιφυλακτικών σχετικά με τα νέα έργα ΑΠΕ παραμένει μεγάλο (Σχήμα 4.6), συγκρινόμενο με σχετικές μελέτες που υλοποιήθηκαν προ πενταετίας [7]. Η εκφρασμένη αυτή επιφυλακτικότητα συνδέεται με τη γενικότερη ανασφάλεια που έχει δημιουργήθει στους πολίτες λόγω της οικονομικής κρίσης. Ειδικότερα όμως για την αγορά των Φ/Β, μία επένδυση αρκετά προσβάσιμη στο μέσο καταναλωτή, με αρκετές εφαρμογές μικρής κλίμακας, ο σχετικός σκεπτικισμός μπορεί να «χρεωθεί» στη μειούμενη τιμή της προς πώληση παραγόμενης kWh. Αντίθετα στην περίπτωση των αιολικών πάρκων, μία επένδυση η οποία σε επίπεδο μέσου ιδιώτη καταναλωτή δεν είναι υλοποιήσιμη, η συμμετοχή σε ένα τέτοιο έργο, σίγουρα προϋποθέτει μεγαλύτερη κλίμακα (έργων) και πιο πολύπλοκο σχήμα συνεργασίας, το οποίο επιβάλει περισσότερη μελέτη των σχετικών οικονομικών στοιχείων του.



Σχήμα 4.6: Βαθμός συμμετοχής κοινού σε νέα έργα ΑΠΕ τα τελευταία πέντε χρόνια

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία είχε ως στόχο την αποτύπωση της κοινής γνώμης σχετικά με υφιστάμενα και μελλοντικά έργα ΑΠΕ. Για το σκοπό αυτό συμπληρώθηκε ικανός αριθμός ερωτηματολογίων με προσωπικές συνεντεύξεις σε αστικές, ημιαστικές και αγροτικές περιοχές. Τα αποτελέσματα της έρευνας κατέδειξαν τη θετική διάθεση του κοινού αναφορικά με τις τεχνολογίες της αιολικής και Φ/Β ενεργειακής παραγωγής. Ανέδειξαν επίσης την ελπιδοφόρα προοπτική συμμετοχής των τοπικών πληθυσμών σε μελλοντικά έργα ΑΠΕ στις περιοχές τους, φυσικά υπό προϋποθέσεις. Λαμβάνοντας υπόψη την τρέχουσα κατάσταση του ενεργειακού τομέα τόσο σε εθνικό όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο, έχει καταστεί προφανές ότι η συστηματική εφαρμογή των ΑΠΕ θεωρείται επιτακτική προκειμένου να συμβάλει στην αειφόρο ανάπτυξη των ανθρώπινων κοινωνιών. Στο πλαίσιο αυτό, πολλές μελέτες έχουν πραγματοποιηθεί με στόχο τη δημιουργία τόσο ενός μεθοδολογικού πλαισίου όσο και ικανών πρακτικών [13,14] για τη μέγιστη δυνατή αποδοχή των νέων μονάδων προς εγκατάσταση, μια προσπάθεια που συχνά προκαλεί σοβαρή τοπική αντίθεση λόγω λανθασμένων πολιτικών εφαρμογής και κλίμακας εφαρμογής των ίδιων των επενδύσεων.

Παρά ταύτα, το γεγονός ότι υπάρχει ένα τόσο ευρύ επίπεδο αποδοχής σε εθνικό επίπεδο, αφενός υποδηλώνει την ευαισθητοποίηση των Ελλήνων σε θέματα προστασίας περιβάλλοντος αλλά και παράλληλα δηλώνει μία πιθανή επενδυτική αγορά, η οποία είναι έτοιμη να συμμετάσχει σε οικονομοτεχνικά τεκμηριωμένα έργα [15]. Η μέχρι τώρα εμπειρία έχει δείξει για την κοινή γνώμη, η οποία είναι καθοριστικός παράγοντας σε μελλοντικά έργα, ότι μπορεί να διαφέρει σημαντικά από το ένα έργο στο άλλο, καθώς και μεταξύ των περιοχών ή ακόμη και στην ίδια τοποθεσία με την πάροδο του χρόνου. Παράμετροι όπως η έλλειψη σχετικών γνώσεων, η παραπληροφόρηση, η απουσία ενδιαφέροντος εκ μέρους της Πολιτείας και κάποιων ιδιωτών επενδυτών, οι συνεχείς αλλαγές του νομοθετικού πλαισίου καθώς και η εμπειρία των ίδιων των πολιτών από αντίστοιχα έργα κ.λπ., θα πρέπει να αναγνωρίζονται και να συνυπολογίζονται στις μελέτες αποτύπωσης της κοινωνικής αποδοχής των έργων ΑΠΕ και να ωθούν προς την εμπλοκή όλων των φορέων της Τετραπλής Έλικας (δημόσιου – ιδιωτικού τομέα, ακαδημαϊκής κοινότητας και τοπικής κοινωνίας) [16].

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων, υπογράμμισε/ανέδειξε το μείζον θέμα της επιφυλακτικότητας για νέες επενδύσεις ΑΠΕ, λόγω της εν εξελίξει ελληνικής οικονομικής κρίσης, αλλά και την ευρύτερη ευρωπαϊκή αναγκαιότητα για την εισαγωγή δίκαιων επενδυτικών λύσεων για την κοινωνία [17], με τους ενεργειακούς συνεταιρισμούς ως πρόταση διαφορετικής οπτικής με αποδεδειγμένη ευρωπαϊκή εμπειρία [18]. Οι συνεταιριστικές επιχειρήσεις είναι κοινοτικές ιδιωτικές επιχειρήσεις, που συνδυάζουν τις έννοιες του ενεργειακού καταναλωτή με αυτή του παραγωγού (prosumer). Με το σκοπό του συνεταιρισμού να είναι όχι μόνο το κέρδος της επένδυσης αλλά και η διανομή των κερδών στα μετοχικά μέλη του, η επιτυχία αυτών των εγχειρημάτων αποτελεί στοίχημα των τοπικών κοινωνιών, η οποία θα οδηγήσει σε καθολική αποδοχή νέων επενδυτικών προτάσεων στον τομέα των ΑΠΕ.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ 2017, "Έκθεση της Επιτροπής προς το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, το Συμβούλιο, την Ευρωπαϊκή Οικονομική και Κοινωνική Επιτροπή και την Επιτροπή των Περιφερειών - Έκθεση προόδου για την ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές", Available online at: https://ec.europa.eu/transparency/regdoc/rep/1/2017/EL/COM-2017-57-F1-EL-MAIN-PART-1.PDF.

[2] ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ 2017, "Καθαρή ενέργεια για όλους τους Ευρωπαίους – Ελευθερώνοντας το αναπτυξιακό δυναμικό της Ευρώπης", Available online at: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-16-4009_el.htm.

[3] [ΕΛΕΤΑΕΝ] - Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας, 2017, "Η Στατιστική της Αιολικής Ενέργειας για το 2016", Available online at: http://eletaen.gr/wp-content/uploads/2017/01/2016_-HWEA_Statistics_Greece.pdf.

[4] [ΣΕΦ] - Σύνδεσμος Εταιριών Φωτοβολταϊκών (Hellenic association of Photovoltaic Companies – HELAPCO), "Στατιστικά στοιχεία αγοράς φωτοβολταϊκών για το 2016", Available online at: http://helapco.gr/wp-content/uploads/pv-stats_greece_2016_25Apr2017-2.pdf.

[5] [NCRM] National Centre for Research Methods Review Paper, Baker, S.A., Edwards, R. 2012, "How many qualitative interviews is enough? Expert voices and early career reflections on sampling and cases in qualitative research", Available online at: http://eprints.ncrm.ac.uk/2273/4/how_many_interviews.pdf

[6] Kaldellis, J.K., 2005, "Social attitude towards wind energy applications in Greece", Energy Policy, Vol. 33(5), pp. 595–602.

[7] Kaldellis, J.K., Kapsali, M., Katsanou, E., 2012, "Renewable energy applications in Greece—what is the public attitude?", Energy Policy, Vol. 42(-), pp. 37–48.

[8] Kaldellis, J.K., Kapsali, M., Kaldelli, E., Katsanou, E., 2013, "Comparing recent views of public attitude on wind energy, photovoltaic and small hydro applications", Renewable Energy, Vol. 52(-), pp. 197–208.

[9] Zografakis, N., Sifaki, E., Pagalou, M., Nikitaki, G., Psarakis, V., Tsagarakis, K., 2010, "Assessment of public acceptance and willingness to pay for renewable energy sources in Crete" Renewable Sustainable Energy Rev, Vol. 14(3), pp. 1088–1095.

[10] Viklund, M., 2004, "Energy policy options-from the perspective of public attitudes and risk perceptions", Energy Policy, Vol. 32(10), pp. 1159–1171.

[11] West, J., Bailey, I., Winter, M., 2010, "Renewable energy policy and public perceptions of renewable energy: a cultural theory approach", Energy Policy, Vol. 38(10), pp. 5739–5748.

[12] Von Borgstede, C., Andersson, M., Johnsson, F., 2013, "Public attitudes to climate change and carbon mitigation-Implications for energy-associated behaviours", Energy Policy, Vol. 57, pp. 182–193.

[13] Enevoldsen, P., Sovacool, B.K., 2016, "Examining the social acceptance of wind energy: Practical guidelines for onshore wind project development in France" Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 53, pp. 178–184.

[14] Devine-Wright, P., Batel, S., Aas, O., Sovacool, B., Carnegie, M., Ruud, A., 2017, "A conceptual framework for understanding the social acceptance of energy infrastructure: Insights from energy storage", Energy Policy, Vol. 107, pp. 27-31.

[15] [ΕΣΠΑ], Εθνικό Στρατηγικό Πλαίσιο Αναφοράς 2014-2020, 2017, "Πολιτική Συνοχής- Ευρώπη 2020", Available online at: https://www.espa.gr/el/pages/staticEurope2020.aspx.

[16] Carayannis, E.G., 2009, "'Mode 3' and 'Quadruple Helix': Toward a 21st Century Fractal Innovation Ecosystem", International Journal of Technology Management, Vol.46(3-4), pp. 201-234.

[17] Sonnberger, M., Ruddat, M., 2017, "Technology in Society Local and socio-political acceptance of wind farms in Germany", Technology in Society, Vol. 51, pp.56–65.

[18] [RESCOOP], European federation for renewable energy cooperatives. 2017. European Projects. Available online at: https://www.rescoop.eu/european-projects.

ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ. ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Γιαν. Μαύρος[1] , Αλ. Κόντζηλας[2], Ι. Νίκας[2], Δρ. Διον. Παπαχρήστου[3]*

1 Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχ/κών και Μηχ/κών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Κύπρου,
2 Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο,
3* Δ/ντης Γραφείου Τύπου & Δημοσίων Σχέσεων, Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας,
Πειραιώς 132, 118 54, Αθήνα, e-mail: papachristou@rae.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο ηλεκτρικά αυτόνομο νησί της Κύπρου, η διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) έχει ιδιαίτερη βαρύτητα και σημασία για την ενεργειακή πολιτική της χώρας, καθώς συνεισφέρει στη σταδιακή απεξάρτηση της από τις εισαγωγές πετρελαίου (μαζούτ και ντίζελ) και στην ενίσχυση της ενεργειακής της αυτονομίας. Παράλληλα συμβάλει στην προστασία του περιβάλλοντος, στη μείωση της δαπάνης αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών και στην εκπλήρωση των εθνικών δεσμεύσεων της Κύπρου για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Στην παρούσα μελέτη αναλύεται η διείσδυση των ΑΠΕ στη κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας της Κύπρου για την περίοδο 2011-2016. Επιπλέον γίνεται σύγκριση της Κύπρου με την Κρήτη ως προς την διείσδυση των ΑΠΕ κατά την ίδια περίοδο για να διαπιστωθούν οι ομοιότητες και οι διαφορές μεταξύ των δύο αυτόνομων ηλεκτρικών συστημάτων με παρόμοια χαρακτηριστικά και μέγεθος και να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα ως προς το βαθμό αξιοποίησης των επιμέρους τεχνολογιών ΑΠΕ στα δύο νησιά.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από επίσημα αρχεία του Διαχειριστή Συστήματος Μεταφοράς Κύπρου (ΔΣΜΚ) καθώς και του Διαχειριστή του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ ΑΕ).

Αρχικά παρουσιάζονται οι εθνικοί στόχοι της Κύπρου σχετικά με την διείσδυση των ΑΠΕ και τη μείωση των αερίων εκπομπών. Στη συνέχεια αντιπαραβάλλονται στοιχεία για τους υφιστάμενους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα δύο νησιά. Ακολούθως αναλύεται η διείσδυση των ΑΠΕ συνολικά και ανά τεχνολογία μέσω συγκριτικών διαγραμμάτων εγκατεστημένης ισχύος, παραγόμενης ενέργειας, διείσδυσης και συντελεστή χρησιμοποίησης σε μηνιαία και ετήσια βάση. Επιπλέον με βάση τις προβλέψεις για την αύξηση της ζήτησης στο νησί της Κύπρου κατά τα επόμενα χρόνια, εκτιμάται η απαιτούμενη προς εγκατάσταση ισχύς των ΑΠΕ προκειμένου να επιτευχθούν οι εθνικοί στόχοι διείσδυσης. Τέλος εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα από την σύγκριση της διείσδυσης των ΑΠΕ στην Κύπρο και την Κρήτη ως προς την αξιοποίηση των επιμέρους τεχνολογιών.

Λέξεις Κλειδιά: Κύπρος, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), διείσδυση ΑΠΕ, συντελεστής χρησιμοποίησης ή εκμεταλλευσιμότητας ΑΠΕ, εκτίμηση πρόσθετης απαιτούμενης ισχύος ΑΠΕ, σύγκριση με την Κρήτη.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Ευρωπαϊκοί και Κυπριακοί ενεργειακοί στόχοι

Σήμερα η ενέργεια θεωρείτε θεμέλιος λίθος για την συμβίωση και επιβίωση των ανθρώπων, καθώς αποτελεί πρωταρχική ανάγκη στην καθημερινότητάς τους. Σε όλα τα κράτη η παραγωγή ενέργειας γίνεται κυρίως από συμβατικά ορυκτά καύσιμα που καίγονται ή με πυρηνικά καύσιμα που παράγουν ενέργεια στους θερμικούς σταθμούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, από την μία την εξάντληση του ορυκτού πλούτου και από την άλλη, την ατμοσφαιρική ρύπανση από την εκπομπή αέριων ρύπων, που επιβαρύνουν την ατμόσφαιρα και κατ' επέκταση επιδρούν αρνητικά στην ανθρώπινη υγεία. Με την ανάπτυξη και την αύξηση του βιοτικού επιπέδου η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας θα αυξάνεται. Συνεπώς οι αέριες εκπομπές και το κόστος των ορυκτών καυσίμων θα αυξάνονται σε συνάρτηση με την αύξηση της ζήτησης και την μείωση των διαθέσιμων αποθεμάτων. Ωστόσο, η ένταξη των ΑΠΕ στο ενεργειακό σύστημα, μπορεί να συμβάλει θετικά στην αντιμετώπιση των παραπάνω ζητημάτων, που προκύπτουν από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και να συνεισφέρει στη μείωση του κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό σήμερα, η Ευρωπαϊκή Ένωση ενισχύει την φθηνή και πράσινη ενέργεια που προέρχεται από ΑΠΕ σε μια προσπάθεια αύξησης της διείσδυσης τους στη τελική κατανάλωση ενέργειας και κυρίως στην ηλεκτροπαραγωγή. Έχουν τεθεί συγκεκριμένοι ενεργειακοί στόχοι ανά χώρα που περιορίζουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικούς σταθμούς προωθώντας παράλληλα την ενέργεια από ΑΠΕ για την κάλυψη της ζήτησης.

Στα πλαίσια της κοινής ευρωπαϊκής πολιτικής, η Ε.Ε. έχει θέσει συγκεκριμένους ενεργειακούς και κλιματικούς στόχους για κάθε χώρα μέλος με χρονοδιάγραμμα για το 2020, το 2030 και το 2050. Αν και είναι δύσκολη η πρόβλεψη του ενεργειακού συστήματος για το 2050, υπάρχουν ωστόσο πολλά σενάρια στον ενεργειακό χάρτη πορείας για τα επόμενα 32 χρόνια, μέχρι και την ολοκληρωτική απαλλαγή του ενεργειακού συστήματος από τις ανθρακούχες εκπομπές. Για όλα τα σενάρια απαιτούνται σημαντικές δράσεις και αλλαγές στα σημερινά δεδομένα. Κύριος στόχος της Ευρωπαϊκής επιτροπής είναι η μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου κατά **80%** έως το **2050** σε σχέση με το **1990**. Πρέπει να συμπεριληφθεί ότι η ζήτηση ενέργειας από το έτος 1990 μέχρι και σήμερα έχει αυξηθεί σημαντικά, και ενδέχεται να αυξηθεί πολύ περισσότερο μέχρι το 2050. Έτσι θα χρειαστεί ακόμη περισσότερη προσπάθεια για την επίτευξη των εθνικών και ευρωπαϊκών στόχων.

Στόχοι ΕΕ για το 2020:

- Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον **20%** σε σύγκριση με τα επίπεδα του **1990**
- Άντληση του **20%** της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές
- Βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά **20%**.

Στόχοι ΕΕ για το 2030:

- Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά **40%**
- Άντληση τουλάχιστον του **27%** της ενέργειας στην ΕΕ από ανανεώσιμες πηγές
- Αύξηση της ενεργειακής απόδοσης κατά **27-30%**
- Διασύνδεση της ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό **15%** (δηλαδή το 15% της ενέργειας που παράγεται στην ΕΕ πρέπει να μπορεί να μεταφέρεται και προς άλλες χώρες της ΕΕ).

Στόχος ΕΕ για το 2050:

- Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά **80-95%** σε σύγκριση με τα επίπεδα του **1990**. Μετάβαση σε μια ανταγωνιστική οικονομία χαμηλών επιπέδων ανθρακούχων εκπομπών.

Η Ε.Ε. έχει θέσει υποχρεωτικούς στόχους για το **2020** σε όλα τα κράτη μέλη της. **Στην περίπτωση της Κυπριακής Δημοκρατίας**, ο στόχος για **παραγωγή από ΑΠΕ** ανέρχεται στο 13% επί της συνολικής κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας. Συμφώνα με το **Εθνικό Σχέδιο Δράσης** [4] της Κυπριακής Δημοκρατίας ο στόχος της διείσδυσης των ΑΠΕ για το 2020 κατανέμεται ως εξής: για τον **τομέα** του **ηλεκτρισμού** στο **16%**, στην θέρμανση-ψύξη στο 23,5% και στις μεταφορές στο 10%.

1.2. Παρούσα κατάσταση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στην Κύπρο και στην Κρήτη

Στην Κύπρο μέχρι σήμερα δεν αξιοποιούνται πρωτογενείς συμβατικές πηγές ενεργείας και το ηλεκτρικό σύστημα λειτουργεί απομονωμένα, χωρίς διασυνδέσεις με άλλες χώρες, και έτσι είναι πλήρως εξαρτημένο από την εισαγωγή καυσίμων. Η Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου (ΑΗΚ) είναι υπεύθυνη για την ηλεκτροδότηση του νησιού την οποία και επιτυγχάνει με 3 Θερμικούς Σταθμούς

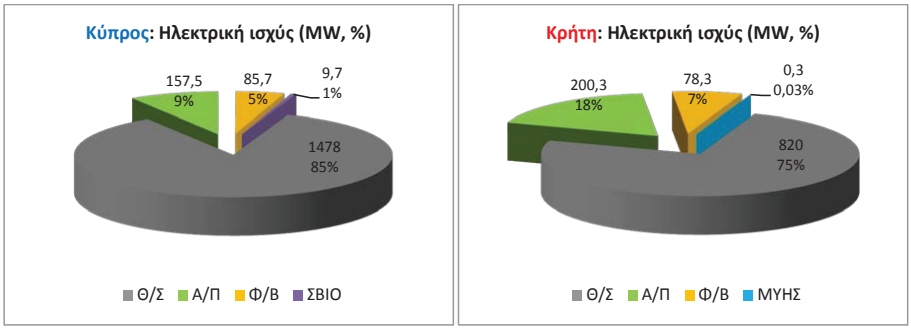
(Θ/Σ) που χρησιμοποιούν ως καύσιμο κυρίως μαζούτ και ντίζελ. Στην συνεχεία ο Διαχειριστής του Συστήματος Μεταφοράς Κύπρου (ΔΣΜΚ) έχεις ως αρμοδιότητα την σωστή λειτουργιά του συστήματος μεταφοράς και την ευθηνή για την αδιάλειπτη, αξιόπιστη και ασφαλή τροφοδοσία των καταναλωτών.

Παρόμοια κατάσταση επικρατεί και στην Κρήτη, όπου πρόκειται για ένα αυτόνομο ηλεκτρικά νησί με εισαγωγή συμβατικών καυσίμων για την λειτουργία των θερμικών σταθμών και αξιοποίηση του ανανεώσιμου δυναμικού που διαθέτει το νησί. Για την λειτουργία των θερμικών σταθμών της Κρήτης υπεύθυνη είναι η ΔΕΗ ΑΕ, ενώ για την διαχείριση και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στο νησί υπεύθυνος είναι ο Διαχειριστή του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ).

Στο Πίνακα 1 και στο Σχήμα 1 που ακολουθεί παρουσιάζεται η εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς και το αντίστοιχο ποσοστό της ισχύος, ανά σταθμό παραγωγής στην Κύπρο και την Κρήτη όπως ήταν κατά το Δεκέμβριο του 2016.

Πίνακας 1: Εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς στην Κύπρο [1] και στην Κρήτη [2] ανά σταθμό παραγωγής

Εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς (MW, %) - Δεκ. 2016				
Σταθμοί Παραγωγής	**Κύπρος**		**Κρήτη**	
Θ/Σ	**1.478**	**74,5%**	**820**	**59,5%**
ΑΠΕ	**252,9**	**12,7%**	**278,9**	**20,2%**
Α/Π	157,5	62,3%	200,3	71,8%
Φ/Β	85,7	33,9%	78,3	28,1%
ΣΒΙΟ	9,7	3,8%	0	0,0%
ΜΥΗΣ	0	0,0%	0,3	0,1%
ΣΥΝΟΛΟ	**1.730,9**	**100%**	**1.098,9**	**100%**



Σχήμα 1: Μερίδιο ηλεκτρικής ισχύος στην Κύπρο και στην Κρήτη ανά σταθμό παραγωγής, Δεκ. 2016

Όπως γίνεται φανερό, η συνολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς στην Κύπρο το 2016 ήταν κατά 44% περίπου μεγαλύτερη από ότι στην Κρήτη. Εντούτοις, η εγκατεστημένη ισχύς των ΑΠΕ στην Κύπρο είναι μικρότερη κατά 10% περίπου σε σχέση με την Κρήτη με τη μεγαλύτερη διαφορά να παρατηρείται στα Α/Π, όπου η Κύπρος υπολείπεται σημαντικά. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν αναλυτικά στοιχεία για τη ζήτηση και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για τη διείσδυση των επιμέρους τεχνολογιών ΑΠΕ και θα διερευνηθούν οι αιτίες για τις παρατηρούμενες διαφορές στα δύο νησιά.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκαν μηνιαία δεδομένα που προέρχονται από την ΑΗΚ και τον ΔΣΜΚ [3], όσον αφορά την Κύπρο, καθώς και από τον ΔΕΔΔΗΕ [2] όσον αφορά την Κρήτη. Τα μηνιαία δεδομένα επεξεργάστηκαν και αξιοποιήθηκαν κατάλληλα για να προκύψουν χρήσιμα αποτελέσματα και συμπεράσματα, σχετικά με την έως τώρα αξιοποίηση των ΑΠΕ στα δύο νησιά, καθώς και τις περαιτέρω προοπτικές ανάπτυξής των ΑΠΕ στην Κύπρο για την επίτευξη των εθνικών της στόχων το 2020. Για το λόγο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά στοιχεία για την εγκατεστημένη ισχύ, τη παραγόμενη ενέργεια, τη διείσδυση και το συντελεστή χρησιμοποίησης των ΑΠΕ ανά τεχνολογία στο νησί της Κύπρου και της Κρήτης για την περίοδο 2011-2016. Η σύγκριση γίνεται με σκοπό να

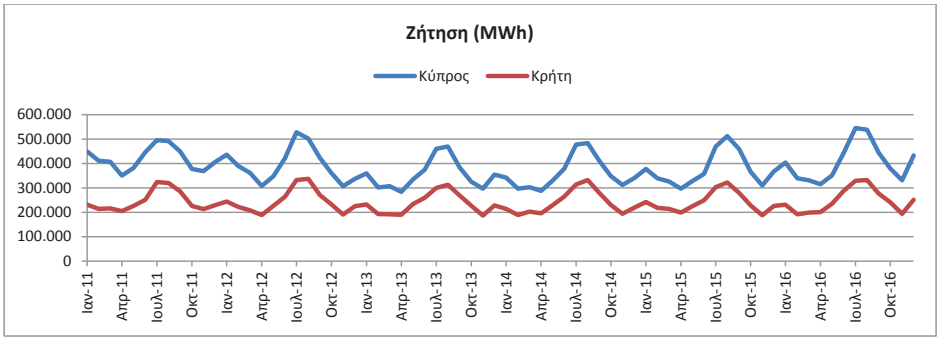
διαπιστωθούν οι ομοιότητες και οι διαφορές μεταξύ των δύο αυτόνομων ηλεκτρικών συστημάτων, ως προς την αξιοποίηση των τεχνολογιών ΑΠΕ, και οι λόγοι στους οποίους αυτές οφείλονται, ώστε να γίνουν προτάσεις περαιτέρω βελτίωσης της αξιοποίησής τους.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

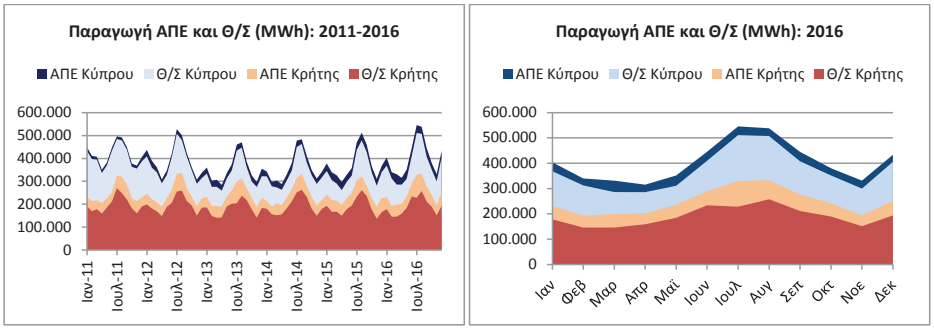
3.1. Ζήτηση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η ζήτηση του κάθε νησιού, που εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον αντίστοιχο πληθυσμό, επηρεάζει σημαντικά την διείσδυση των ΑΠΕ και τις όποιες διαφορές υπάρχουν μεταξύ των νησιών ως προς την διείσδυση και θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στην περαιτέρω ανάλυση. Τα μηνιαία προφίλ της ζήτησης στα δύο νησιά παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες αλλά και διαφορές ως προς την μηνιαία διακύμανση και το μέγεθος αντίστοιχα (Σχήμα 2). Στην Κύπρο, το μέγεθος της ζήτησης είναι αρκετά μεγαλύτερο σε σχέση με την Κρήτη, αφού ο αντίστοιχος πληθυσμός στα δύο νησιά είναι 839 χιλ. και 623 χιλ., σύμφωνα με την απογραφή του 2011. Η διαφορά στο μέγεθος της ζήτησης κυμαίνεται από 100-200 GWh ανά μήνα. Αυτό συμβαίνει σε όλη την διάρκεια του έτους, ακόμη και τους καλοκαιρινούς μήνες, οπού εμφανίζεται η μέγιστη ζήτηση. Από την άλλη πλευρά η μηνιαία διακύμανση της ζήτησης σε Κύπρο και Κρήτη είναι παρόμοια.

Η ζήτηση στα δύο νησιά καλύπτεται κατά κύριο λόγο από την παραγωγή των Θερμικών Σταθμών (Θ/Σ) και σε μικρότερο ποσοστό από τους σταθμούς ΑΠΕ. Η μηνιαία παραγωγή των Θ/Σ και των σταθμών ΑΠΕ φαίνεται στο Σχήμα 3, από όπου διαπιστώνεται το μέγεθος της διαφοράς ανάμεσα στην παραγόμενη ενέργεια από Θ/Σ και ΑΠΕ στα δύο νησιά.



Σχήμα 2: Μηνιαία διακύμανση της ζήτησης στην Κύπρο και στην Κρήτη κατά την περίοδο 2011-2016



Σχήμα 3: Μηνιαία ηλεκτροπαραγωγή από Θ/Σ και ΑΠΕ στην Κύπρο και στην Κρήτη, 2011-2016

Στην συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικότερα στοιχεία για την εγκατεστημένη ισχύ, την παραγόμενη ενέργεια, την διείσδυση και τον συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας των ΑΠΕ στα δύο νησιά, από τα οποία προκύπτουν σημαντικές πληροφορίες ως προς την αξιοποίηση των ΑΠΕ συνολικά και ανά τεχνολογία.

3.2. Μηνιαία και ετήσια χαρακτηριστικά μεγέθη για τις ΑΠΕ

Στο **σχήμα 4** παρουσιάζεται η μηνιαία διακύμανση της εγκατεστημένης ισχύος, της παραγόμενης ενέργειας, της διείσδυσης και του συντελεστή χρησιμοποίηση των **ΑΠΕ** στην Κύπρο και την Κρήτη (συγκριτικά) τόσο κατά την περίοδο 2011-2016, όσο και κατά το έτος 2016 ξεχωριστά.

Η **εγκατεστημένη ισχύς** των σταθμών ΑΠΕ στην Κύπρο στις αρχές του 2011 ήταν η μισή από την αντίστοιχη ισχύ στην Κρήτη (100 MW και 200 MW περίπου αντίστοιχα). Ωστόσο, κατά την περίοδο 2011-2016 ο ρυθμός αύξησης των νέων εγκαταστάσεων ΑΠΕ στην Κύπρο ήταν μεγαλύτερος από ότι στην Κρήτη με αποτέλεσμα το Δεκέμβριο του 2016 η διαφορά να πέσει κάτω από τα 30 MW. Έτσι, στο τέλος του 2016 η εγκατεστημένη ισχύς των ΑΠΕ στην Κύπρο και στην Κρήτη ήταν περίπου 250 MW και 280 MW αντίστοιχα.

Η μηνιαία **παραγόμενη ενέργεια** από ΑΠΕ στην Κύπρο υπήρξε καθ' όλη την διάρκεια της εξαετίας 2011-2016 σημαντικά μικρότερη από ότι στην Κρήτη, και ειδικότερα κατά τους θερινούς μήνες (Ιούλιο και Αύγουστο) όπου η παραγωγή των ΑΠΕ στην Κρήτη παρουσιάζει μια έντονη αύξηση σε σχέση με την υπόλοιπη περίοδο και εμφανίζει την ετήσια αιχμή της. Στην Κύπρο δεν παρατηρείται κάτι ανάλογο. Ωστόσο παρατηρείται μια αυξητική τάση στην παραγόμενη ενέργεια με το χρόνο ως αποτέλεσμα της εντονότερης αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος. Το μεγαλύτερο, για την εξεταζόμενη περίοδο 2011-2016, μέγεθος μηνιαίας παραγωγής από ΑΠΕ εμφανίστηκε στην Κύπρο τον Μάρτιο του 2016, ξεπερνώντας τις 45 GWh, ενώ στην Κρήτη τον Ιούλιο του 2016 ξεπερνώντας τις 100 GWh.

Η μηνιαία **διείσδυση** των ΑΠΕ κατά την ίδια περίοδο στην Κρήτη κυμάνθηκε μεταξύ 15% και 32% με μέση τιμή 21,5%, ενώ στην Κύπρο ήταν μόλις μεταξύ του 2,3% και του 13,6% με μέση τιμή 6,8%. Ωστόσο στην Κύπρο παρουσιάζει μια πιο έντονη αυξητική τάση από ότι στην Κρήτη, ως αποτέλεσμα του μεγαλύτερου ρυθμού αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ. Αξιοσημείωτο είναι ότι τα μεγαλύτερα ποσοστά διείσδυσης στην Κύπρο εμφανίζονται συνήθως την Άνοιξη (Μάρτιο, Απρίλιο), ενώ στην Κρήτη η μηνιαία διακύμανση της διείσδυσης δεν παρουσιάζει κάποιου είδους περιοδικότητα κατά την διάρκεια του έτους, ωστόσο τα δύο μεγαλύτερα ποσοστά της εξαετίας 2011-2016 εμφανίστηκαν τον Ιούλιου του 2013 και τον Ιούλιο του 2016 αγγίζοντας το 32% και 31% αντίστοιχα.

Ο **συντελεστής χρησιμοποίησης ή εκμεταλλευσιμότητας** των ΑΠΕ (CF) δείχνει το ποσοστό της πραγματικά παραγόμενης ενέργειας σε μια χρονική περίοδο ως προς την ενέργεια που θα παραγόταν αν αξιοποιούταν πλήρως η ονομαστική τους ισχύ. Όπως είναι φανερό ο μηνιαίος CF είναι πολύ υψηλότερος στην Κρήτη σε σχέση με την Κύπρο, καταδεικνύοντας έτσι τον μεγαλύτερο βαθμό αξιοποίησης της εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ στην Κρήτη αλλά και το υψηλότερο διαθέσιμο δυναμικό από ότι στην Κύπρο. Κατά την περίοδο 2011-2016 ο μηνιαίος CF κυμάνθηκε στην Κύπρο από 10,5% έως 28,1% με μέση τιμή 18,1%, ενώ στην Κρήτη από 17,1% έως 48,8% με μέση τιμή 27,8%. Αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ η μηνιαία διακύμανση του CF παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με την αντίστοιχη διακύμανση της παραγόμενης ενέργειας τόσο στην Κύπρο όσο και στην Κρήτη, ωστόσο δεν παρουσιάζει την ίδια αυξητική τάση κατά την διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου, αλλά μάλλον μια αδιάφορη τάση ως προς την αύξηση της παραγόμενης ενέργειας (αριθμητής του CF), αφού κατά την ίδια χρονική περίοδο αυξάνεται αντίστοιχα και η εγκατεστημένη ισχύς (παρανομαστής του CF).

Συνοψίζοντας, φαίνεται ότι το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος παίζει σημαντικό ρόλο ως προς την παραγόμενη ενέργεια και συνεπώς την διείσδυση των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή των δύο νησιών, ωστόσο ο συντελεστής χρησιμοποίησης σχετίζεται μάλλον με το διαθέσιμο δυναμικό των ΑΠΕ στα δύο νησιά παρά με την εγκατεστημένη τους ισχύ.

Οι ΑΠΕ που καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μερίδιο στην ηλεκτροπαραγωγή των δύο νησιών είναι τα αιολικά πάρκα (Α/Π) και οι φωτοβολταϊκοί σταθμοί (Φ/Β). Στο **σχήμα 5** παρουσιάζονται τα αντίστοιχα με παραπάνω μεγέθη όσον αφορά τους **Φ/Β** σταθμούς.

Η εγκατεστημένη ισχύς των Φ/Β σταθμών στην Κύπρο παρουσίασε μια εντυπωσιακή αύξηση κατά την περίοδο 2011-2016 με αποτέλεσμα από τα 5,7 MW τον Ιαν. 2011 να φτάσει τα 85,7 MW τον Δεκ. 2016. Η Φ/Β ισχύς στην Κρήτη μεταβλήθηκε κατά την ίδια περίοδο από τα 32,7 MW στα 78,3 MW.

Αποτέλεσμα της αύξησης της Φ/Β ισχύος στην Κύπρο ήταν και η αντίστοιχη αύξηση στην παραγόμενη ενέργεια και στη διείσδυση. Η μηνιαία διείσδυση των Φ/Β στην Κύπρο κυμάνθηκε κατά το 2016 από 2% - 4%, ενώ στην Κρήτη από 2,5% - 7,2%. Παρόλο που από το 2015 και έπειτα τα μεγέθη της Φ/Β ισχύος και της παραγόμενης Φ/Β ενέργειας είναι συγκρίσιμα στην Κύπρο και την Κρήτη, εντούτοις η διείσδυση υπολείπεται σημαντικά στην Κύπρο λόγω της υψηλότερης ζήτησης σε σχέση με την Κρήτη.

Η διακύμανση του μηνιαίου συντελεστής χρησιμοποίησης (CF) των Φ/Β στην Κύπρο και την Κρήτη είναι της ίδιας τάξης μεγέθους και κυμαίνεται περίπου από 10% (το χειμώνα) έως 30% (το θέρος).

Στο **σχήμα 6** παρουσιάζονται τα αντίστοιχα με παραπάνω μεγέθη για τα **Α/Π**. Η εγκατεστημένη ισχύς των Α/Π στην Κύπρο αυξήθηκε με μικρότερο ρυθμό από τον αντίστοιχο των Φ/Β σταθμών. Έτσι, από τα 82 MW τον Ιαν. 2011 έφτασε στα 157,5 MW τον Δεκ. 2016. Στην Κρήτη η εγκατεστημένη ισχύς των Α/Π ήταν κατά το 2016 στα 200 MW.

Η αιολική ενέργεια στην Κύπρο είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη στην Κρήτη. Ενδεικτικά, κατά την διάρκεια του 2016, όπου το μέγεθος της ισχύος ανάμεσα στην Κρήτη και την Κύπρο διέφερε κατά 42,5 MW, η αντίστοιχη διαφορά στην μέση μηνιαία αιολική παραγωγή ήταν 27 GWh περίπου.

Η διείσδυση της αιολικής ενέργειας στην Κύπρο κυμαίνεται σε πολύ χαμηλά ποσοστά, με μέση μηνιαία τιμή την περίοδο 2011-2016 μόλις 4,4% ενώ στην Κρήτη κατά την ίδια περίοδο ήταν κοντά στο 17%.

Ο μέσος μηνιαίος συντελεστή χρησιμοποίησης των Α/Π κατά την περίοδο 2011-2016 στην Κύπρο ήταν 15,7% ενώ στην Κρήτη 30,3%. Το γεγονός αυτό είναι ενδεικτικό της ποιότητας του αιολικού δυναμικού ανάμεσα στα δύο νησιά. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m στις περιοχές των Α/Π στην Κύπρο δεν ξεπερνά τα 6 m/s [5], ενώ στην Κρήτη υπάρχουν περιοχές με μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου που ξεπερνά τα 8 m/s ή/και τα 9 m/s [6].

Στο **σχήμα 7** παρουσιάζεται η **μηνιαία διακύμανση** της εγκατεστημένης ισχύος, της παραγόμενης ενέργειας, της διείσδυσης και του συντελεστή χρησιμοποίησης των **ΑΠΕ ανά τεχνολογία** στην Κύπρο και στην Κρήτη για το χρονικό διάστημα 2011-2016.

Η μηνιαία συνολικά παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ εμφανίζει έντονες διακυμάνσεις ανά μήνα, που οφείλονται κυρίως στις μεταβολές του αιολικού και ηλιακού δυναμικού. Το μεγαλύτερος μέρος της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ στην Κύπρο ανήκει στα Α/Π, που έχουν και το μεγαλύτερο ποσοστό εγκατεστημένης ισχύος. Αμέσως μετά έρχονται οι Φ/Β σταθμοί με σημαντική αύξηση της συνεισφοράς τους από το 2013 και έπειτα, ως αποτέλεσμα της αύξησης της εγκατεστημένης τους ισχύος. Οι σταθμοί βιομάζας (ΣΒΙΟ) έχουν το μικρότερο μερίδιο ενεργειακής συνεισφοράς, λόγω του μικρού μεγέθους εγκατεστημένης ισχύος. Ωστόσο η παραγωγή τους παρουσιάζει σημαντικά μικρότερες χρονικές διακυμάνσεις σε σχέση με τα Α/Π και τα Φ/Β και συνεπώς χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη χρονική αξιοπιστία, κάτι που αποτυπώνεται και στο μηνιαίο συντελεστή χρησιμοποίησης τους που παίρνει αρκετά υψηλότερες τιμές σε σχέση με τις άλλες δύο τεχνολογίες.

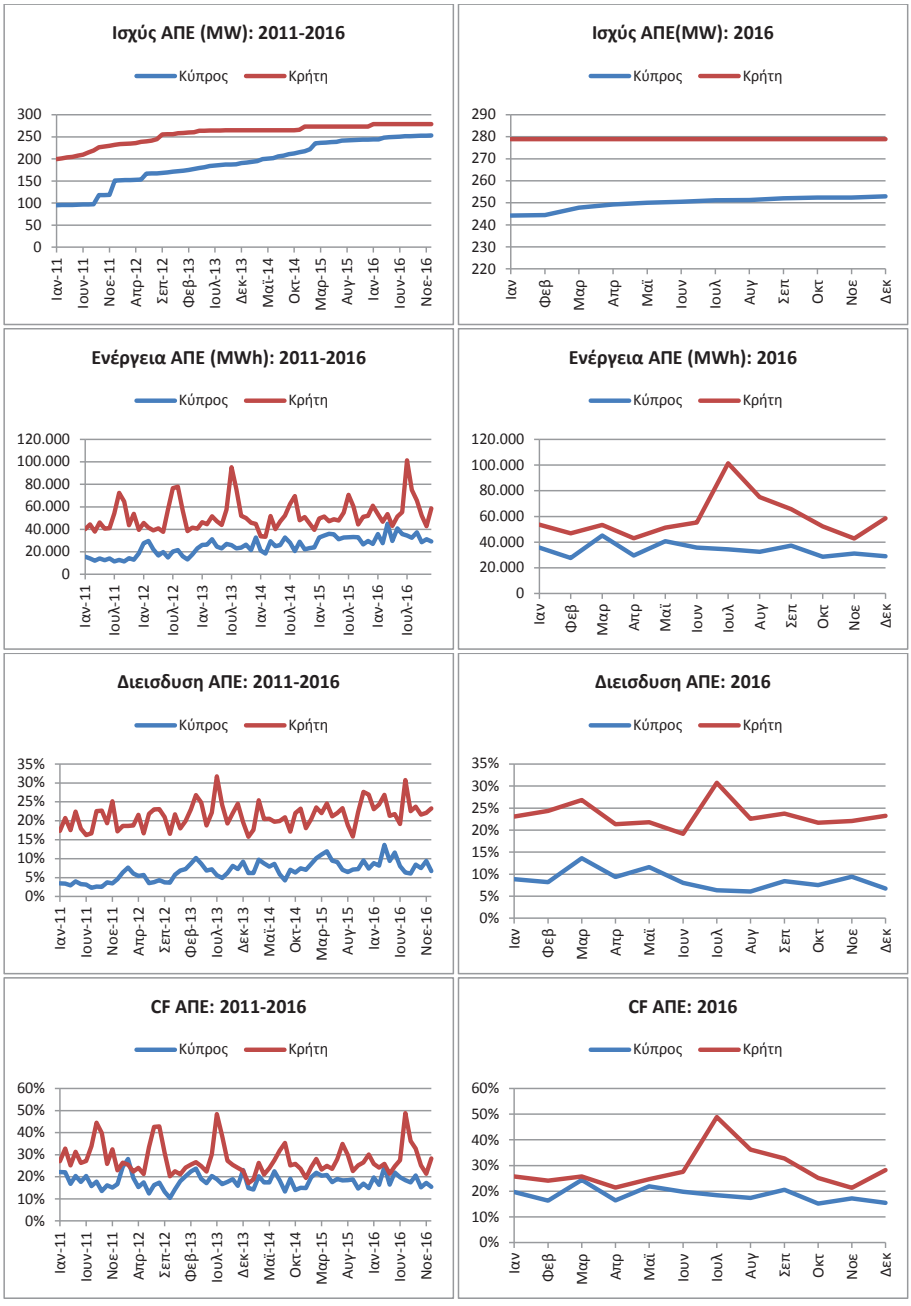
Αξιοσημείωτο είναι ότι το μηνιαίο μέγεθος του συντελεστή χρησιμοποίησης (CF) των Α/Π κυμαίνεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα για την συγκεκριμένη τεχνολογία, με μέση μηνιαία τιμή εξαετίας 2011-2016 στο 15,7%, την στιγμή που η αντίστοιχη μέση μηνιαία τιμή του CF των Φ/Β είναι στο 18,7%. Η αντίστοιχη τιμή του CF των ΣΒΙΟ είναι στο 47,5%. Από την άλλη πλευρά, στην Κρήτη οι αντίστοιχες μέσες μηνιαίες τιμές για τον CF των Α/Π και των Φ/Β είναι 30,3% και 20,9% αντίστοιχα. Γεγονός που δείχνει ότι το αιολικό δυναμικό στο νησί της Κρήτης είναι πολύ υψηλότερο από ότι στην Κύπρο.

Τέλος στο **σχήμα 8** παρουσιάζεται η **ετήσια διακύμανση** της εγκατεστημένης ισχύος, της παραγόμενης ενέργειας, της διείσδυσης και του συντελεστή χρησιμοποίησης των **ΑΠΕ ανά τεχνολογία**, κατά την περίοδο 2011-2016.

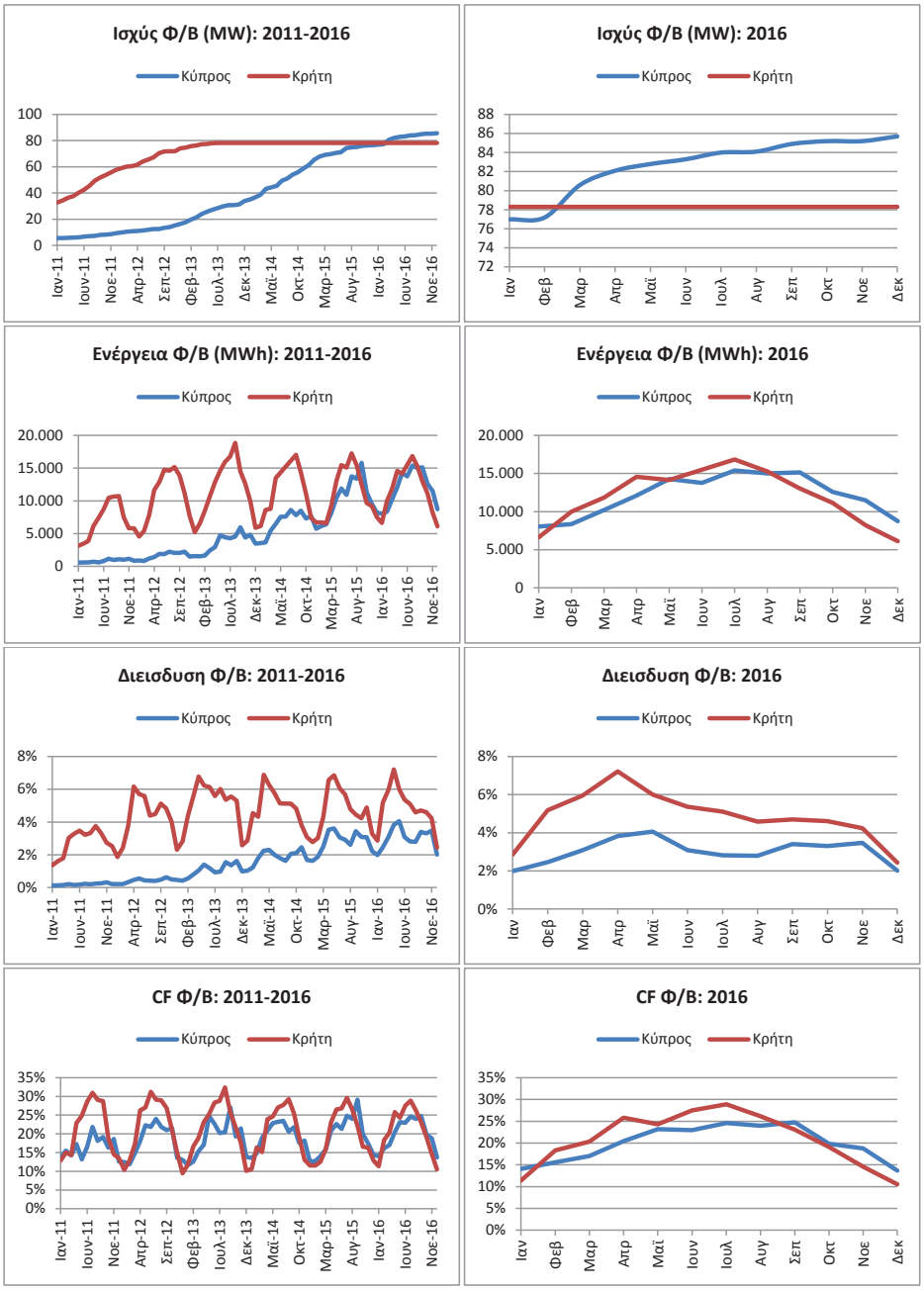
Η ετήσια διείσδυση των ΑΠΕ στην Κύπρο αυξήθηκε από το 3,3% το 2011 στο **8,5%** το 2015 και στο **8,4%** το 2016, ωστόσο είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη διείσδυση των ΑΠΕ στην Κρήτη, όπου από το 20% το 2011 ανήλθε στο **23,4%** το 2016. Το μεγαλύτερο μερίδιο από τις ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή της Κύπρου ανήκει στα Α/Π ακολουθούμενα από τα Φ/Β, με μέση ετήσια διείσδυση διετίας 2015-2016 στο 5% και στο 2,9% αντίστοιχα. Στην Κρήτη τα αντίστοιχα ποσοστά είναι πολύ υψηλότερα με μέση ετήσια διείσδυση διετίας 2015-2016 στο 18,1% για τα Α/Π και στο 4,8% για τα Φ/Β. Η συνεισφορά των σταθμών βιομάζας (ΣΒΙΟ) στην Κύπρο είναι αξιοσημείωτη. Οι ΣΒΙΟ αν και διαθέτουν πολύ μικρότερη εγκατεστημένη ισχύ σε σχέση με τα αιολικά και Φ/Β πάρκα, εντούτοις κατέχουν σημαντικό μερίδιο στην ηλεκτροπαραγωγή (0,8%) αναλογικά με την εγκατεστημένη τους ισχύ. Αυτό αποτυπώνεται άλλωστε και από τον ετήσιο συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας των ΣΒΙΟ, με μέση ετήσια τιμή την περίοδο 2011-2016 στο 47,5%.

Ο ετήσιος συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας των ΑΠΕ στην Κύπρο την 2011-2016 κυμάνθηκε από 16,8%-19,5%, με μέση ετήσια τιμή στο **18,1%**. Το αντίστοιχο μέγεθος στην Κρήτη είναι πολύ μεγαλύτερο, αφού κυμάνθηκε μεταξύ 24,7%-30,8%, με μέση τιμή εξαετίας στο **27,8%**. Η χαμηλή τιμή του CF των ΑΠΕ στην Κύπρο οφείλεται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, κατά κύριο λόγο στο εξαιρετικά χαμηλό αιολικό δυναμικό που διαθέτει το νησί. Έτσι τα Α/Π στην Κύπρο διαθέτουν ένα ετήσιο CF που κυμαίνεται από 14,2% έως 18% με μέση τιμή εξαετίας 2011-2016 στο 15,7%. Το αντίστοιχο μέγεθος για την Κρήτη κυμάνθηκε από το 26,5% έως 33,3% με μέση τιμή 30,3%. Συνεπώς ο ετήσιος CF των Α/Π στην Κύπρο είναι εξαιρετικά χαμηλός, γεγονός που οφείλεται στο πολύ χαμηλό αιολικό δυναμικό του νησιού. Κατά την ίδια περίοδο, ο ετήσιος CF για τα Φ/Β στην Κύπρο κυμάνθηκε

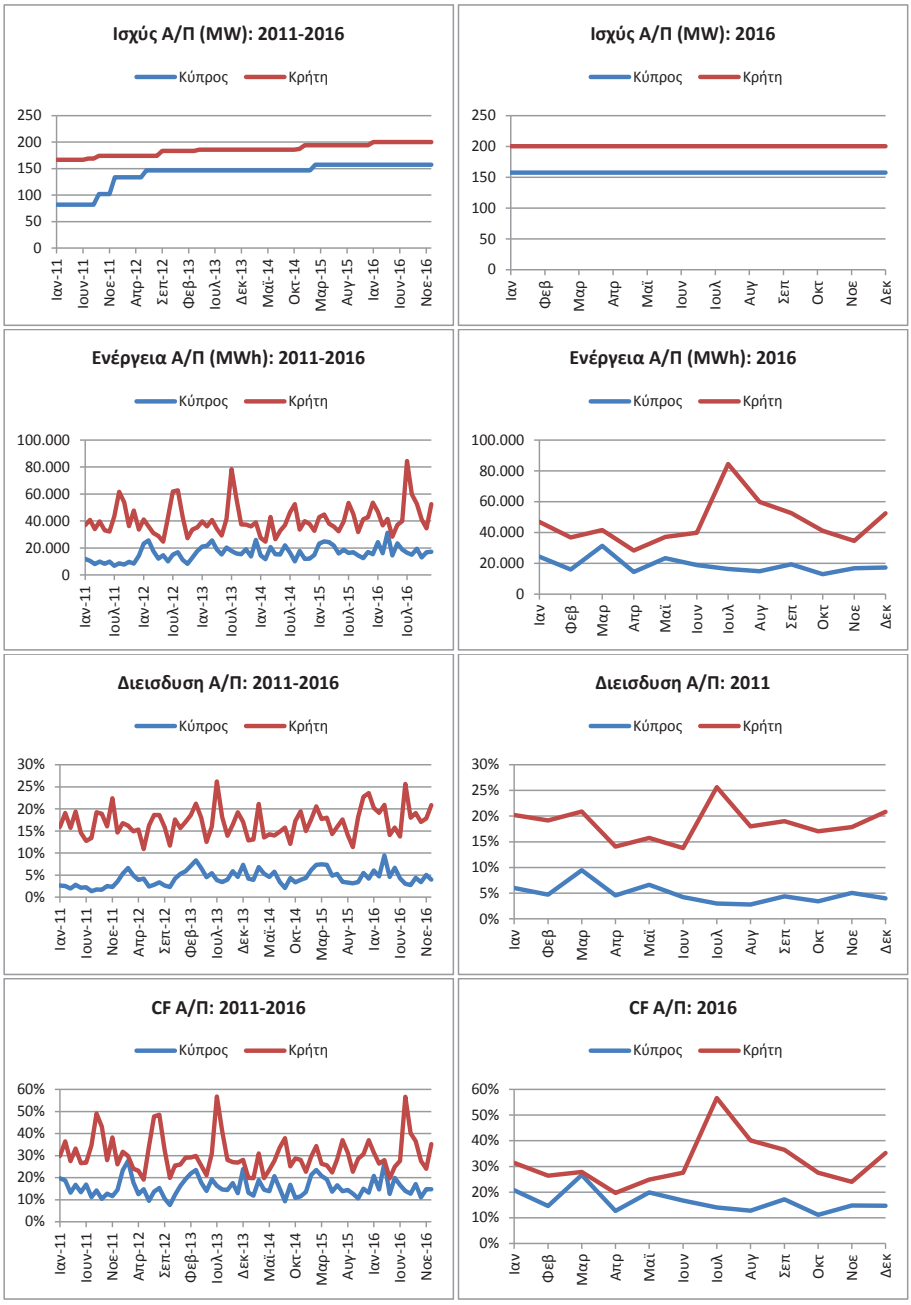
από 16,4% έως 20,0% με μέση τιμή εξαετίας 18,7%, ενώ στην Κρήτη κυμαινόταν από 20,0% έως 21,7% με μέση τιμή 20,9%. Οι διαφορές αυτές πιθανώς να οφείλονται τόσο στην ποιότητα του ηλιακού δυναμικού, όσο και στην μορφολογία του εδάφους και την τοποθέτηση των Φ/Β πάνελ.



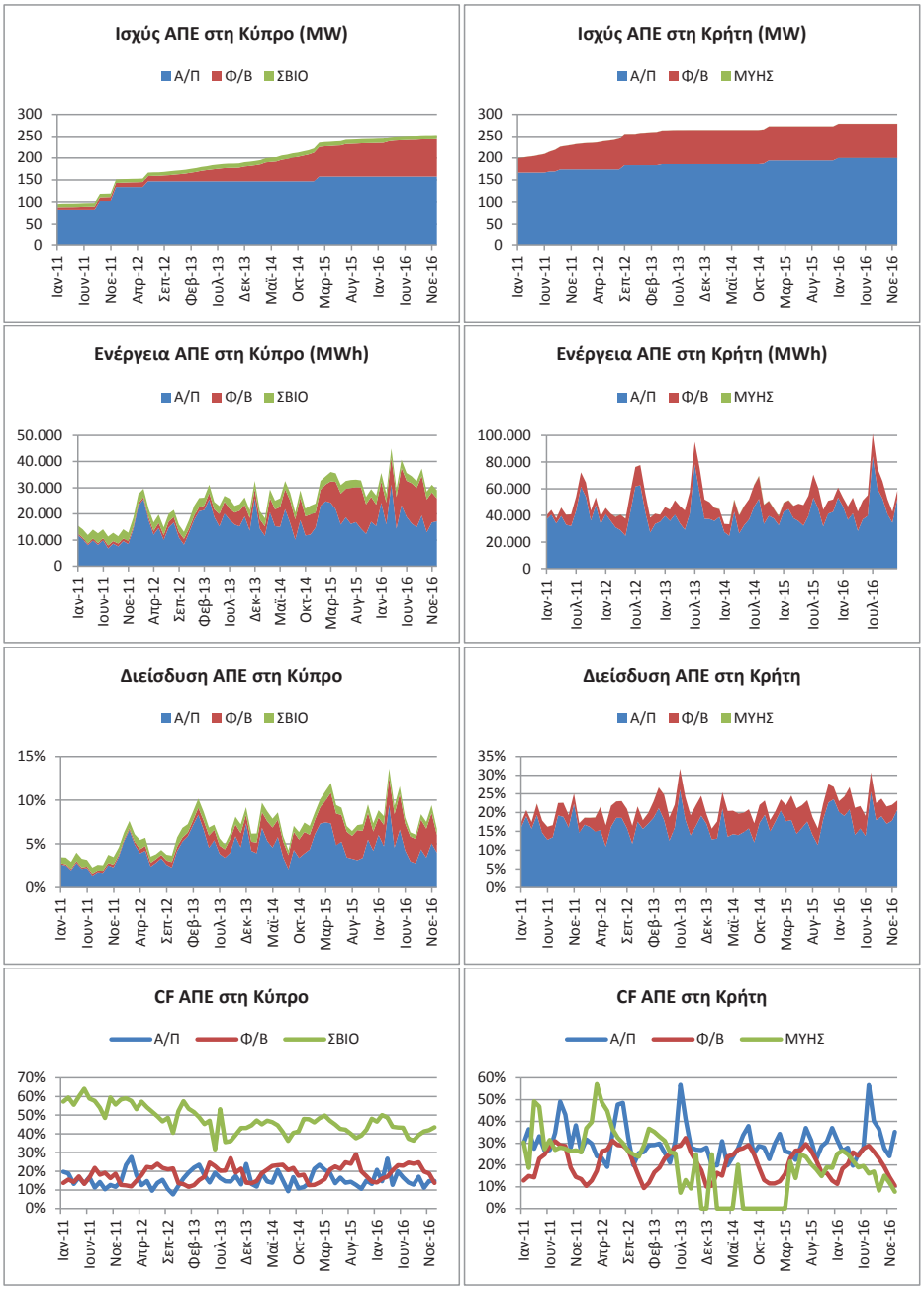
Σχήμα 4: Μηνιαία εγκατεστημένη ισχύς, παραγόμενη ενέργεια, διείσδυση και συντελεστής χρησιμοποίησης (CF) των ΑΠΕ σε Κύπρο και Κρήτη, 2011-2016



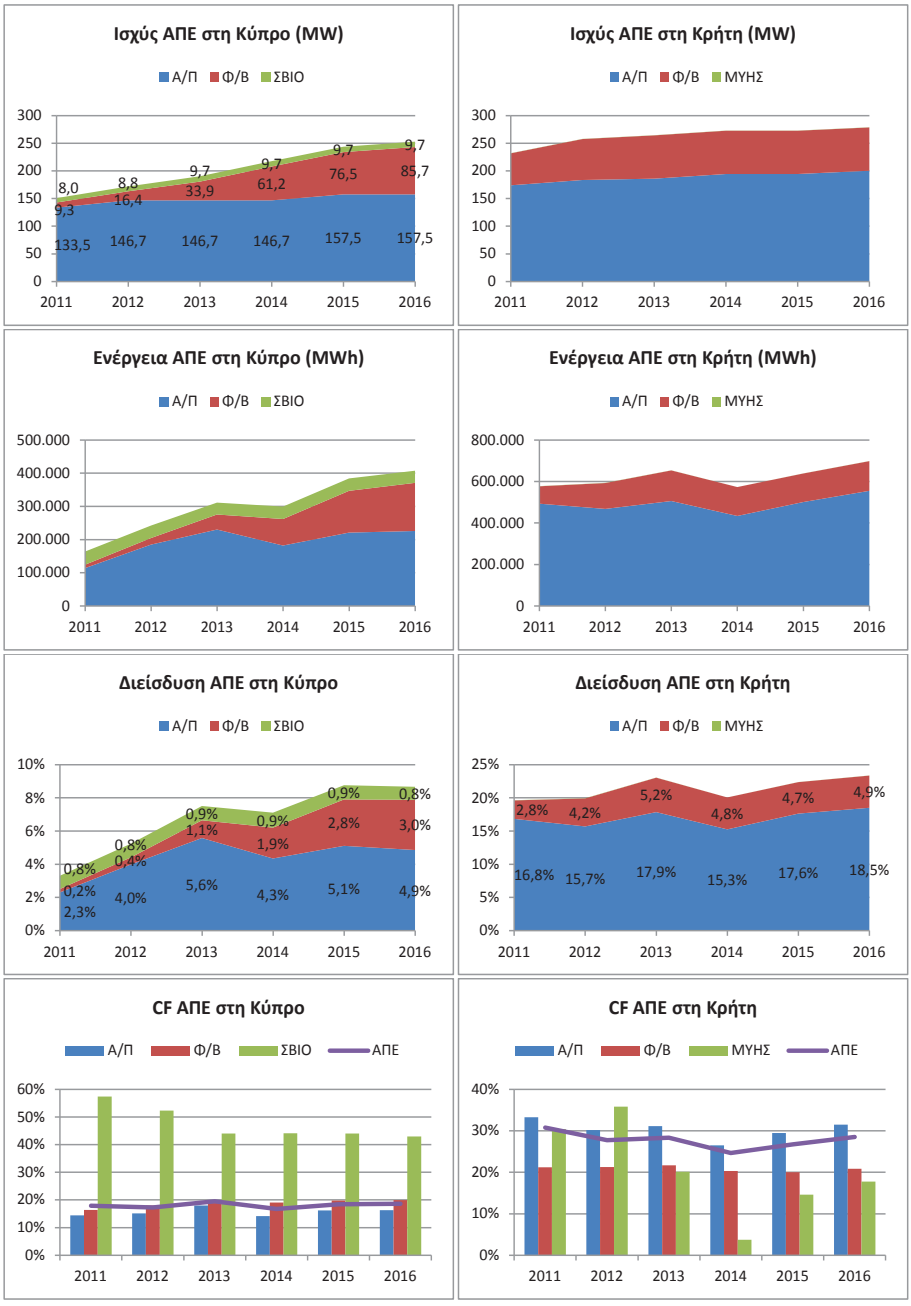
Σχήμα 5: Μηνιαία εγκατεστημένη ισχύς, παραγόμενη ενέργεια, διείσδυση και συντελεστής χρησιμοποίησης (CF) των Φ/Β σταθμών σε Κύπρο και Κρήτη, 2011-2016



Σχήμα 6: Μηνιαία εγκατεστημένη ισχύς, παραγόμενη ενέργεια, διείσδυση και συντελεστής χρησιμοποίησης (CF) των Α/Π σε Κύπρο και Κρήτη, 2011-2016



Σχήμα 7: Μηνιαία εγκατεστημένη ισχύς, παραγόμενη ενέργεια, διείσδυση και συντελεστής χρησιμοποίησης (CF) ανά τεχνολογία ΑΠΕ σε Κύπρο και Κρήτη, 2011-2016



Σχήμα 8: Ετήσια εγκατεστημένη ισχύς, παραγόμενη ενέργεια, διείσδυση και συντελεστής χρησιμοποίησης (CF) ανά τεχνολογία ΑΠΕ σε Κύπρο και Κρήτη, 2011-2016

3.3. Απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ για την επίτευξη του εθνικού στόχου διείσδυσης των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή το 2020

Με βάση τις προβλέψεις του Διαχειριστή του Συστήματος Μεταφοράς Κύπρου (ΔΣΜΚ), το μέγεθος της ζήτησης κατά τα επόμενα 3 χρόνια θα αυξηθεί με μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης γύρω στο 4,6% και θα διαμορφωθεί το 2020 στις 5.865 GWh (σύμφωνα με το βασικό σενάριο) [7].

Σύμφωνα με το Εθνικό Σχέδιο Δράσης της Κύπρου για τις ΑΠΕ, η διείσδυση των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή το 2020 πρέπει να ανέλθει στο 16% της ζήτησης (από 8,4% το 2016). Για την κάλυψη του ανωτέρω στόχου διείσδυσης, η παραγόμενη ενέργεια από ΑΠΕ το 2020 πρέπει να είναι ίση με $\mathrm{E_{ΑΠΕ}} = 16\% \cdot \text{Ζήτηση} = 16\% \cdot 5.865\ \mathrm{GWh} = 938{,}4\ \mathrm{GWh}$.

Εάν ληφθεί υπόψη ότι ο μέσος ετήσιος συντελεστής χρησιμοποίησης των ΑΠΕ κατά την περίοδο 2011-2016 ήταν 18,1%, μπορεί να εκτιμηθεί το μέγεθος της ισχύος ΑΠΕ που απαιτείται προκειμένου να καλυφθεί ο παραπάνω στόχος διείσδυσης:

$$\mathrm{P} = \frac{\mathrm{E_{ΑΠΕ}}}{8760 \cdot \mathrm{CF}} = \frac{938{,}4 \cdot 10^3\ \mathrm{MWh}}{8760\ \mathrm{h} \cdot 18{,}1\%} = 592{,}7\ \mathrm{MW}$$

Συνεπώς η πρόσθετη ισχύς ΑΠΕ που απαιτείται προκειμένου να καλυφθεί ο εθνικός στόχος διείσδυσης είναι: $\mathbf{339{,}8\ MW}$ $(= 645{,}3\ \mathrm{MW} - 252{,}9\ \mathrm{MW})$.

Εάν ληφθεί υπόψη μια απόκλιση στην τιμή της ζήτησης κατά ±5% επί του βασικού σεναρίου πρόβλεψης, τότε η απαιτούμενη πρόσθετη ισχύς ΑΠΕ διαμορφώνεται αντίστοιχα από τα 310,2 MW έως τα 369,5 MW.

Τέλος, με βάση το βασικό σενάριο αύξησης της ζήτησης, μια ενδεχόμενη μεταβολή στην μέση ετήσια τιμή του CF των ΑΠΕ κατά ±5%, θα ισοδυναμούσε με μια μεταβολή στην απαιτούμενη πρόσθετη ισχύ των ΑΠΕ από τα 311,6 MW στα 371,0 MW.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση την παραπάνω ανάλυση προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Το αιολικό δυναμικό της Κύπρου είναι εξαιρετικά χαμηλότερο από αυτό της Κρήτης και συνεπώς δεν ενδείκνυται για μεγάλη ανάπτυξη Α/Π.
- Το ηλιακό δυναμικό στα δύο νησιά είναι παρόμοιο και χαρακτηρίζεται από υψηλή ποιότητα και συνεπώς είναι κατάλληλο για ανάπτυξη Φ/Β και ηλιοθερμικών (Η/Θ) συστημάτων.
- Οι σταθμοί βιομάζας (ΣΒΙΟ) της Κύπρου συνεισφέρουν σημαντικά αναλογικά με την εγκατεστημένη τους ισχύ και συνεπώς η περαιτέρω ανάπτυξη τους θα ενισχύσει την διείσδυση των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή.
- Η πρόσθετη ισχύς ΑΠΕ που απαιτείται για την κάλυψη του εθνικού στόχου το 2020 εκτιμάται περί τα 340 MW. Το μεγαλύτερο μέρος της πρόσθετης ισχύος προτείνεται να δεσμευτεί από Φ/Β πάρκα, Η/Θ σταθμούς και συστήματα βιομάζας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Διονύσιο Παπαχρήστου, Δρ. Ηλεκτρολόγο Μηχανικό ΕΜΠ, Ειδ. Επιστήμονα και Δ/ντη του Γραφείου Τύπου και Δημοσίων Σχέσεων της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας, για την ευκαιρία που μου έδωσε με την ανάθεση αυτής της εργασίας, στο πλαίσιο της Πρακτικής μου Άσκησης στη ΡΑΕ, να ασχοληθώ και να εμβαθύνω σε ένα τόσο ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα, όπως αυτό της διείσδυσης των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή της Κύπρου.

Ευχαριστώ επίσης θερμά τους Αλέξανδρο Κόντζηλα και Ιωάννη Νίκα, συνεργάτες μου στην ανάλυση και επεξεργασία αυτού του θέματος, για την άψογη και εποικοδομητική συνεργασία τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Διαχειριστής Συστήματος Μεταφοράς Κύπρου (ΔΣΜΚ), https://www.dsm.org.cy/el/home

[2] ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε., Μηνιαία Δελτία ΑΠΕ και Θερμικής Παραγωγής στα ΜΔΝ,
https://www.deddie.gr/el/themata-tou-diaxeiristi-mi-diasundedemenwn-nisiwn/stoixeia-ekkathariseon-kai-minaion-deltion-mdn/miniaia-deltia-ape-kai-thermikis-paragwgis-sta-mi

[3] ΔΣΜΚ, *Ποσοστά Διείσδυσης Ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ*, δεδομένα περιόδου 2011-2016,
https://www.dsm.org.cy/el/cyprus-electrical-system/electrical-energy-generation/energy-generation-records/yearly/res-penetration

[4] Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις ΑΠΕ 2010-2020 και Εκθέσεις Προόδου σχετικά με την προώθηση και χρήση των ΑΠΕ,
http://www.mcit.gov.cy/mcit/EnergySe.nsf/All/24D7A7A5980258B7C225822F0023CCEC?OpenDocument

[5] Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου,
www.moa.gov.cy/moa/ms/ms.nsf/DMLcharts_gr/DMLcharts_gr?opendocument

[6] Meteo, http://www.meteo.gr/windStatistics.cfm

[7] ΔΣΜΚ, Επίσημη Πρόβλεψη Συνολικής Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (GWh) και Ισχύος (MW) για την περίοδο 2017 – 2026,
https://www.dsm.org.cy/el/cyprus-electrical-system/electrical-energy-generation/long-term-forecast