

ΑΙΟΛΙΚΑ

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΚΗΠΟΣ. ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΣΥΝΥΠΑΡΞΗ ΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Δρ. Δ. Β. Κανελλόπουλος(*), Ε. Παλαιολούγκα

(*)Διεύθυνση Μετρήσεων Φυσικών Πόρων και Πιστοποίησης (ΔΜΦΠΠ), ΔΕΗ
Ανανεώσιμες Α.Ε. Καποδιστρίου 3, Αγ. Παρασκευή, 153 43, dkanellopoulos@ppcr.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στη χώρα μας ταυτίστηκε με την τοποθέτηση των ανεμογεννητριών κατά μήκος των κορυφογραμμών, όπου λόγω επιταχύνσεων ο άνεμος πνέει με μεγαλύτερη ένταση σε σύγκριση με ομαλότερες ή πεδινές περιοχές. Ο κορεσμός όμως αυτών των καλών ορεινών περιοχών, σε συνδυασμό με τους υψηλούς στόχους που έχει η χώρα για εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων 7500 MW μέχρι το 2020 από τα 1902 MW που υπάρχουν σήμερα, οδηγεί σε αναζήτηση περιοχών όπου υπάρχουν υφίστανται καλλιέργειες και κτηνοτροφία.

Στην εργασία παρουσιάζεται ένα παράδειγμα για μια πεδινή έκταση 5 επί 5 χιλιομέτρων όπου υπάρχουν κυρίως δένδρα και καλλιέργειες. Πραγματοποιείται εκτίμηση του αιολικού δυναμικού με τον αλγόριθμο Windsim (CFD), εξετάζεται το ενεργειακό ενδιαφέρον, γίνεται σχεδίαση αιολικού πάρκου με γνώμονα την ελαχιστοποίηση των παρεμβάσεων που χρειάζονται για την κατασκευή των βάσεων των μηχανών, τις πλατείες ανέγερσης και τους δρόμους πρόσβασης. Υπολογίζεται από αεροφωτογραφίες ο αριθμός των δένδρων που θα χρειαστεί να κοπούν ή να μεταφυτευτούν.

Λαμβάνοντας υπόψη τις αποστάσεις ασφαλείας από κατοικημένες περιοχές, και επιλέγοντας ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος από 1,8 έως 3 MW με μεγάλη διάμετρο πτερυγίων, ώστε να μεγιστοποιείται η ενεργειακή παραγωγή, φαίνεται πως η έκταση επαρκεί για έργα της τάξεως των 150 MW με υψηλούς συντελεστές εκμετάλλευσης (capacity factor). Οι παρεμβάσεις στις υφιστάμενες καλλιέργειες δεν ξεπερνούν το 2% της διαθέσιμης γης.

Απαραίτητη και αναγκαία προϋπόθεση για την επιτυχία ενός τέτοιου έργου είναι η συναίνεση της τοπικής κοινωνίας, η οποία καλείται να αποδεχθεί τη δημιουργία ενός ενεργειακού κήπου με εμφανή τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη που αυτός συνεπάγεται. Η χρήση παρόμοιων περιοχών ανά τη χώρα θα συμβάλει στην επίτευξη του στόχου για περισσότερες εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων με τις τοπικές κοινωνίες να πρωταγωνιστούν στην ανάπτυξή τους και να καρπούνται τα οφέλη.

Λέξεις Κλειδιά: αιολική ενέργεια, γεωργία, αιολικά πάρκα, κοινωνική αποδοχή.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ελλάδα αποτελεί ιδανικό τόπο για ευρεία χρήση των ΑΠΕ. Τα ιδιαίτερα φυσικά τοπιογραφικά χαρακτηριστικά της σε συνδυασμό με τα ποικιλόμορφα κλιματολογικά στοιχεία της ικανοποιούν την αναγκαία συνθήκη για την ανάπτυξη κάθε εφαρμογής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η γεωγραφική της θέση εξασφαλίζει μια εκτεταμένη περίοδο ηλιοφάνειας, προσφέροντας την δυνατότητα μιας ουσιαστικής αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας. Επίσης, η διάσπαρτη παρουσία μιας πλειάδας μικρών αλλά ορμητικών ποταμών, λόγω του έντονου τοπογραφικού ανάγλυφου της χώρας, επιτρέπει την αξιοποίηση της διαθέσιμης υδραυλικής ενέργειας ως συνέπεια της φυσικής ροής του ύδατος προς κατώτερα υψομετρικά επίπεδα. Τέλος, η συνύπαρξη ηπειρωτικού – νησιωτικού τοπίου προσφέρει φυσικές διόδους στην νομοτελειακή μετακίνηση μεγάλων αέριων μαζών, διαμορφώνοντας ένα ιδιαίτερα αξιόλογο αιολικό δυναμικό κυρίως στις παράκτιες περιοχές.

Η εγκατεστημένη ισχύς των ΑΠΕ στην Ελλάδα έχει διαμορφωθεί ως εξής [1], [2]:

Πίνακας 1: Εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ στην Ελλάδα στο Διασυνδεδεμένο και στο Μη Διασυνδεδεμένο Σύστημα αντίστοιχα		
ΑΠΕ	Διασυνδεδεμένο Σύστημα: ΛΑΓΗΕ, Σεπτέμβριος 2014	Μη Διασυνδεδεμένο Σύστημα : ΔΕΔΔΗΕ, Ιούλιος 2014
Φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις	2079,46 MW + 350,24 MW σε στέγες	135,84 MW + 29,09 MW σε στέγες
Ανεμογεννήτριες	1594,52 MW	307,49 MW
Μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί	219,84 MW	0,3 MW
Σταθμοί βιομάζας-βιοαερίου	47,19 MW	-

Όπως προκύπτει από τα στοιχεία, τα αιολικά πάρκα αποτελούν τη 2^η σημαντικότερη από πλευράς εγκατεστημένης ισχύος μορφή ΑΠΕ στην Ελλάδα. Λαμβάνοντας υπόψη τα εμπόδια που έχουν ανακύψει στην ανάπτυξη των Φ/Β, εκτιμούμε ότι τα αιολικά θα είναι η βάση της μελλοντικής ανάπτυξης των ΑΠΕ στη χώρα μας.

Ένας σημαντικός παράγοντας στην ανάπτυξη των ΑΠΕ στην Ελλάδα έχει καταστεί το νησί της Κρήτης, καθώς έχει πολύ καλό κλίμα, ευνοεί καλλιέργειες, σπρωρώνες και ελαιώνες, βρίσκεται σε σημείο με μεγάλη ηλιοφάνεια και πολύ καλό αιολικό δυναμικό, κατέχει στρατηγική θέση στον τομέα της ενέργειας, μιας και η δυνατότητα διασύνδεσης Ισραήλ-Κύπρου και Ελλάδος περνά από τη Μεγαλόνησο, μπορεί να γίνει εξαγωγέας πράσινης ενέργειας όχι μόνο στη χώρα μας, αλλά και στην Ευρώπη.

Τα στοιχεία για το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Κρήτη παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 όπου φαίνεται η σημαντική συνεισφορά τους στην κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών της Μεγαλονήσου.

εγκατ. ισχύς θερμικών μονάδων 2013 (MW)	μέγιστη ετήσια αιχμή ζήτησης 2013 (MW)	ενέργεια θερμικών μονάδων (MWh)	εγκατ. ισχύς ΑΠΕ (MW)	ενέργεια μονάδων ΑΠΕ (MWh)	ποσοστό συμμετοχής ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή
819,25	587	156.103	185,96 Α/Π + 78,6 ΦΒ	33.412	17,6%

2. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΚΗΠΟΣ

Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στη χώρα μας ταυτίστηκε με την τοποθέτηση των ανεμογεννητριών κατά μήκος των κορυφογραμμών, όπου λόγω επιταχύνσεων, ο άνεμος πνέει με μεγαλύτερη ένταση σε σύγκριση με ομαλότερες ή πεδινές περιοχές. Ο κορεσμός όμως αυτών των καλών ορεινών περιοχών, σε συνδυασμό με τους υψηλούς στόχους που έχει η χώρα για εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων 7500 MW μέχρι το 2020 από τα 1902 MW που υπάρχουν σήμερα, οδηγεί σε αναζήτηση άλλων περιοχών όπου σήμερα υφίστανται καλλιέργειες και κτηνοτροφία.

Στην Κρήτη η εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών πάρκων (ΑΠ) είναι 186 MW. Τα περισσότερα ΑΠ συγκεντρώνονται στο Νομό Λασιθίου, καθότι η περιοχή αυτή έχει και το υψηλότερο δυναμικό μεταξύ των 4 νομών. Οι θέσεις αυτές βρίσκονται στην πλειοψηφία τους σε κορυφογραμμές με έντονο ανάγλυφο, με δυσκολία πρόσβασης και μεταφοράς των μεγάλων μηχανών και με δυσκολία κατασκευής νέων δικτύων ΥΤ.

Ο ενεργειακός κήπος έρχεται να προτείνει μία λύση για την περαιτέρω ανάπτυξη των ΑΠ και να παρουσιάσει τη δυνατότητα εγκατάστασης ΑΠ σε περιοχές που μέχρι τώρα δεν θεωρούνταν «ιδανικές» ή «κατάλληλες».

Ο ενεργειακός κήπος δεν παράγει μόνο βρώσιμα προϊόντα, αλλά και καθαρή ηλεκτρική ενέργεια.

2.1. ΤΥΠΙΚΗ ΧΡΗΣΗ ΓΗΣ ΣΗΜΕΡΑ

Οι κλιματολογικές συνθήκες στην Κρήτη ευνοούν τη δημιουργία οπωρώνων και ελαιώνων στο νησί, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1. Διάσπαρτα χωριά και οικισμοί περιβάλλουν τις εκτάσεις.



Εικόνα 1: Ενδεικτικές εικόνες του τοπίου της περιοχής του ενεργειακού κήπου

Στην εργασία παρουσιάζεται μια τυπική περιοχή διαστάσεων 5km x 5km στο Νομό Ηρακλείου η οποία φαίνεται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2: Απόσπασμα χάρτη 1:50.000 με τα χωριά στην ευρύτερη περιοχή του ενεργειακού κήπου, ο οποίος περιβάλλεται από το τετράγωνο με πλευρά 5 km

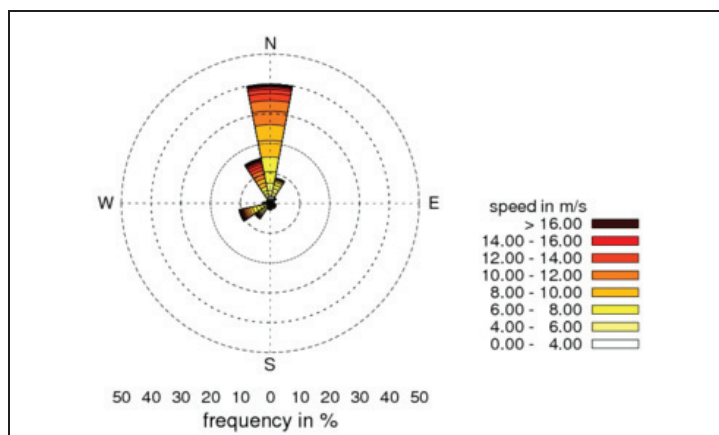
2.2. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Η εκτίμηση του πεδίου ροής, καθώς και η εύρεση της χωρικής κατανομής του αιολικού δυναμικού έγιναν με τη χρήση του προγράμματος Windsim της Νορβηγικής εταιρείας Windsim S.A. [3]. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα ενδείκνυται για έντονο τοπογραφικό ανάγλυφο, όπως αυτό της Ελλάδας. Το πρόγραμμα βασίζεται στον γνωστό κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής PHOENICS για την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων όγκων. Δεδομένου ότι οι εξισώσεις είναι μη γραμμικές η διαδικασία επίλυσης είναι επαναληπτική. Ξεκινώντας από κάποιες αρχικές τιμές η λύση προσεγγίζεται σταδιακά από την επαναληπτική διαδικασία, έως ότου επιτευχθεί μια αποδεκτή σύγκλιση των άγνωστων τιμών. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα εμπορικά προγράμματα, δεν χρησιμοποιεί έτοιμες γραμμικές λύσεις των δυναμικών εξισώσεων του οριακού στρώματος.

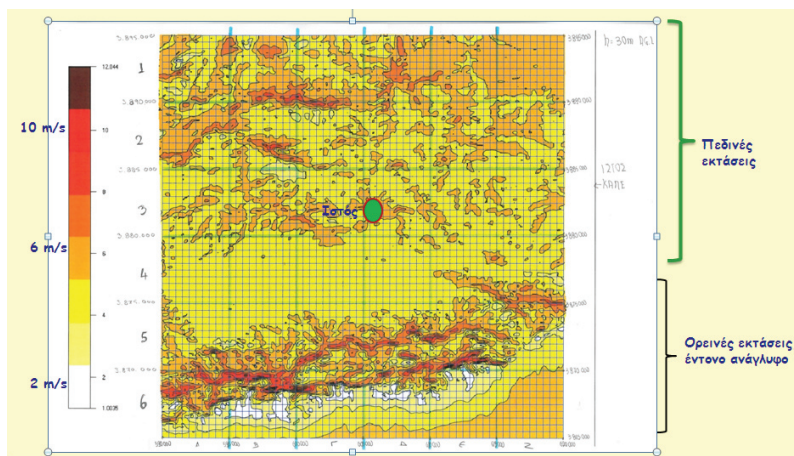
Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν πιστοποιημένες ανεμολογικές μετρήσεις διάρκειας 1,5 έτους. Οι μετρήσεις είναι σε ύψος 29,3 m από την επιφάνεια του εδάφους και στη θέση του ιστού η μέση ταχύτητα είναι 7,7 m/s. Οι επικρατέστεροι άνεμοι είναι βόρειοι και βορειοδυτικοί.

Για τη μελέτη του αιολικού δυναμικού επιλέχθηκε και εξετάστηκε μια περιοχή διαστάσεων 30 x 30 χιλιομέτρων νότια της πόλης του Ηρακλείου. Τα ανεμολογικά αποτελέσματα της περιοχής αυτής, όπως προέκυψαν από την επεξεργασία στο πρόγραμμα Windsim, παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4 οι ταχύτητες του ανέμου είναι υψηλές στις ορεινές περιοχές με έντονο ανάγλυφο, αλλά είναι ικανοποιητικές και στις πεδινές εκτάσεις με τιμές 6-7 m/s σε ύψος 80 m από την επιφάνεια του εδάφους.



Εικόνα 3: Το ροδόγραμμα της περιοχής. Κύριοι άνεμοι Β και ΒΒΔ



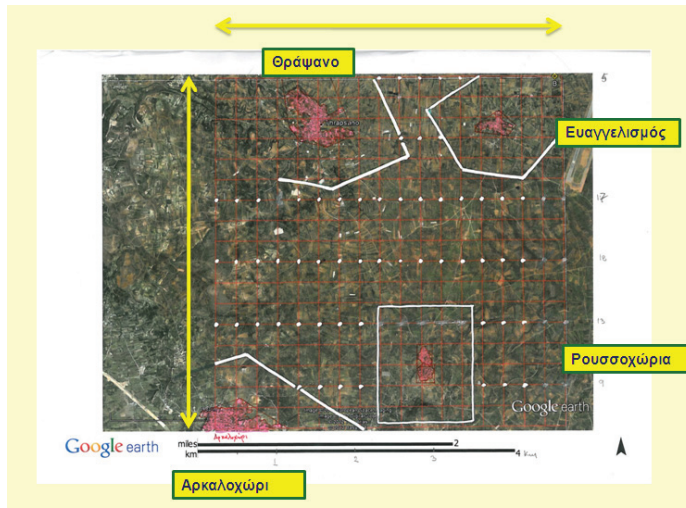
Εικόνα 4: Ο ανεμολογικός χάρτης της περιοχής της μελέτης όπως προκύπτει από την επεξεργασία στο πρόγραμμα windsim. Διακρίνεται η θέση του ανεμολογικού ιστού

2.3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ

Για τον σχεδιασμό του ΑΠ επιλέχθηκε μία περιοχή 5 x 5 χιλιομέτρων που περιλαμβάνει τα χωριά Αρκαλοχώρι, Θράψανο, Ευαγγελισμό και Ρουσοχώρια. Η περιοχή μελέτης αξιολογήθηκε ανεμολογικά με το πρόγραμμα Windsim και επιλέχθηκαν οι 52 θέσεις α/γ οι οποίες ικανοποιούν τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

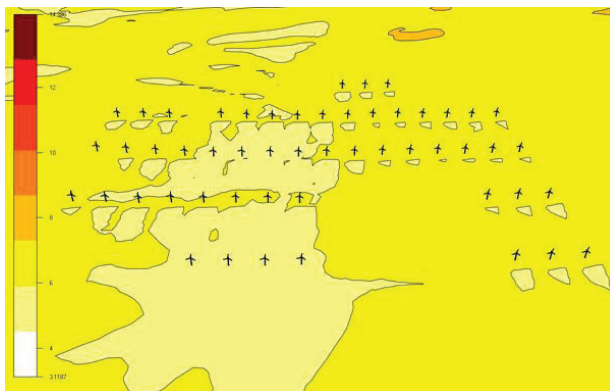
- Είναι σε κάθετη διάταξη ως προς τον Βορρά, που είναι η επικρατέστερη διεύθυνση ανέμου στην περιοχή.
- Τηρούν τις απαραίτητες αποστάσεις από χωριά, οικισμούς και δρόμους.
- Λαμβάνονται υπόψη τα υφιστάμενα μεμονωμένα κτήρια και εγκαταστάσεις.

- Για την χωροθέτησή τους έχει θεωρηθεί διάμετρος ανεμογεννήτριας $D=120\text{m}$, τιμή που είναι αρκετά μεγάλη ώστε να καλύπτει μια ευρεία γκάμα τύπων α/γ.
- Έχουν τοποθετηθεί σε παράλληλες σειρές που απέχουν $900\text{m}=7,5 D$, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι απώλειες από την επίδραση του ομόρρου.
- Η απόσταση μεταξύ μηχανών είναι $2,5 D=300\text{m}$, όπως ορίζεται σήμερα νομοθετικά.



Εικόνα 5: Οι θέσεις των α/γ (λευκά στίγματα) και τα χωριά της περιοχής. Οι άσπρες τεθλασμένες γραμμές ορίζουν απόσταση 500m από τα όρια των οικισμών (χάρτης από Google Earth)

Η χωροθέτηση των μηχανών φαίνεται επίσης και στην Εικόνα 6 μαζί με το αιολικό δυναμικό της περιοχής. Στις θέσεις των α/γ οι τιμές του ανέμου είναι ικανοποιητικές και κυμαίνονται από 6-7 m/s στο ύψος πλήμνης των α/γ.



Εικόνα 6: Ο ανεμολογικός χάρτης της περιοχής εγκατάστασης των α/γ όπως προκύπτει από την επεξεργασία στο πρόγραμμα windsim και οι θέσεις των α/γ

2.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΑΠ

Τα ενεργειακά αποτελέσματα προέκυψαν από την επεξεργασία στο πρόγραμμα Windsim. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι μακροχρόνια σταθμισμένα και έχουν ληφθεί υπόψη οι απώλειες λόγω της επίδρασης του ομίχρου μεταξύ των α/γ. Μελετήθηκαν διάφοροι τύποι α/γ με ονομαστική ισχύ από 1,8-3 MW. Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται η εγκατεστημένη ισχύς, η ετήσια παραγόμενη ενέργεια και ο συντελεστής εκμετάλλευσης.

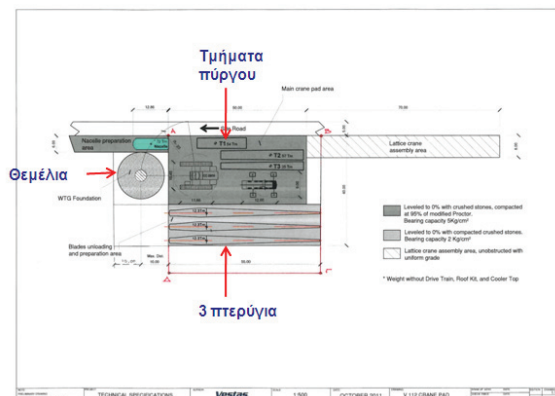
Πίνακας 3: Τα ενεργειακά αποτελέσματα του κήπου όπως προκύπτουν από το πρόγραμμα Windsim				
ΑΠ	ονομ. ισχύς α/γ (MW)	συνολική ισχύς ΑΠ (MW)	ετήσια παραγόμενη ενέργεια (GWh)	συντελεστής εκμετάλλευσης Cf (%)
Σενάριο 1 α/γ Sinovel	3	156	379	28
Σενάριο 2 α/γ Vestas	3	156	406	30
Σενάριο 3 α/γ Gamesa	2	104	291	32
Σενάριο 4 α/γ Vestas	1,8	93,6	284	34

Φαίνεται λοιπόν ότι το ΑΠ στην περιοχή θα έχει πολύ καλό συντελεστή εκμετάλλευσης που κυμαίνεται από 28-34% ανάλογα με τον τύπο α/γ που επιλέγεται κάθε φορά.

2.5. ΑΠΑΙΤΗΣΗ ΓΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΚΗΠΟ

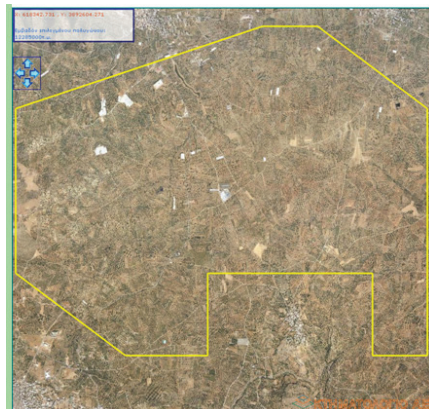
Για τη δημιουργία του ενεργειακού κήπου είναι απαραίτητο, εκτός από την ενεργειακή του αξιολόγηση, να μελετηθεί και να υπολογιστεί η επιφάνεια της γης που θα χρειαστεί.

Αρχικά θα πρέπει να υπολογιστεί το εμβαδόν επιφάνειας που χρειάζεται η εγκατάσταση μιας α/γ. Για το λόγο αυτόν έγινε η εκτίμηση επιφάνειας για 2 τύπους α/γ. Η α/γ Enercon-3 MW χρειάζεται 2750 m² και η α/γ Vestas-3 MW όπου χρειάζονται 3440 m².



Εικόνα 7: Βάση α/γ και αναγκαίος χώρος προετοιμασίας ανέγερσης μηχανής

Το εμβαδόν του πολυγώνου της περιοχής εγκατάστασης του ενεργειακού κήπου παρουσιάζεται στην Εικόνα 8 και έχει έκταση 12.285.000 m² ή 12.285 στρέμματα, όπως υπολογίστηκε από την εφαρμογή του ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟΥ Α.Ε.[4]. Από τις αεροφωτογραφίες της ίδιας εφαρμογής υπολογίστηκε επίσης ότι στην επιφάνεια των 3000 m² (μέσος όρος του εμβαδού επιφάνειας ανέγερσης μιας α/γ) αντιστοιχούν 86 δέντρα δηλαδή 0,0286 δένδρα/m². Από τα στοιχεία αυτά προκύπτουν οι υπολογισμοί που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4 όπου συμπεραίνεται ότι για την κατασκευή του ενεργειακού κήπου θα χρειαστεί να κοπούν, ή να μεταφυτευτούν εφόσον γίνεται, 6.445 δέντρα.



Εικόνα 8: Το πολύγωνο του κρητικού κήπου από αεροφωτογραφία (πηγή: Κτηματολόγιο)

Πίνακας 4: Υπολογισμοί για τον αριθμό των δέντρων που θα κοπούν για την κατασκευή του ενεργειακού κήπου.		
έκταση πλατειάς	3.000	m ²
σύνολο πλατειών	156.000	m ²
έκταση πολυγώνου	12.285.000	m ²
% χρήσης	1,27	%
δρόμοι πλάτους 5m	69.000	m ²
% χρήσης	0,56	%
συνολικό %=	1,83	%
μέγιστος αριθμός δένδρων=		352.170
Μέγιστος αριθμός δένδρων που θα κοπούν=		6,445

Οι υπολογισμοί δείχνουν πως, λαμβάνοντας υπόψη τους δρόμους και τις πλατείες ανέγερσης των α/γ στο χώρο, θα χρειαστεί να αλλάξει χρήση μόλις το 1,83% της συνολικής έκτασης.

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το συγκεκριμένο παράδειγμα του ενεργειακού κήπου όπως αυτό μελετήθηκε για μια περιοχή της Κρήτης, θα μπορούσε να μελετηθεί και να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε περιοχή.

Η πραγματοποίηση ενός τέτοιου πρωτοπόρου σχεδίου, όπως είναι φυσικό έχει τις θετικές και τις αρνητικές του πτυχές. Στον Πίνακα 5 συνομίζονται τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του ενεργειακού κήπου.

Πίνακας 5: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του ενεργειακού κήπου.	
πλεονεκτήματα	μειονεκτήματα
Μεγάλη ευκολία στη σχεδίαση ενός μεγάλου αιολικού πάρκου σε απλές σειρές (5-6), με εγκατεστημένη ισχύ 150 MW.	Αλλαγές στη χρήση γης, αν και σε ποσοστά μικρότερα του 2% της απαιτούμενης έκτασης, με το κόψιμο δένδρων στις πλατείες που χρειάζεται για την ανέγερση των μηχανών και για τους δρόμους πρόσβασης.
Ευκολία στη χάραξη οδών προσπέλασης, χρήση υφιστάμενων δρόμων, βελτίωση υπαρχουσών οδεύσεων.	Πολλές ιδιοκτησίες που χρειάζονται να χρησιμοποιηθούν είτε για τις πλατείες είτε για πρόσβαση στις μηχανές.
Ευκολία κατασκευής έργων υποδομής (τοποθέτηση υπογείων καλωδίων, κατασκευή νέων γραμμών).	Ευρύτερη κοινωνική συναίνεση.
Καλό αιολικό δυναμικό με συντελεστή εκμετάλλευσης μεγαλύτερο από 20%.	
Εκτός ΖΕΠ, Natura, Ramsar, ευκολότερη περιβαλλοντική αδειοδότηση.	

Οι μελλοντικές ανάγκες της χώρας σε συνδυασμό με την προστασία του περιβάλλοντος και τους στόχους για την Κλιματική Αλλαγή, καθιστούν την επιλογή λύσεων όπως αυτή του ενεργειακού κήπου τεχνικά εφικτή, αποδοτική και με πολλαπλά οφέλη για τις τοπικές κοινωνίες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΛΑΓΗΕ: <http://www.lagie.gr/perissoteres-anakoinoseis/>
- [2] ΔΕΔΔΗΕ: <http://www.deddie.gr/el/miniaia-deltia-ape-kai-thermikis-paragwgis-sta-mi-diasundedemena-nisia>
- [3] Windsim: <https://www.windsim.com/>
- [4] ΚΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ: <http://gis.ktimanet.gr/wms/ktbasemap/default.aspx>

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΟΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΝΑ ΕΤΟΣ ΓΙΑ ΔΙΑΡΚΕΙΑ 14 ΕΤΩΝ

Κ. Χ. Γκαράκης^{1*}, Κ. Λουκίδης², Ν. Τσαγκρίδης²

^{1*}Ενεργειακός Μηχανικός, MSc – Εμπειρογνώμων ΕΣΥΔ

Γ. Κοτζιά 23 - Τ.Κ. 15126 Μαρούσι, email : kgarakis@otenet.gr

²ΕΝ.ΤΕ.ΚΑ Α.Ε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το πρόβλημα της διαφοροποίησης της πραγματικής ενεργειακής παραγωγής ενός αιολικού πάρκου (Α/Π) από την εκτιμώμενη ενεργειακή παραγωγή σύμφωνα με την οποία κατασκευάστηκε (και ουσιαστικά χρηματοδοτήθηκε από τον τραπεζικό τομέα ή/και επιδοτήθηκε από την Πολιτεία) είναι ένα θέμα που τα τελευταία χρόνια, με την ραγδαία ανάπτυξη αιολικών παγκοσμίως, απασχολεί την ερευνητική κοινότητα.

Τα τελευταία χρόνια λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας παγκοσμίως, οι απαιτήσεις των Τραπεζικών Ιδρυμάτων έχουν αυξηθεί, με αποτέλεσμα να δίδεται ιδιαίτερο βάρος στην ακριβή και αξιόπιστη εκτίμηση του αιολικού δυναμικού και κατ' επέκταση της ενεργειακής παραγωγής καθώς και την εξαγωγή της αβεβαιότητας της εκτίμησης αυτής. Τα ερωτήματα που απασχολούν την αγορά της αιολικής ενέργειας παγκοσμίως είναι αν η ενεργειακή παραγωγή του αιολικού πάρκου είναι εντός των προσδοκιών και αν οι κοινά αποδεκτές μεθοδολογίες και πρακτικές συμβάλλουν στην αξιόπιστη εκτίμηση της ενεργειακής παραγωγής ενός αιολικού πάρκου κατά την διάρκεια λειτουργίας του.

Η παρούσα εργασία αναλύει την μεθοδολογία για την εκπόνηση μιας πλήρους ενεργειακής μελέτης και εκτίμησης αιολικού δυναμικού με την χρήση των state-of-the-art υπολογιστικών εργαλείων που είναι διαθέσιμα σήμερα (DTU Wind WAsP & EMD WindPro) και μεσοκλιματικών μακροχρόνιων δεδομένων υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης.

Η μελέτη αφορά ένα Α/Π ισχύος 1,5 MW στην Ν. Εύβοια αποτελούμενο από δύο (2) ανεμογεννήτριες με χρήση μετρήσεων αιολικού δυναμικού εντός του γηπέδου εγκατάστασης. Επιπλέον, γίνεται σύγκριση των εκτιμήσεων της ενεργειακής παραγωγής με τις αντίστοιχες ενεργειακές παραγωγές κατά την λειτουργία του αιολικού πάρκου για τα έτη 2000-2013 θέτοντας κατάλληλους συντελεστές διόρθωσης έτσι ώστε η σύγκριση να είναι ακριβής και αξιόπιστη. Σκοπός είναι να εξαχθούν συγκεκριμένα συμπεράσματα για την διαφοροποίηση των ενεργειακών αποτελεσμάτων και τις αιτίες αυτής.

Η σύγκριση της εκτιμώμενης ενεργειακής παραγωγής με την πραγματική από ένα εν λειτουργία Α/Π στην Ελλάδα σε σύνθετο ανάγλυφο, με διάρκεια λειτουργίας 14 ετών, προσφέρει χρήσιμα συμπεράσματα που θα βοηθήσουν στην περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας των υπολογισμών, ενώ θα εντοπισθούν κρίσιμοι παράγοντες που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό αλλά και κατά την λειτουργία του Α/Π.

Λέξεις Κλειδιά: ενεργειακή παραγωγή, σύγκριση, αιολικό δυναμικό.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα αιολικά πάρκα (Α/Π) αντίθετα με της συμβατικές πηγές ενέργειας, των οποίων η ενεργειακή παραγωγή εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το εισερχόμενο καύσιμο του οποίου η παροχή είναι συνεχής, εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από το αιολικό δυναμικό της περιοχής όπου πρόκειται να εγκατασταθούν, το οποίο διαφοροποιείται σημαντικά από περιοχή σε περιοχή. Η παραγωγή κάθε ανεμογεννήτριας (α/γ) επηρεάζεται από το ανάγλυφο της περιοχής καθώς και από την παρουσία των υπολοίπων α/γ (εφόσον αναφερόμαστε σε Α/Π) ενώ εξίσου σημαντική είναι και η διαχρονική μεταβολή του αιολικού δυναμικού. Είναι επομένως εξαιρετικής σπουδαιότητας η ακριβής εκτίμηση της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής για το σύνολο της διάρκειας ζωής του έργου καθώς και των παραμέτρων που πιθανά να την επηρεάσουν.

Για τον σκοπό αυτό έχουν δημιουργηθεί από διεθνείς οίκους διάφορα λογισμικά πακέτα επίλυσης του πεδίου ροής του ανέμου, υπολογισμού της ενεργειακής παραγωγής αιολικών πάρκων αλλά και της βελτιστοποίησης της (πχ DTU Wind WAsP, EMD WindPro, Resoft Windfarm κα).

Η σύγκριση της εκτιμώμενης ενεργειακής παραγωγής με την πραγματική από ένα εν λειτουργία Α/Π προσφέρει χρήσιμα συμπεράσματα που θα βοηθήσουν στην περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας των υπολογισμών, ενώ θα εντοπισθούν κρίσιμοι παράγοντες που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον υπολογισμό αλλά και κατά την λειτουργία του Α/Π.

2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Το πρόβλημα της διαφοροποίησης της πραγματικής ενεργειακής παραγωγής ενός Α/Π από την εκτιμώμενη ενεργειακή παραγωγή σύμφωνα με την οποία κατασκευάστηκε (και ουσιαστικά χρηματοδοτήθηκε από τον τραπεζικό τομέα ή/και επιδοτήθηκε από την Πολιτεία) είναι ένα θέμα που τα τελευταία χρόνια, με την ραγδαία ανάπτυξη αιολικών παγκοσμίως, απασχολεί την ερευνητική κοινότητα.

Τα ερωτήματα που απασχολούν την αγορά της αιολικής ενέργειας παγκοσμίως είναι :

- Η ενεργειακή παραγωγή του αιολικού πάρκου (P50) είναι εντός των προσδοκιών, υπάρχει υπο-εκτίμηση ή υπερ-εκτίμηση;
- Οι χρησιμοποιούμενες αβεβαιότητες του υπολογισμού ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα; Μήπως είναι πολύ αισιόδοξες ή αντίθετα πολύ συντηρητικές;
- Υπάρχουν παγκόσμια κοινά αποδεκτές μεθοδολογίες και πρακτικές που να συμβάλλουν στην αξιόπιστη μελέτη της ενεργειακής παραγωγής ενός αιολικού πάρκου;

Ενδεικτικά αναφέρονται δύο δημοσιεύσεις από το Γερμανικό Ινστιτούτο Αιολικής Ενέργειας (DEWI) στην Γερμανική έκθεση - συνέδριο αιολικής ενέργειας (DEWEK) το 2008 και 2012 με θέματα : “Review and analysis of wind farm operational data. Validation of the predicted energy yield of the wind farms based on real energy production”, από τους Spengermann et al.[1] και “Review of the real energy production data of the operating wind farms in comparison to former predicted energy yields” από τους Schorer et al. [2].

Τέλος, στο φετινό Συνέδριο και Έκθεση της Ευρωπαϊκής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας (EWEA 2014) που πραγματοποιήθηκε τον Μάρτιο στην Βαρκελώνη, παρουσιάστηκε δημοσίευση σε μορφή poster με θέμα : “Evaluation of pre/post construction energy of a windfarm in complex conditions with different measurement strategies” [3].

3. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία αναλύει την μεθοδολογία για την εκπόνηση μιας πλήρους ενεργειακής μελέτης και εκτίμησης αιολικού δυναμικού με την χρήση των state-of-the-art υπολογιστικών εργαλείων που είναι διαθέσιμα σήμερα (DTU Wind WAsP & EMD WindPro) και μεσοκλιματικών μακροχρόνιων δεδομένων υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης EMD

ConWx [4].

Η μελέτη πραγματοποιείται για ένα Α/Π ισχύος 1,5 MW στην Ν. Εύβοια αποτελούμενο από δύο (2) α/γ με χρήση μετρήσεων αιολικού δυναμικού εντός του γηπέδου εγκατάστασης.

Επιπλέον, γίνεται σύγκριση των εκτιμήσεων της ενεργειακής παραγωγής με τις αντίστοιχες ενεργειακές παραγωγές των ετών 2000-2013 θέτοντας κατάλληλους συντελεστές διόρθωσης έτσι ώστε η σύγκριση να είναι ακριβής και αξιόπιστη. Σκοπός είναι να εξαχθούν συγκεκριμένα συμπεράσματα για την διαφοροποίηση των ενεργειακών αποτελεσμάτων και τις αιτίες αυτής.

4. ΤΟ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ

Το υπό μελέτη αιολικό πάρκο βρίσκεται στην θέση «Λιάζαρι», Δ. Καρύστου στη νήσο Εύβοια και αποτελείται από δύο (2) α/γ τύπου NM750/44 της εταιρίας NEGΜicon (πλέον Vestas) με ονομαστική ισχύ 750 kW η καθεμία και ύψος πλήμνης 44m. Η περιοχή ενδιαφέροντος χαρακτηρίζεται από έντονο ανάγλυφο με υψόμετρα από 300 έως 400m. Το Α/Π βρίσκεται σε λειτουργία από το 1999.

Στις εικόνες 1-3 παρουσιάζεται η θέση του Α/Π με τη χρήση χαρτών Google Maps και Anavasis Toponavigator



Εικόνες 1,2,3 : 1.Θέση Α/Π σε χάρτη Google Maps. 2. Θέση Α/Π σε χάρτη Anavasis Toponavigator. 3. Οι θέσεις των δύο α/γ και η θέση του ιστού αναφοράς ύψους 20m.

Οι θέσεις των α/γ παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1 : Συντεταγμένες α/γ του υπό μελέτη Α/Π.

Α/Α	ΕΓΣΑ'87	
	X	Y
ΚΕΝΤΡΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ		
1	521.584	4.228.440
2	521.640	4.228.324

Η απόσταση τους είναι ίση με 129m (2,9 διάμετροι ρότορα των α/γ – 44m). Το μέσο υψόμετρο των α/γ είναι 322m asl (above sea level – από την επιφάνεια της θάλασσας).

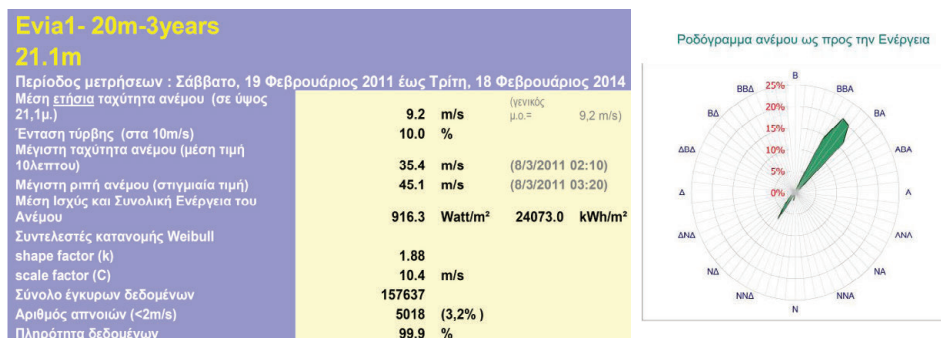


Εικόνα 4 : Φωτογραφία του υπό μελέτη Α/Π και του ανεμολογικού ιστού.

5. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Ο ανεμολογικός ιστός αναφοράς έχει ύψος 20m και φέρει ανεμόμετρα και ανεμοδείκτες σε δύο ύψη μέτρησης στα 10,4m και 21,1m agl (above ground level – από την επιφάνεια του εδάφους) . Οι συντεταγμένες εγκατάστασης του είναι 521.624, 4.228.352 σε υψόμετρο 322m asl, 33m ΒΔ της α/γ 2. Η περίοδος μετρήσεων που χρησιμοποιήθηκε είναι η τριετία 19/2/2011 – 18/2/2014.

Σύμφωνα με τις πραγματοποιηθείσες μετρήσεις και μετά από ανάλυση τους με το πρόγραμμα ανάλυσης ανεμολογικών δεδομένων ΚΑΠΕ WindRose [5], η μέση ταχύτητα του ανέμου για την συνολική αυτή περίοδο σε ύψος 21,1m (απόσταση οργάνων από το έδαφος) είναι 9,2 m/s, ενώ η πληρότητα των μετρήσεων είναι 99,9%. Τα ίδια αποτελέσματα έχουμε και στο ύψος των 10,4m. Οπότε ο μέσος συντελεστής κάθετης διάτμησης από το επίπεδο των 10,4m σε αυτό των 21,1 m είναι μηδενικός ($\alpha=0$). Οι κύριες διευθύνσεις του ανέμου είναι ΒΑ και ΒΒΑ (χρονικά και ενεργειακά).



Εικόνα 5 : Αποτελέσματα μετρήσεων Ζετίας και ροδόγραμμα ανέμου (ενεργειακό).

6. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Ο υπολογισμός του πεδίου ροής στην περιοχή του γηπέδου εγκατάστασης πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το αριθμητικό μοντέλο επίλυσης φασματικών εξισώσεων του οριακού στρώματος WAsP 11.0 (Wake Model N.O.Jensen) μέσω του υπολογιστικού εργαλείου ανάλυσης, σχεδίασης και βελτιστοποίησης Α/Π EMD WindPro Park

έκδοση 2.9 [6], που έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία EMD International A/S. Το WAsP είναι ο παλαιότερος κώδικας αυτού του είδους και γενικά αναγνωρίζεται ως ένα αξιόπιστο και καλά ενημερωμένο εργαλείο. Παρόλα αυτά δεν παύει να αποτελεί μία προσέγγιση της πραγματικότητας με συγκεκριμένους περιορισμούς.

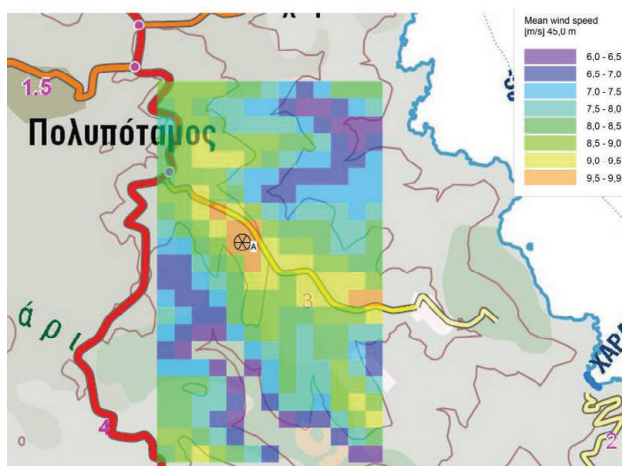
Παράλληλα χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό εργαλείο ανάλυσης, σχεδίασης και βελτιστοποίησης A/Π EMD WindPro. Το λογισμικό έχει ενσωματωμένα μοντέλα συσχέτισης ταχυτήτων, επίλυσης του πεδίου ροής, προσομοίωσης του ομόρου και αλγορίθμων βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης.

Το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και τραχύτητας συνδυάστηκε με τα στοιχεία του μετεωρολογικού ιστού σε ύψος 21,1m διάρκειας τριών ετών, ώστε να προκύψει το διάγραμμα ισοταχών καμπύλων ανέμου της ευρύτερης περιοχής για ύψος 45m agl, ίσο με το ύψος της πλήμνης.

Η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου καθ' ύψος θεωρήθηκε μηδενική, από το ύψος μέτρησης του ιστού (21,1m) στο ύψος πλήμνης (45m) δεδομένου ότι ο μέσος συντελεστής διάτμησης α είναι μηδενικός, όπως αυτό προκύπτει από τις μετρήσεις στα 10,4m και στα 21,1m, λόγω της μεγάλης ταχύτητας του ανέμου και της έντονης μηχανικής ανάδευσης που αυτή εξασφαλίζει.

Η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος πλήμνης στις θέσεις των ανεμογεννητριών υπολογίσθηκε σε 9,2 και 9,3 m/s αντίστοιχα.

Παρακάτω, παρατίθεται ο χάρτης αιολικού δυναμικού της θέσης εγκατάστασης σε ύψος 45m agl όπως αυτός υπολογίστηκε συνδυαστικά με τα λογισμικά πακέτα WAsP – WindPro (πλέγμα επίλυσης 50m).



Εικόνα 6: Χάρτης αιολικού δυναμικού της θέσης εγκατάστασης (45m ύψος).

7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η Ετήσια Παραγόμενη Ενέργεια (ΕΠΕ) υπολογίσθηκε με την εφαρμογή της καμπύλης ισχύος της χρησιμοποιούμενης α/γ στην κατανομή της ταχύτητας ανέμου που εκτιμήθηκε προηγουμένως σε κάθε θέση που έχει εγκατασταθεί α/γ δεδομένου ότι η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου μεταβάλλεται από θέση σε θέση λόγω της σύνθετης τοπογραφίας του εδάφους. Για την περιγραφή της κατανομής πιθανότητας εμφάνισης ταχύτητας ανέμου έχει χρησιμοποιηθεί η μετρημένη κατανομή ταχύτητας και διεύθυνσης, όπως μετασχηματίζεται μέσω του λογισμικού WAsP. Ο υπολογισμός της ετήσιας παραγωγής ενέργειας μιας α/γ γίνεται με την χρήση της ακόλουθης σχέσης:

$$ΕΠΕ = N_h \sum_{j=1}^{16} \sum_{i=1}^N \left((F_j(V_i) - F_j(V_{i-1})) \frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right) \quad (1.1)$$

όπου $F_j(V < V_i)$ η συνάρτηση κατανομής αθροιστικής πιθανότητας εμφάνισης ταχύτητας ανέμου $V < V_i$ στο j -τομέα διεύθυνσης, P_i η αποδιδόμενη ισχύς της επιλεγμένης α/γ στο υποδιάστημα ταχύτητας $V_{i-1} \dots V_i$ και $N_h = 8760$ ώρες. Η ταχύτητα του ανέμου είναι ανηγμένη στο ύψος της πλήμνης, ενώ η ισχύς ανάγεται στην εκτιμώμενη πυκνότητα αέρα στη θέση του Α/Π.

Στο στάδιο της εκτίμησης της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας του εξεταζόμενου Α/Π, συνδυάστηκαν τα αποτελέσματα της αναπαράστασης του πεδίου ροής και τα δεδομένα των καμπυλών ισχύος και ώσης των Α/Γ με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ομόρρου για να εξαχθεί τελικά η συνολική παραγωγή του Α/Π ως το ολοκλήρωμα της ενέργειας στους δεκαέξι (16) προκαθορισμένους τομείς διεύθυνσης. Για να ενισχυθεί η ασφάλεια των εκτιμήσεων χρησιμοποιήθηκαν διακριτές ανηγμένες ετήσιες κατανομές ταχυτήτων στο ύψος του άξονα των Α/Γ για τις δύο (2) θέσεις, με βάση την ανάλυση των ανεμολογικών δεδομένων και τις προλέξεις του πεδίου ροής. Οι υπολογισμοί εκτελέστηκαν επαναληπτικά με σημείο αναφοράς τη θέση κάθε α/γ και η τελική εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης του αιολικού πάρκου προέκυψε από το σταθμισμένο άθροισμα των επιμέρους υπολογισμών.

Το WAsP εκτελεί ενεργειακούς υπολογισμούς με βάση τις τομεακές κατανομές Weibull οι οποίες είναι λιγότερο ακριβείς από τη μετρημένη κατανομή ταχύτητας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το EMD WindPro που αξιοποιεί τα αποτελέσματα του WAsP για να υπολογίσει τις τοπογραφικές επιδράσεις ανά τομέα διεύθυνσης και υποδιάστημα ταχύτητας σε κάθε θέση α/γ . Οι τοπογραφικές επιδράσεις εφαρμόζονται επί της μετρημένης κατανομής ταχυτήτων στον εκάστοτε χρησιμοποιούμενο σταθμό αναφοράς ώστε να αναπροσαρμοστεί η μέση ταχύτητα στις θέσεις των α/γ .

Χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη ισχύος της α/γ όπως αυτή δίνεται από τον κατασκευαστή για πυκνότητα $1,225 \text{ kg/m}^3$ διορθωμένη μέσω του λογισμικού EMD WindPro ώστε να αντιστοιχεί στη μέση ετήσια πυκνότητα του αέρα στην περιοχή του αιολικού πάρκου και συγκεκριμένα ξεχωριστά για την θέση κάθε α/γ . Ως σταθμός αναφοράς χρησιμοποιήθηκαν η μέση ετήσια θερμοκρασία της περιόδου 1994-2013 από τον κοντινότερο κόμβο δεδομένων EMD ConWx (βάση μεσοκλιματικών δεδομένων) που βρίσκεται σε απόσταση 1,1 χλμ (ανατολικά) από την θέση του ιστού αναφοράς.

Το τοπογραφικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του πεδίου περιλάμβανε μια έκταση 60 x 60 km με χρήση ψηφιακού μοντέλου εδάφους ανάλυσης 10 μέτρων. Επίσης χρησιμοποιήθηκε υπόβαθρο τραχύτητας ιδίων διαστάσεων που στηρίζεται στο πρόγραμμα Corine Land Cover 2000. Κτίρια, σειρές δέντρων, φράκτες και άλλα α/γ με ύψος μεγαλύτερο από το ένα τέταρτο του ύψους πλήμνης της α/γ σε ακτίνα 1000μ γύρω από αυτή μπορεί να θεωρηθούν ως εμπόδιο στη ροή του αέρα. Στην περιοχή μελέτης δεν υπάρχουν τέτοιου είδους εμπόδια.

Για τον υπολογισμό των απωλειών ενέργειας που οφείλονται στην αλληλεπίδραση της λειτουργίας των α/γ (αλληλεπίδραση ομόρρου), χρησιμοποιήθηκαν συνδυαστικά τα υπολογιστικά εργαλεία DTU Wind WAsP και EMD WindPro, θεωρώντας αξονοσυμμετρική δομή του ομόρρου (axisymmetric wake), υπέρθεση πολλαπλού ομόρρου με εξισορρόπηση ενέργειας (energy balance) και το μοντέλο N.O.Jensen για τον υπολογισμό των απωλειών λόγω σκίασης.

Πραγματοποιήθηκε επαλήθευση της καθ' ύψος μεταβολής του αιολικού δυναμικού λαμβάνοντας ως δεδομένο τις μετρήσεις σε ένα ύψος μέτρησης του μετεωρολογικού ιστού και μέσω της χρήση του υπολογιστικού εργαλείου WAsP γίνεται η εκτίμηση της μέσης ταχύτητας στο άλλο ύψος μέτρησης, ενώ στην συνέχεια συγκρίνονται τα αποτελέσματα της εκτίμησης με τις πραγματικές μετρήσεις. Επιπλέον, όσο αναφορά τον έλεγχο της χωρικής κατανομής, χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής RIX. Η μικρή τιμή του ΔRIX (-0,1%) μικρότερη

από το 5% συνηγορεί στην εκτίμηση ότι η εφαρμογή εντάσσεται στα όρια αποδεκτής λειτουργίας του WAsP, τα αποτελέσματα κρίνονται αξιόπιστα και δεν αναμένονται σημαντικές αποκλίσεις για τις ανεμογεννήτριες. Από τους δύο παραπάνω ελέγχους της μοντελοποίησης που πραγματοποιήθηκε καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η αναπαραγωγή της μετρούμενης μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου από το WAsP μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι σε ασφαλή κατεύθυνση (συντηρητική). Συμπερασματικά, γίνεται η υπόθεση ότι η επιτυχής εκτίμηση της μεταβολής της ταχύτητας στα επιφανειακά στρώματα των 10,4m και 21,2m αντικατοπτρίζει με επιτυχία στην αναγωγή μέχρι το ύψος της πλήμνης των 45m.

Το ετήσιο αιολικό δυναμικό μεταβάλλεται χρονικά λόγω της φυσικής και της κλιματικής μεταβλητότητας. Οι ενεργειακοί υπολογισμοί αφορούν την 36μηνη περίοδο των μετρήσεων στον 20m ιστό αναφοράς. Για την αναγωγή σε μακροχρόνια βάση έγινε χρήση των μεσοκλιματικών ωριαίων δεδομένων EMD ConWx σε ύψος 25m (κοινοτόμος κόμβος σε απόσταση 1,1χλμ Α, περίοδος δεδομένων 1994-2013). Η πληροφορία αυτή οδηγεί στη διαμόρφωση ενός ανεμολογικού δείκτη (wind index). Ο δείκτης χρησιμοποιείται για την αναγωγή των ενεργειακών ή ανεμολογικών υπολογισμών μίας μικρής χρονικής περιόδου σε μία προκαθορισμένη περίοδο αναφοράς. Ελέγχθηκε η συσχέτιση της χρονοσειράς του σταθμού αναφοράς (21,1m) – (με τα μεσοκλιματικά στοιχεία EMDConWx που αναφέρονται στα 25m ύψος από την επιφάνεια του εδάφους και βρέθηκε εξαιρετική ($R=0,94$) - μηνιαίες τιμές ταχύτητας ανέμου (μέθοδος Wind Index MCP). Αξιολογώντας τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της ανεμολογικής συσχέτισης και λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες του αιολικού δυναμικού του 36μήνου που αποτυπώνονται με σαφώς διαφορετικό τρόπο στο γεωστροφικό άνεμο (μεσοκλιματικά δεδομένα) και τις επιφανειακές μετρήσεις, συμπεραίνεται ότι η περίοδος των 3 ετών στον σταθμό αναφοράς χαρακτηρίζεται από υπερεκτίμηση της αναμενόμενης ενεργειακής παραγωγής κατά 8%. Οπότε κρίθηκε σκόπιμη η χρήση διορθωτικού συντελεστή μακροχρόνιας κατάστασης (0,92) στην εκτιμώμενη ενεργειακή παραγωγή.

8.ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Οι απώλειες ομόρου του Α/Π υπολογίστηκαν σε 0,51%, εξαιρετικά χαμηλές λόγω της χωροθέτησης των α/γ (ικανής απόστασης 2,9 διαμέτρων ρότορα) και του προσανατολισμού της κορυφογραμμής σχεδόν κάθετα στην κύρια διεύθυνση του ανέμου.

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι πρόσθετες απώλειες που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή της τελικής μακροχρόνιας διορθωμένης ενεργειακής παραγωγής.

Πίνακας 2 : Πρόσθετες ενεργειακές απώλειες αιολικού πάρκου.

A/A	Περιγραφή	Συντελεστής απωλειών (%)
1	Διαθεσιμότητα ανεμογεννητριών	3,0
2	Απώλειες μεταφοράς-διασύνδεσης	0,5
3	Υστέρηση λόγω υψηλών ταχυτήτων	0,9
4	Διαθεσιμότητα ηλ. σύνδεσης	2,0
5	Αδυναμία πρόσβασης	0,0
6	Παράγοντες επίδρασης καμπύλης ισχύος (πυκνότητα, επικαθίσεις, αλατότητα κτλ)	3,0
Συνολικές απώλειες		9,1

Πίνακας 3 : Ετήσια καθαρή παραγόμενη ενέργεια αιολικού πάρκου.

Εκτίμηση Ετήσιας Αποδιδόμενης Ενέργειας, μακροχρόνια διορθωμένης αφαιρώντας συνολικές απώλειες 9,1%	
Ενέργεια :	4.779,9 MWh
Συντελεστής εκμετάλλευσης :	36,4 %
Ισοδύναμες ώρες λειτουργίας :	3.187

Επίσης, πραγματοποιήθηκε ανάλυση αβεβαιότητας ενεργειακών υπολογισμών μέσω του λογισμικού WindPro για τη χρονική περίοδο 20ετίας. Η συνολική αβεβαιότητα της εκτιμώμενης ενεργειακής παραγωγής είναι ίση με 7,8%.

Οπότε εξάγονται ότι η ετήσια ενεργειακή παραγωγή με επίπεδο αβεβαιότητας 50% ισούται με την εκτιμώμενη, όπως αυτή υπολογίστηκε ανωτέρω, δηλαδή $P50=4.780\text{MWh}$, ενώ $P75=4.529\text{MWh}$ και $P90=4.304\text{MWh}$.

Οι δύο τελευταίοι υπολογισμοί (πιθανότητα εμπιστοσύνης 75 και 90%) είναι και αυτοί που συνήθως λαμβάνονται υπ' όψη από τα χρηματοπιστωτικά ιδρύματα για την αξιολόγηση των αιολικών πάρκων [7].

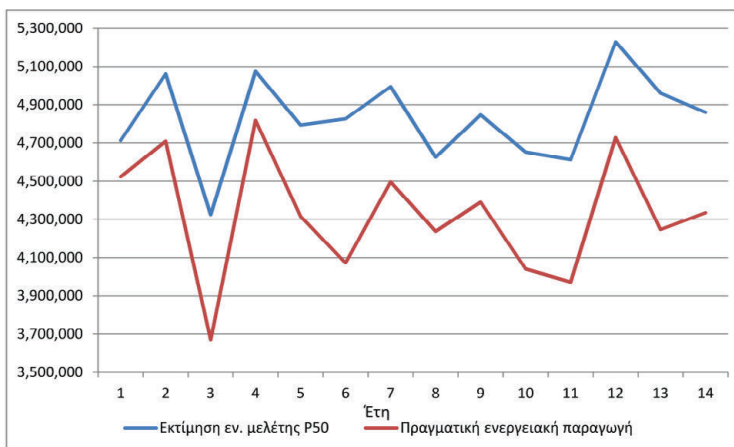
9. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Το αποτέλεσμα της εκτίμησης της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής που προέκυψε από υπολογισμούς αφορά την μέση ετήσια παραγωγή του αιολικού πάρκου για τα έτη 1994-2013, οι δε συντελεστές απωλειών ελήφθησαν σταθεροί για όλα τα έτη με βάση εμπειρικές εκτιμήσεις.

Δεδομένου όμως, ότι σύγκριση των αποτελεσμάτων της εκτίμησης έχει γίνει με την πραγματική παραγωγή του αιολικού πάρκου για τα έτη 2000 – 2013 έχει ληφθεί υπόψη η διαφοροποίηση των πραγματικών συντελεστών πρόσθετων απωλειών των προς σύγκριση ετών (2000–2013) σε σχέση με τους συντελεστές που επελέγησαν εμπειρικά κατά την εκτίμηση της ενεργειακής παραγωγής για την περίοδο αναφοράς (1994-2013) και έχει γίνει η κατάλληλη διόρθωση έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν ίδιοι συντελεστές.

Αφετέρου έχει ληφθεί υπόψη η διακύμανση της μέσης ετήσιας ταχύτητας των προς σύγκριση ετών (2000–2013) σε σχέση την περίοδο αναφοράς (1994-2013) και έχει πραγματοποιηθεί η ανάλογη διόρθωση της εκτιμώμενης παραγωγής κατ' έτος. Η διόρθωση αυτή βασίστηκε στην ετήσια τιμή της ταχύτητας ανέμου των ετών 2000-2013 σε σχέση με την μακροχρόνια τιμή της ταχύτητας της 20ετίας 1994-2013 (7,14m/s), των μεσοκλιματικών δεδομένων EMD ConWx σε ύψος 50m agl (κοντινότερος κόμβος).

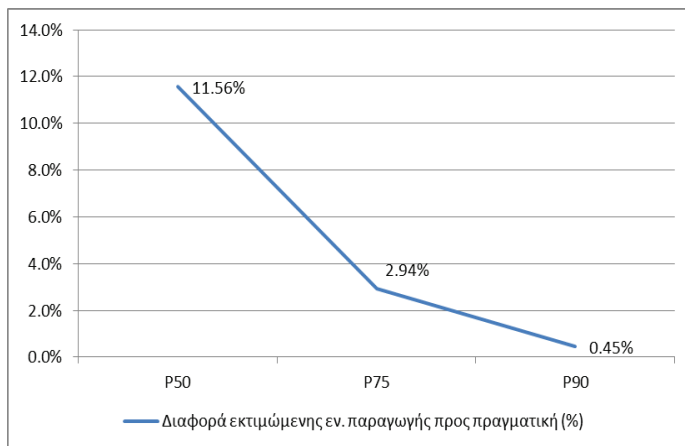
Στην εικόνα 7 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά η εκτιμώμενη ενεργειακή παραγωγή (kWh) στα επίπεδα αβεβαιότητας P50 και η πραγματική ενεργειακή παραγωγή.



Εικόνα 7 : Η εκτιμώμενη ενεργειακή παραγωγή και η πραγματική ενεργειακή παραγωγή - (kWh).

Στην εικόνα 8 παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ της εκτιμώμενης ενεργειακής παραγωγής (kWh) στα επίπεδα αβεβαιότητας P50, P75 & P90 και της πραγματικής

ενεργειακής παραγωγής συγκεντρωτικά για την χρονική περίοδο της 14ετίας (2000-2013).



Εικόνα 8 : Η ποσοστιαία διαφορά μεταξύ της εκτιμώμενης ενεργειακής παραγωγής (kWh) στα επίπεδα αβεβαιότητας P50, P75 & P90 και της πραγματικής ενεργειακής παραγωγής και συγκεντρωτικά για την χρονική περίοδο της 14ετίας (2000-2013).

10. ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι συντελεστές απωλειών λόγω διαθεσιμότητας των ανεμογεννητριών και του δικτύου, οι απώλειες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και απώλειες από αδυναμία πρόσβασης είναι συντελεστές οι οποίοι γενικά μπορούν αν υπολογισθούν επακριβώς ή να προσεγγισθούν με αρκετά καλή ακρίβεια κατά την λειτουργία του εκάστοτε Α/Γ.

Η μεθοδολογία καθώς και τα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της ενεργειακής παραγωγής προσεγγίζουν ικανοποιητικά την πραγματικότητα.

Το αποτέλεσμα του αρχικού υπολογισμού της ενεργειακής παραγωγής (P50) (το οποίο δεν επηρεάζεται από τους συντελεστές αβεβαιότητας που έχουν χρησιμοποιηθεί) φαίνεται να υπερεκτιμά την ενεργειακή παραγωγή της περιόδου 1999-2013 κατά 11,6%. Η υπερεκτίμηση αυτή μειώνεται σε 2,9% όταν χρησιμοποιηθεί το P75 και σε 0,5% όταν γίνει χρήση του P90. Η χρησιμοποίηση των συντελεστών αβεβαιότητας μέσω τις κανονικής κατανομής δείχνει να βελτιώνει αρκετά τη διαφοροποίηση μεταξύ της εκτιμώμενης και πραγματικής ενεργειακής παραγωγής.

Από τα αποτελέσματα αυτά γίνεται σαφές ότι θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στην ακριβέστερη εκτίμηση των παραγόντων μείωσης της ενεργειακής παραγωγής αλλά και των συντελεστών αβεβαιότητας, έτσι ώστε τα αποτελέσματα σε διάφορα επίπεδα αβεβαιότητας να είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στην πραγματικότητα.

Θα πρέπει να τονιστεί η δυσκολία υπολογισμού των παραγόντων που επηρεάζουν την καμπύλη ισχύος (πχ αλατότητα ή επικαθίσεις) αλλά και η φθορά των πτερυγίων στην διάρκεια λειτουργίας με αποτέλεσμα την διαφοροποίηση της καμπύλης ισχύος. Το ίδιο ισχύει και για τον υπολογισμό της υστέρησης λόγω υψηλών ταχυτήτων η οποία διαφέρει από έτος σε έτος και δεν είναι δυνατό να προσδιορισθεί μόνο με την μελέτη της διαχρονικής μεταβολής του ανέμου.

Επιπλέον, ιδιαίτερη βάση θα πρέπει να δοθεί στην μείωση των παραγόντων αβεβαιότητας καθώς η εισαγωγή μεγαλύτερης αβεβαιότητας (πιο συντηρητικών παραδοχών) θα μπορούσε να οδηγήσει σε πολύ εσφαλμένα αποτελέσματα και πιθανά σε σοβαρή υποεκτίμηση της ενεργειακής παραγωγής.

Η μείωση αυτή μπορεί να προκύψει:

- Με την χρήση μετρήσεων όσο το δυνατόν πιο κοντά στο ύψος πλήμνης της α/γ (τουλάχιστον στα 2/3 ή μεγαλύτερο του 75% του ύψους πλήμνης), για την μείωση του ποσοστού αβεβαιότητας λόγω μέτρησης. Η καλύτερη γνώση της καθ' ύψους μεταβολής του αιολικού δυναμικού και της μελέτης του συντελεστή κάθετης διάτμησης, μπορεί να προκύψει μόνο από την μέτρηση όσο το δυνατόν πιο κοντά το ύψος πλήμνης και σε διαφορετικά επίπεδα ύψους.
- Με την μέτρηση του αιολικού δυναμικού για μεγαλύτερη χρονική περίοδο (πχ πέντε-έξι έτη μετρήσεων).
- Με την χρήση κατάλληλης κλιματικής βάσης δεδομένων για την μακροχρόνια διόρθωση (EMY, NCEP/NCAR, MERRA, ConWx, κα) η οποία να παρουσιάζει καλή συσχέτιση με τις επιτόπιες μετρήσεις.
- Με την χρήση διαφορετικού μοντέλου υπολογισμού (WAsP CFD).

Ανάλογες μελέτες έχουν γίνει σε διαφορές χώρες από διεθνή Ινστιτούτα και φορείς με σκοπό να αξιολογηθούν τα μοντέλα και οι μεθοδολογίες εκτέλεσης των υπολογισμών ενεργειακής παραγωγής χωρίς όμως μέχρι σήμερα να έχουν υπάρξει οριστικά συμπεράσματα. Αυτό συμβαίνει είτε λόγω μη ικανοποιητικού δείγματος, είτε λόγω μη ύπαρξης επαρκών δεδομένων από την λειτουργία των αιολικών πάρκων, είτε λόγω διαφορετικών χαρακτηριστικών μεταξύ των εν σύγκριση αιολικών πάρκων που δεν μπορούν να ποσοτικοποιηθούν.

Γενικότερα, τα αποτελέσματα των συγκρίσεων μέχρι στιγμής δείχνουν μια γενική τάση υπερεκτίμησης (όπως και στην περίπτωση που εξετάστηκε εδώ) της εκτιμώμενης ετήσιας ενεργειακής παραγωγής P50 σε σχέση με την πραγματική, η οποία όμως υπερεκτίμηση μειώνεται αισθητά με την χρήση του P75 ή του P90 μέσα από την ακριβή εκτίμηση της αβεβαιότητας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν την εταιρεία EN.TE.KA Αιολικά Πάρκα Α.Ε για την παροχή των στοιχείων λειτουργίας του Α/Π.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Spengermann, P., 2008, "Review and analysis of wind farm operational data. Validation of the predicted energy yield of wind farms based on real energy production data", DEWEK 2008: 9. Deutsche Windenergie-Konferenz, Bremen, 27 - 28 November 2008.
- [2] Schorer T., 2012, "Review of the real energy production data of the operating wind farms in comparison to former predicted energy yields", DEWEK 2012: 11. Deutsche Windenergie-Konferenz, Bremen, 7- 8 November 2012.
- [3] Gkarakis K. et al, 2014, "Evaluation of pre/post construction energy of a windfarm in complex conditions with different measurement strategies", EWEA 2014, Barcelona, 10-13 March 2014.
- [4] Thøgersen., 2014, Online data from WindPro. Aalborg Δανία: EMD International A/S.
- [5] Φουσεκής Δ. , 2012. WindRose. Εγχειρίδιο χρήσης λογισμικού. ΚΑΠΕ.
- [6] Nielsen.,2013, EMD WindPro manual. Aalborg Δανίας: EMD International A/S.
- [7] Klug. H., 2006, "What does Exceedance Probabilities P90-P75-P50 Mean?" DEWI Magazin Nr. 28, Februar 2006.

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΤΕΧΝΙΚΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΙΚΤΥΩΝ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ & ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

Ι. Α. Κρητικός^{1*}, Κ. Χ. Γκαράκης², Κ. Λουκίδης³, Κ. Τσαγκρίδης³

^{1*} Διπλ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Ε.Μ.Π. – Υ.Δ. Ε.Μ.Π.,

Μηχανικός Έργων ΑΠΕ, ΕΛΙΚΑ Α.Ε.,

Λ. Καποδιστρίου 38-40, 15123 Μαρούσι,

email: jasonkritikos@gmail.com

² Ενεργειακός Μηχανικός, MSc

³ ΕΝ.ΤΕ.ΚΑ Α.Ε.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εστιάζεται στην τεχνικο-οικονομική διερεύνηση του βέλτιστου τρόπου διασύνδεσης αιολικού πάρκου (Α/Π) με το δίκτυο. Ειδικότερα, εξετάζονται εναλλακτικοί τρόποι διασύνδεσης Α/Π με το δίκτυο (π.χ. καλώδια με αγωγούς διαφορετικού υλικού ή διατομής) σε σχέση με το κόστος τους και τις αναμενόμενες απώλειες ενέργειας επί των διασυνδεδειγμένων γραμμών.

Για την οικονομική αξιολόγηση των εναλλακτικών σεναρίων εφαρμόστηκε ο ευρέως χρησιμοποιούμενος δείκτης αξιολόγησης επενδύσεων, της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ-NPV).

Η διερεύνηση αυτή είναι εξαιρετικά σημαντική, γιατί ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις το αρχικό κόστος επένδυσης φαίνεται αυξημένο, η τεχνικο-οικονομική ανάλυση του κύκλου ζωής του έργου καταδεικνύει πως η διασύνδεση του αιολικού πάρκου θα μπορούσε να υλοποιηθεί με οικονομικά αποδοτικότερο τρόπο. Δίδεται έτσι ένα εργαλείο στους επενδυτές ώστε να μεγιστοποιήσουν το όφελος της επένδυσής τους.

Λέξεις Κλειδιά: διασύνδεση αιολικών πάρκων, τεχνικο-οικονομική διερεύνηση, ΚΠΑ.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Την τελευταία δεκαετία πραγματοποιήθηκε στην Ελλάδα μια πρωτόγνωρη ανάπτυξη στον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και ειδικότερα στην παραγωγή ηλεκτρισμού με χρήση αιολικής και ηλιακής ενέργειας. Καθοριστικής σημασίας προς αυτήν την κατεύθυνση ήταν οι ακολουθούμενες Ευρωπαϊκές (Κοινοτικές) αλλά και εθνικές πολιτικές που κατέστησαν τις επενδύσεις στις ΑΠΕ οικονομικά ελκυστικές, με αποτέλεσμα χιλιάδες MW έργων ΑΠΕ να υλοποιηθούν στη χώρα. Όμως η πρωτοφανής οικονομική κρίση και η ύφεση που έπληξε την Ελλάδα επιβράδυνε την εγκατάσταση νέας ισχύος μονάδων ΑΠΕ.

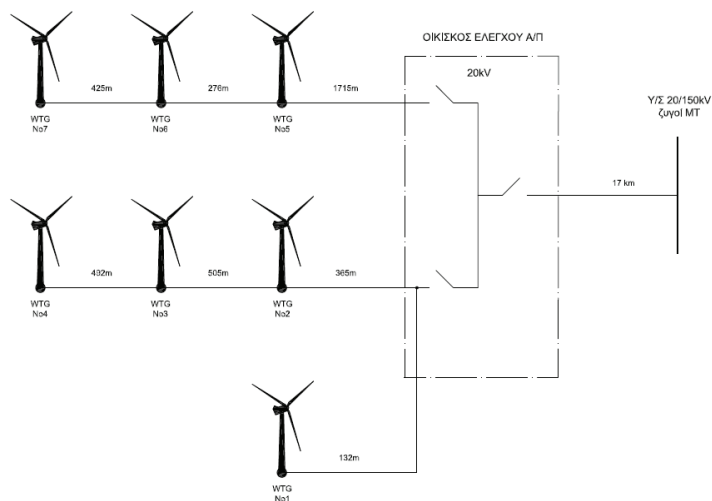
Όπως γνωστοποίησε ο Υπουργός ΠΕΚΑ, Γιάννης Μανιάτης, μιλώντας πρόσφατα σε ημερίδα της ΕΛΕΤΑΕΝ σχετικά με τους στόχους του 2030, πρόταση της Ελλάδας είναι να αυξηθεί ο στόχος για τη διείσδυση των ΑΠΕ από το 27% στο 30%. Η προοπτική αυτή σε συνδυασμό με την σταθεροποίηση του οικονομικού κλίματος και την ύπαρξη ώριμων αδειοδοτικά έργων ΑΠΕ πολλών χιλιάδων MW, σηματοδοτούν την επανεκκίνηση της εγκατάστασης νέων μονάδων ανανεώσιμης ενέργειας.

Σε αυτό το πλαίσιο, είναι χρήσιμο να διερευνηθούν μέθοδοι βελτίωσης της οικονομικής αποδοτικότητας εγκαταστάσεων ΑΠΕ στο στάδιο του προκαταρκτικού σχεδιασμού τους ώστε να καθίστανται ακόμη περισσότερο ελκυστικές για τους ενδιαφερόμενους επενδυτές.

Η παρούσα εργασία εστιάζεται στην τεχνικο-οικονομική διερεύνηση του βέλτιστου τρόπου διασύνδεσης αιολικού πάρκου (Α/Π) με το δίκτυο. Ειδικότερα, εξετάζονται εναλλακτικοί τρόποι διασύνδεσης Α/Π με το δίκτυο (π.χ. καλώδια με αγωγούς διαφορετικού υλικού ή διατομής) σε σχέση με το κόστος τους και τις αναμενόμενες απώλειες ενέργειας επί των διασυνδεδειγμένων γραμμών και συγκρίνεται η οικονομική τους αποδοτικότητα βάσει του κριτηρίου της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ), που αποτελεί ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο δείκτη αξιολόγησης επενδύσεων.

2. ΤΟ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ Α/Π

Το υπό εξέταση Α/Π αποτελείται από επτά (7) ανεμογεννήτριες (Α/Γ) τύπου Enercon E-7C [1], ονομαστικής ισχύος 2,3MW έκαστη, επομένως διαθέτει συνολική ονομαστική ισχύ 16,1MW. Το γενικό μονογραμμικό διάγραμμα του Α/Π δίνεται στο ακόλουθο σχήμα 1.



Σχήμα 1: Γενικό μονογραμμικό διάγραμμα αιολικού σταθμού.

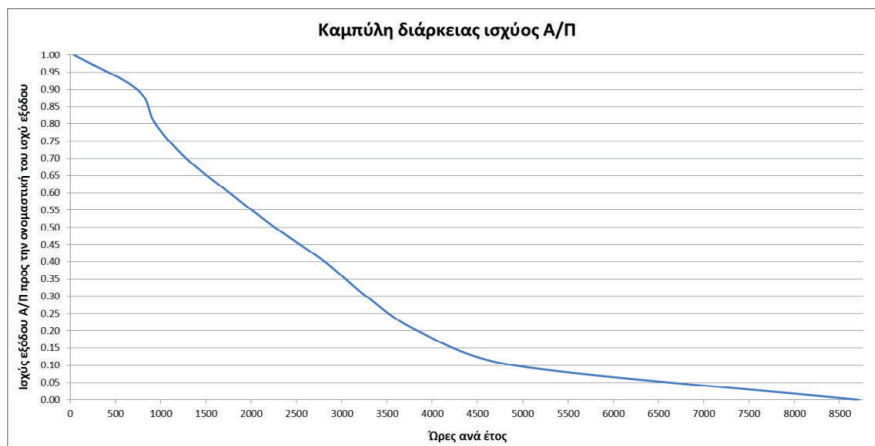
Το υπόψιν Α/Π θα συνδεθεί μέσω γραμμής μέσης τάσης (20kV) σε υποσταθμό (Υ/Σ) ανύψωσης τάσης 20/150kV. Οι αποστάσεις των Α/Γ από τον οικίσκο ελέγχου κυμαίνονται από 132μ έως 1715μ ενώ η απόσταση του οικίσκου ελέγχου από τον Υ/Σ είναι ίση με 17χλμ.

Στην παρούσα εργασία μελετώνται οι ενεργειακές απώλειες μόνον επί των δικτύων μέσης τάσης (Μ.Τ.) του Α/Π και ειδικότερα επί του διασυνδεδεμένου δικτύου Μ.Τ. που συνδέει τον οικίσκο ελέγχου του Α/Π με τον Υ/Σ. Για τον λόγο αυτό στα σενάρια που εξετάζονται το εσωτερικό δίκτυο του Α/Π παραμένει αμετάβλητο και οι αλλαγές αφορούν μόνον το διασυνδεδετικό δίκτυο Μ.Τ. που συνδέει τον οικίσκο ελέγχου του Α/Π με τον Υ/Σ.

Για την εκτίμηση των απωλειών ενέργειας πραγματοποιείται προσομοίωση του Α/Π και υπολογισμός ροής ισχύος (power flow analysis) με χρήση ειδικού λογισμικού ανάλυσης ηλεκτρικών δικτύων NEPLAN [2].

Προκειμένου η εκτίμηση των απωλειών ενέργειας να είναι αντιπροσωπευτική της αναμενόμενης, χρησιμοποιήθηκε η καμπύλη διάρκειας ισχύος του αιολικού πάρκου, η οποία προέκυψε κατόπιν υπολογισμού της εκτιμώμενης ενεργειακής παραγωγής του Α/Π από ειδικά λογισμικά ρευστομηχανικής προσομοίωσης WAsP – EMD WindPro [3].

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιείται η καμπύλη διάρκειας ισχύος του σχήματος 2.



Σχήμα 2: Καμπύλη διάρκειας ισχύος αιολικού σταθμού.

3. ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι απώλειες ενέργειας στο δίκτυο Μ.Τ. (20kV) ενός Α/Π οφείλονται στις απώλειες ενέργειας στους μετασχηματιστές Μ.Τ.-(20kV) / χαμηλής τάσης (Χ.Τ.)-(0,69kV) που βρίσκονται εγκατεστημένοι στην έξοδο κάθε Α/Γ καθώς και στις απώλειες των καλωδίων Μ.Τ. ή εναερίων γραμμών Μ.Τ. που χρησιμοποιούνται για τη διασύνδεση του σταθμού στο δίκτυο.

Οι απώλειες ενέργειας στους Μ/Σ Μ.Τ./Χ.Τ. είναι δύο ειδών:

- Οι απώλειες κενού φορτίου (ή απώλειες σιδήρου-πο load losses) εμφανίζονται στο υλικό του πυρήνα λόγω του φαινομένου της υστέρησης και των δινορρευμάτων και είναι πρακτικά ανεξάρτητες από την φόρτιση του μετασχηματιστή.
- Οι απώλειες χαλκού (load losses) εμφανίζονται στα τυλίγματα, του μετασχηματιστή (Μ/Σ) και προκαλούνται λόγω του φαινομένου Joule. Οι απώλειες φορτίου είναι ανάλογες της φόρτισης του μετασχηματιστή.

Οι απώλειες των Μ/Σ μπορεί να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην απόδοση της επένδυσης, για τον λόγο αυτό θα πρέπει να επιλέγονται Μ/Σ χαμηλών απωλειών.

Οι απώλειες ενέργειας των καλωδίων Μ.Τ. είναι τριών ειδών:

- Ωμικές απώλειες (ή απώλειες Joule) στους αγωγούς των καλωδίων.
- Διηλεκτρικές απώλειες στο μονωτικό υλικό των καλωδίων.
- Ωμικές απώλειες στους μανδύες των καλωδίων.

Οι διηλεκτρικές απώλειες σε αυτό το επίπεδο τάσης (20kV) είναι αμελητέες και μπορούν να αγνοηθούν [4]. Οι ωμικές απώλειες στους μανδύες μπορούν να μειωθούν σημαντικά όταν τα καλώδια του τριφασικού κυκλώματος τοποθετηθούν σε τριγωνική διάταξη, οπότε το επαγόμενο στο μανδύα ρεύμα μειώνεται σημαντικά.

Οι ωμικές απώλειες στους αγωγούς των καλωδίων ή εναέριων γραμμών είναι σημαντικές και αποτελούν το συντριπτικό μέρος των απωλειών στα δίκτυα διασύνδεσης αιολικών πάρκων.

Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία ασχολούμαστε αποκλειστικά με τον υπολογισμό των ωμικών απωλειών και μόνον στο δίκτυο Μ.Τ. που συνδέει τον οικίσκο ελέγχου του Α/Π με τον Υ/Σ, καθώς αυτό έχει συνήθως το μεγαλύτερο μήκος και σε αυτό εμφανίζεται το μεγαλύτερο μέρος των απωλειών ενέργειας.

4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ – ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΚΤΥΩΝ Μ.Τ.

Εξετάζονται τρία διαφορετικά σενάρια διασύνδεσης μεταξύ Α/Π και Υ/Σ:

- Σενάριο 1: Διπλή εναέρια γραμμή 20kV, ACSR 95mm²
- Σενάριο 2: Μονοπολικά καλώδια ΜΤ, 20kV, (N)A2XSY, 630mm² (Al) – 1 κύκλωμα
- Σενάριο 3: Μονοπολικά καλώδια ΜΤ, 20kV, (N)2XSY, 500mm² (Cu) – 1 κύκλωμα

Το εσωτερικό δίκτυο Μ.Τ. του αιολικού πάρκου θεωρείται το ίδιο και στα τρία σενάρια.

Η γραμμή διασύνδεσης Μ.Τ. από τον οικίσκο ελέγχου του Α/Π έως τον Υ/Σ 20/150kV έχει μήκος 17 χλμ για τα υπόγεια δίκτυα και 14km για το εναέριο δίκτυο.

Το κόστος του καλωδίου τύπου 1x(N)A2XSY, 630mm² εκτιμάται ίσο με 11€/μ.

Το κόστος του καλωδίου τύπου 1x(N)2XSY, 500mm² εκτιμάται ίσο με 27€/μ.

Το κόστος εγκατάστασης του υπογείου κυκλώματος εκτιμάται σε 42€/μ.

Η εναέρια γραμμή ACSR 95mm², διπλού κυκλώματος εκτιμάται ότι κοστίζει 50€/μ.

Τα χαρακτηριστικά των τριών εναλλακτικών δικτύων διασύνδεσης που λήφθηκαν υπ' όψιν στην παρούσα [5,6,7] παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά δικτύων Μ.Τ.

Γραμμή ΜΤ	Αντίσταση AC (Ohm/χλμ)	Μήκος (χλμ)	Κόστος (€/χλμ)
Διπλή εναέρια ACSR 95mm ²	0,215	14,0	50.000
3x(N)A2XSY 630mm ² (Al)	0,063	17,0	75.000
3x(N)2XSY 500mm ² (Cu)	0,050	17,0	123.000

Οι ανωτέρω τιμές είναι ενδεικτικές και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το κόστος των πρώτων υλών (κυρίως των μετάλλων) και από το είδος του εδάφους (για τις υπόγειες γραμμές).

5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Για την εκτίμηση των απωλειών ενέργειας πραγματοποιήθηκε προσομοίωση του Α/Π και υπολογισμός ροής ισχύος (power flow analysis) με χρήση ειδικού λογισμικού ανάλυσης ηλεκτρικών δικτύων, για κάθε ένα από τα προαναφερθέντα τρία σενάρια.

Η συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας του αιολικού σταθμού εκτιμάται σε 42.175,6 MWh. Επομένως, ο συντελεστής φορτίου του Α/Π είναι ίσος με 29,9%.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρατίθενται στον ακόλουθο Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Εκτίμηση ετήσιων απωλειών ενέργειας

Σενάριο	Γραμμή Μ.Τ.	Ετήσιες απώλειες ενέργειας (MWh)	Ποσοστό ετήσιων απωλειών ενέργειας επί της παραγωγής (%)
1	Διπλή εναέρια ACSR 95mm ²	1874,8	4,45
2	3x(N)A2XSY 630mm ² (Al)	1513,4	3,59
3	3x(N)2XSY 500mm ² (Cu)	1288,9	3,06

6. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΕΝΔΥΣΗΣ

Όπως ήταν αναμενόμενο, βάσει της ωμικής αντίστασης κάθε γραμμής, η εναέρια γραμμή Μ.Τ. παρουσιάζει τις περισσότερες απώλειες από τα δύο υπόγεια κυκλώματα, ενώ η υπόγεια γραμμή με καλώδια χαλκού τις μικρότερες.

Στην συνέχεια θα προχωρήσουμε στην οικονομική αξιολόγηση κάθε σεναρίου, χρησιμοποιώντας μία από τις πλέον διαδεδομένες μεθόδους αξιολόγησης επενδύσεων, αυτήν της Καθαρής Παρούσας Αξίας (ΚΠΑ).

Η Καθαρή Παρούσα Αξία είναι το συνολικό καθαρό όφελος μιας επένδυσης, που προκύπτει ως διαφορά μεταξύ του λειτουργικού οφέλους και του συνόλου των δαπανών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της επένδυσης. Όλα τα ποσά εκφράζονται σε παρούσα αξία ανηγμένη στην αρχή του πρώτου έτους της επένδυσης. Η ΚΠΑ (NPV) προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$ΚΠΑ = -K + \sum_{t=1}^N \frac{F_t}{(1+i)^t} + \frac{AA_N}{(1+i)^N}$$

Όπου:

K: Το αρχικό κόστος της επένδυσης

N: Ο χρονικός κύκλος ζωής της επένδυσης

i= Το επιτόκιο αναγωγής

F_t: Το ετήσιο καθαρό όφελος

AA_N: Η απομένουσα αξία της επένδυσης στο τέλος του οικονομικού κύκλου ζωής της επένδυσης

Στην περίπτωση των αιολικών πάρκων ως διάρκεια της επένδυσης λαμβάνονται τα 20έτη, αφού αυτός είναι ο εκτιμώμενος χρόνος ζωής των Α/Γ.

Θεωρούμε πως η απομένουσα αξία του εξοπλισμού είναι μηδενική στο τέλος του κύκλου ζωής του έργου.

Το κόστος κατασκευής του Α/Π, πλην του δικτύου Μ.Τ. από τον οικίσκο ελέγχου έως τον Υ/Σ 20/150kV λαμβάνεται ίσο με 17.710.000€ (≈1.100.000 €/MWh).

Η αποζημίωση για την παραγόμενη ενέργεια λαμβάνεται ίση με 105 €/MWh.

Το επιτόκιο αναγωγής λαμβάνεται ίσο με 5%.

Στον ακόλουθο Πίνακα 3 παρουσιάζεται η οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης.

Πίνακας 3: Οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης βάσει ΚΠΑ.

Σενάριο	Γραμμή ΜΤ	Ετήσιες απώλειες ενέργειας (MWh)	Ετήσιο κόστος απωλειών ενέργειας (€)	Συνολικό κόστος γραμμής Μ.Τ. (€)	ΚΠΑ επένδυσης (€)
1	Διπλή εναέρια ACSR 95mm ²	1874,8	196.852	700.000	34.324.860
2	3x(N)A2XSY 630mm ² (Al)	1513,4	158.910	1.275.000	34.222.707
3	3x(N)2XSY 500mm ² (Cu)	1288,9	135.332	2.091.000	33.700.539

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3 εξάγεται ότι μεγαλύτερη ΚΠΑ παρουσιάζει το Σενάριο 1. Δηλαδή είναι προτιμότερο η διασυνδεδετική γραμμή Μ.Τ. 20kV να είναι διπλή εναέρια, με αγωγούς ACSR 95mm², παρά να υλοποιηθεί υπογείως.

Σε περίπτωση που υπάρχουν περιβαλλοντικοί περιορισμοί και οι αδειοδοτούσες υπηρεσίες επιβάλουν υπόγεια όδευση της γραμμής Μ.Τ., τότε προτιμάται η υλοποίηση με καλώδια με αγωγό αλουμινίου, τα οποία είναι πολύ φθηνότερα σε σύγκριση με αυτά με αγωγό χαλκού.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα παρατηρούμε ότι τα σενάρια 1&2 διαφέρουν ελάχιστα σε σχέση με την οικονομική αποδοτικότητα τους. Εάν ληφθεί υπ'όψιν ότι η εναέρια γραμμή μπορεί να έχει μειωμένη διαθεσιμότητα λόγω έκθεσης στα καιρικά φαινόμενα και σε κεραυνικά πλήγματα καθώς και ότι απαιτεί έστω και μικρή συντήρηση (π.χ. πλύσιμο μονωτήρων και κλάδεμα παρακείμενων δέντρων) μάλλον είναι προτιμότερο να επιλεγεί η υλοποίηση της γραμμής Μ.Τ. με υπόγεια καλώδια XLPE με αγωγό αλουμινίου (NA2XSY).

Σε κάθε περίπτωση, η τελική επιλογή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως:

- το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό της περιοχής εγκατάστασης του Α/Π
- το κόστος κάθε λύσης
- την μορφολογία του εδάφους
- τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς
- το κόστος συντήρησης

Σε κάθε περίπτωση χρειάζεται προσεκτική οικονομικο-τεχνική αξιολόγηση όλων των διατιθέμενων εναλλακτικών τεχνικών λύσεων, ώστε να επιλεγεί η πλέον συμφέρουσα και να μεγιστοποιηθεί το όφελος της επένδυσης.

Τέλος, ως συνέχεια της παρούσας εργασίας θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας για διάφορες τιμές του επιτοκίου αναγωγής και να αξιολογηθούν τα 3 σενάρια με επιπλέον κριτήρια, όπως αυτό του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (IRR).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ιστοσελίδα : www.enercon.de
- [2] NEPLAN software “User manual”, <http://www.neplan.ch>
- [3] WindPro: software “*User’s Manual*” available through EMD International A/S, www.windpro.com, www.emd.dk.
- [4] IEC 60287 – Electric cables, Calculation of the current rating.
- [5] IEC 60502 – Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m= 1,2$ kV) up to 30 kV ($U_m= 36$ kV).
- [6] ABB – XLPE Land Cable Systems, User’s Guide, Rev.5.
- [7] Prysmian – Medium Voltage Cables Guide.

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΜΠΕΙΡΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Αι. Μπαξεβάνου^{1*}, Δ. Φείδαρος¹, Π. Τσίντζος², Χ. Σχοινιάς²

¹Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης - Ινστιτούτο Έρευνας Τεχνολογίας & Ανάπτυξης Θεσσαλίας, Δημητριάδος 95 & Παύλου Μελά, Βόλος, ΤΚ 38333 , cbaxe@ireteth.certh.gr, dfeid@ireteth.certh.gr

²SHELTER ABEE, 6ο χλμ Λαρίσης – Συκουρίου, ΤΚ 41500, shelter@lar.forthnet.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια έχει ανανεωθεί το ενδιαφέρον για υβριδικά συστήματα παραγωγής ενέργειας και όχι μόνο για χρήση σε απομονωμένες περιοχές λόγω αφενός μεν μείωσης του κόστους αγοράς μονάδων παραγωγής ενέργειας ΑΠΕ (φωτοβολταϊκά πλαίσια-ΦΒ, μικρές ανεμογεννήτριες-ΑΓ κλπ) και αφετέρου λόγω της αύξησης του κόστους αγοράς ενέργειας (ορυκτά καύσιμα και ηλεκτρική ενέργεια). Παρά το γεγονός ότι έχει υπάρξει έρευνα και ανάπτυξη αριθμητικών μοντέλων διαστασιολόγησης τέτοιων συστημάτων, είναι χρήσιμο να μπορεί κάποιος να χρησιμοποιήσει και τους εμπειρικούς κανόνες διαστασιολόγησης που είχαν αναπτυχθεί κατά το παρελθόν και αφορούσαν κυρίως αυτόνομα συστήματα. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε κατά πόσο κάποιες από αυτές τις μεθόδους θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν στον αρχικό σχεδιασμό υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας με περισσότερες από μία πηγές ΑΠΕ, σύστημα αποθήκευσης και σύστημα παραγωγής ενέργειας από ορυκτό καύσιμο. Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν τα αναλυτικά μοντέλα για τον προσδιορισμό του μεγέθους της κάθε συνιστώσας ξεχωριστά και στη συνέχεια γίνεται βελτιστοποίηση του σχεδιασμού με χρήση του λογισμικού HOMER και οικονομοτεχνικά κριτήρια, έτσι ώστε να προσδιοριστεί ποια μέθοδος είχε δώσει το καλύτερο αποτέλεσμα. Εξετάστηκαν δύο τύποι φορτίου που πρέπει να καλυφθεί: α) σταθερό ετήσιο φορτίο, β) ημερήσια και εποχιακά μεταβαλλόμενο φορτίο. Εξετάστηκαν συνδυασμοί τριών ηλιακών δυναμικών και δύο αιολικών δυναμικών καθώς και συστήματα που δε συμπεριλάμβαναν ΑΓ σε περίπτωση πολύ χαμηλού αιολικού δυναμικού. Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου εξαρτάται από α) το χρονικό προφίλ του φορτίου και κυρίως από το αν υπάρχει σημαντική διακύμανση ημερήσια ή/και εποχιακή, β) από τη σύνθεση του ΥΣΗ και γ) από διαθέσιμο δυναμικό ΑΠΕ. Σε ότι αφορά τα ΦΒ ως βέλτιστη αποδείχθηκε η μέθοδος Ah ή/και Wh. Η καλύτερη μέθοδος πρόβλεψης αριθμού συσσωρευτών είναι η μέθοδος Ah ή/και Wh θεωρώντας μόνο μια μέρα αυτονομίας. Αντίστοιχα αποδεικνύεται πιο αποτελεσματική η διαστασιολόγηση HZ μόνο για φόρτιση συσσωρευτών, μέθοδος η οποία δίνει εξαιρετική προσέγγιση στην περίπτωση σταθερού φορτίου αλλά σημαντικές διαφοροποιήσεις για κυμαινόμενο φορτίο. Τέλος η εξεταζόμενη μέθοδος διαστασιολόγησης ΑΓ δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στον προσδιορισμό της καμπύλης λειτουργίας σε περίπτωση χαμηλού αιολικού δυναμικού αλλά αδυνατεί να προβλέψει την ισχύ της ΑΓ.

Λέξεις Κλειδιά: Υβριδικό Σύστημα Παραγωγής Ενέργειας, ΑΠΕ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Έχει αποδειχθεί ότι η χρήση υβριδικών συστημάτων ενέργειας (ΥΣΗ) μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος κύκλου ζωής των αυτόνομων παρόχων ισχύος ειδικά στην περίπτωση που είναι stand-by, ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζουν τη συνεχή τροφοδοσία με ενέργεια στις απομονωμένες περιοχές. Ένα πλήρες ΥΣΗ μπορεί να αποτελείται από Φωτοβολταϊκά πλαίσια (ΦΒ), Ανεμογεννήτρια (ΑΓ), Ηλεκτροπαραγωγό Ζεύγος (ΗΖ) και συσσωρευτές για την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας. Δεδομένου του πολυπαραμετρικού χαρακτήρα του προβλήματος, του στοχαστικού χαρακτήρα του διαθέσιμου δυναμικού ΑΠΕ και της μη-γραμμικής συμπεριφοράς της λειτουργίας των συνιστωσών, μέχρι σήμερα δεν έχει προταθεί μια ολοκληρωμένη θεωρία ή ένα ολοκληρωμένο μοντέλο – κώδικας για το σχεδιασμό του βέλτιστου συστήματος συναρτήσει των κλιματολογικών συνθηκών. Ο σχεδιασμός των υβριδικών συστημάτων γίνεται με τρεις βασικές μεθόδους. Τη χρήση αναλυτικών ή ημιεμπειρικών σχέσεων, την χρήση μοντέλων προσομοίωσης της λειτουργίας των ΥΣΗ και τη χρήση αλγορίθμων προσδιορισμού βασικών στοιχείων των συνιστωσών.

Στην πρώτη περίπτωση συνήθως χρησιμοποιούνται αναλυτικές ή ημιεμπειρικές μέθοδοι όπως είναι η μέθοδος των Ah [1], οι οποίες όμως συνήθως έχουν αναπτυχθεί για συγκεκριμένους συνδυασμούς αυτόνομων συστημάτων και δε δύνανται να λάβουν υπόψη την ταυτόχρονη χρήση περισσότερων της μιας ΑΠΕ.

Η δεύτερη μέθοδος είναι έμμεση. Ξεκινώντας από έναν αρχικό σχεδιασμό και με επαναλαμβανόμενες προσομοιώσεις καλύπτεται ένα ευρύ φάσμα διαφοροποίησης των συνιστωσών του αρχικού σχεδιασμού με σκοπό τη βελτιστοποίησή του. Σε αυτή τη διαδικασία τα κριτήρια βελτιστοποίησης είναι συνήθως οικονομοτεχνικά καθώς και κριτήρια που αφορούν την αξιοπιστία του σχεδιαζόμενου συστήματος όπως η μέθοδος loss of power supply probability (LSPS) [2], η μέθοδος Loss of Load Probability (LOLP) [3], η μέθοδος System Performance Level (SPL) [4] και η μέθοδος Loss of Load Hours (LOLH) [5]. Ως μέθοδοι βελτιστοποίησης έχουν προταθεί κατά καιρούς γραφικές [6], στατιστικές και επαναληπτικές μέθοδοι [7] καθώς και μέθοδοι τεχνητής νοημοσύνης [8]. Τα λογισμικά αυτά διακρίνονται σε λογιστικά μοντέλα, σε μοντέλα χρονικής σειράς ή ημισταθερά, σε στατιστικά μοντέλα σε μοντέλα χρονικής σειράς/ στατιστικά, σε δυναμικά μοντέλα και σε μοντέλα δυναμικά μηχανικά μόνιμης κατάστασης ηλεκτρικά. Δύο άλλες κατηγορίες μοντέλων που έχουν πρόσφατα αναπτυχθεί είναι τα μοντέλα dispatch και τα μεταβατικά μοντέλα.

Η τρίτη μέθοδος απαιτεί την ανάπτυξη και προγραμματισμό ενός αλγορίθμου ο οποίος χρησιμοποιώντας αναλυτικές σχέσεις και επαναληπτικές διαδικασίες αυτοματοποιεί τις διαδικασίες της πρώτης κατηγορίας λαμβάνοντας υπόψη και κριτήρια αξιολόγησης όπως στη δεύτερη κατηγορία. Οι μέθοδοι που προτείνονται συνήθως αφορούν τη συμμετοχή μιας μόνο ΑΠΕ και στην καλύτερη περίπτωση περιλαμβάνουν τη χρήση ΗΖ και συσσωρευτών [9], ή δύο ΑΠΕ χωρίς τη χρήση ΗΖ [10] ενώ συχνά αφορούν συγκεκριμένες εφαρμογές. Έτσι έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι για το σχεδιασμό και βελτιστοποίηση συστημάτων που περιλαμβάνουν ΑΓ, ΗΖ και συσσωρευτές όπως οι WIND-REMOTE II, WIND-DIESEL I και WINDENEREJ [11, 12, 13]. Άλλοι αλγόριθμοι για το σχεδιασμό και βελτιστοποίηση συστημάτων που περιλαμβάνουν ΦΒ, ΗΖ και συσσωρευτές ή μόνο ΦΒ και συσσωρευτές όπως ο PHOTOV-III, ο PHOTOV-IV και ο PV-DIESEL III [14, 15, 16]. Και τέλος αλγόριθμοι για συστήματα που περιλαμβάνουν ΦΒ και ΑΓ, όπως ο WT-PV-II [17].

Και η δεύτερη και η τρίτη κατηγορία μεθόδων απαιτούν είτε την ανάπτυξη πηγαίου κώδικα, είτε τη χρήση εμπορικού κώδικα και έτσι δε μπορούν να εξυπηρετήσουν τις σχεδιαστικές ανάγκες ενός κατασκευαστή τουλάχιστο σε ότι αφορά την πρώτη προσέγγιση. Από την άλλη οι αναλυτικές ή/και ημιεμπειρικές σχέσεις της πρώτης κατηγορίας έχουν αναπτυχθεί για απλά αυτόνομα συστήματα και όχι για πλήρη ΥΣΗ. Στην παρούσα εργασία επιχειρείται να αξιολογηθεί η δυνατότητα αξιοποίησης αυτών των μεθόδων, που κατ' αρχήν έχουν σχεδιαστεί για άλλα συστήματα, στην αρχική διαστασιολόγηση πλήρων υβριδικών συστημάτων. Για το λόγο αυτό μια σειρά αναλυτικών σχέσεων χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών ΥΣΗ για δύο διαφορετικές εφαρμογές, τρία διαφορετικά ηλιακά δυναμικά,

δύο διαφορετικά αιολικά δυναμικά και δύο διαφορετικές συνθέσεις ΥΣΗ. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ο κώδικας HOMER για την προσομοίωση της λειτουργίας αυτών των συστημάτων. Με επαναληπτική μέθοδο και με κριτήρια το κόστος της παραγόμενης ενέργειας και τη δυνατότητα απόκρισης των συστημάτων προσδιορίζεται η βέλτιστη σύνθεση των ΥΣΗ. Συγκρίνοντας με τις αρχικές εκτιμήσεις αξιολογείται η δυνατότητα κάθε αναλυτικής ή/και ημιεμπειρικής μεθόδου να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό ενός πλήρους ΥΣΗ.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Ακολουθως παρουσιάζονται οι αναλυτικές ή/και ημιεμπειρικές μέθοδοι διαστασιολόγησης των συνιστωσών ΥΣΗ που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και η μέθοδος προσομοίωσης της λειτουργίας ΥΣΗ που χρησιμοποιήθηκε για τις παραμετρικές μελέτες προσδιορισμού της βέλτιστης επιλογής.

2.1. ΕΠΙΛΟΓΗ ΙΣΧΥΟΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Πρόκειται ίσως για την πλέον διερευνημένη συνιστώσα ΑΠΕ ενός ΥΣΗ, με τη διαφορά ότι τα προτεινόμενα μοντέλα αφορούν κυρίως αυτόνομα συστήματα. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν 5 μέθοδοι. Η πρώτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε (ΦΒ-α), είναι η γνωστή μέθοδος των Ah [1] όπως αυτή προτάθηκε από τα Sandia National Laboratories. Για την εφαρμογή της μεθόδου αυτής απαιτείται ο προσδιορισμός του ημερήσιου ρεύματος φορτίου σε A-h/day, η επιλογή τύπου ΦΒ πλαισίου και ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών λειτουργίας τους στις εξεταζόμενες συνθήκες θερμοκρασίας περιβάλλοντος και ο προσδιορισμός των εν σειρά συνδεδεμένων ΦΒ πλαισίων ανάλογα με την τάση εισόδου του αντιστροφέα (ή του ρυθμιστή φορτίου) ενώ ο αριθμός των παράλληλα συνδεδεμένων από το ημερήσιο φορτίο. Δεδομένης της ευελιξίας που παρέχουν οι σύγχρονοι αντιστροφείς σύνδεσης διαφορετικών αριθμών πλαισίων σε διαφορετικές θύρες στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε μια τροποποιημένη μορφή της μεθόδου των Ah, η μέθοδος των Wh (ΦΒ-β) στην οποία προσδιορίζεται το ημερήσιο φορτίο σε Wh και στη συνέχεια προσδιορίζεται ο συνολικός αριθμός ΦΒ πλαισίων συναρτήσει του φορτίου αυτού. Και στις δύο περιπτώσεις κάθε μήνας εκπροσωπήθηκε από μια τυπική μέρα για την οποία υπολογίστηκαν αναλυτικά τα φορτία.

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν πιο απλοποιημένες μέθοδοι. Η πρώτη εξ αυτών (ΦΒ-γ) είναι μια μέθοδος αρχικής εκτίμησης της συνολικής επιφάνειας που πρέπει να καλύπτουν τα ΦΒ πλαίσια από τη σχέση [18].

$$A = \frac{L}{H \cdot n_r \cdot n_p \cdot n_T \cdot n_d}$$

Όπου, A το εμβαδό επιφάνειας ΦΒ [m²], L το φορτίο (μέση ετήσια τιμή) [kWh/day], H η διαθέσιμη ηλιακή ενέργεια (μέση ετήσια τιμή) [kWh/(m².day)], n_r ο ονομαστικός βαθμός απόδοσης ΦΒ, n_p ο παράγοντας ρύπανσης, n_T ο παράγοντας θερμοκρασίας και n_d ο παράγοντας γήρανσης. Μετά χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης [19] της απαιτούμενης επιφάνειας (ΦΒ-δ) η οποία θα πρέπει να βρίσκεται μεταξύ δύο τιμών A₁ και A₂.

$$A_1 = \frac{\frac{1}{12} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{12} \left(L_{id} + \frac{L_i - L_{id}}{n_b} \right)}{n_{WV} \cdot n_{\alpha} \cdot n_R \cdot n_K}}{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} H_i \cdot n_r \cdot n_T \cdot n_d \cdot n_p}$$

$$A_2 = \frac{\left(\frac{L_{id} + \frac{L_i - L_{id}}{n_b}}{n_w \cdot n_{\alpha} \cdot n_R \cdot n_k} \right)}{H_i \cdot n_r \cdot n_T \cdot n_d \cdot n_p}$$

Όπου, L_i η μέση μηνιαία ημερήσια ενέργεια που απαιτείται κατά τη διάρκεια του 24ώρου κατά το μήνα i [kWh/day], L_{id} η μέση μηνιαία ημερήσια ενέργεια που απαιτείται κατά τη διάρκεια

της ημέρας κατά το μήνα i [kWh/day], H_i η μέση μηνιαία ημερήσια ηλιακή ενέργεια στο επίπεδο των συλλεκτών [kWh/(m².day)], n_w οι απώλειες των καλωδιώσεων, n_a ο συντελεστής προσαρμογής της ΦΒ συστοιχίας στη μονάδα ισχύος του συστήματος, n_R ο βαθμός απόδοσης ρυθμιστή φόρτισης, n_k ο βαθμός απόδοσης μετατροπέα DC/AC και n_b ο βαθμός απόδοσης συσσωρευτών. Τέλος χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος προσδιορισμού του βέλτιστου αριθμού ΦΒ πλαισίων (ΦΒ-ε) μεταξύ μιας μέγιστης και μιας ελάχιστης τιμής [16].

$$z_{\min} = \frac{E_0 / (n_{cc} \cdot n_{inv} \cdot n_{καλ})}{(H_T \cdot n_{pv}) \cdot S_{πλαισ} \cdot n_{θερμ} \cdot n_{καθ} \cdot n_{γηρ}} \quad z_{\max} = \frac{z_{\min}}{n^*}$$

Όπου, E_0 το μηνιαίο φορτίο [kWh/mo], H_T η μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία [kWh/(mo.m²)], $S_{πλαισ}$ το εμβαδό πλαισίου [m²], n_{cc} η μέση μηνιαία απόδοση του ρυθμιστή φορτίου, n_{inv} η μέση μηνιαία απόδοση του αντιστροφέα, $n_{καλ}$ οι απώλειες των καλωδίων μεταφοράς, n_{pv} η απόδοση των ΦΒ πλαισίων, $n_{θερμ}$ η μεταβολή απόδοσης των ΦΒ πλαισίων λόγω θερμοκρασίας, $n_{καθ}$ η μεταβολή απόδοσης λόγω επικαθήσεων, $n_{γηρ}$ η μεταβολή απόδοσης λόγω γήρανσης και n^* ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης

2.2. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

Σε πρώτη φάση η απαιτούμενη χωρητικότητα των συσσωρευτών προσδιορίστηκε με τη μέθοδο των Ah (Σ-α) και με τη μέθοδο των Wh (Σ-β) και στις δύο περιπτώσεις οι υπολογισμοί γίνονται για κάθε μήνα και η χωρητικότητα των συσσωρευτών θα πρέπει να είναι: Χωρητικότητα [Ah] = max {υπολοιπόμενο φορτίο που δεν καλύπτεται από ΦΒ, φορτίο ημερών νεφοκάλυψης}. Στη συνέχεια προσδιορίστηκαν τα όρια μεταξύ των οποίων θα πρέπει να βρίσκεται η χωρητικότητα των συσσωρευτών (Σ-γ) από τις σχέσεις [11].

$$Q_{\max} = h_0 \cdot \left(\frac{E_y}{8760 \cdot \eta_{dc}} \right) \cdot \left(\frac{1}{DOD_L} \cdot V_b \right) \quad Q_{\min} = (1 - DOD_L) \cdot Q_{\max}$$

Όπου, h_0 οι ετήσιες ώρες αυτονομίας, E_y η ετήσια κατανάλωση ενέργειας [kWh], η_{dc} η απόδοση παραγωγής απόδοσης ενέργειας από το συσσωρευτή, DOD_L το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης, V_b η τάση λειτουργίας του συσσωρευτή : $n_{dc} = n_b \cdot n_w \cdot n_k$

Όπου, n_b ο βαθμός απόδοσης συσσωρευτή, n_w ο βαθμός απόδοσης καλωδιώσεων και n_k ο βαθμός απόδοσης αντιστροφέα. Τέλος, και δεδομένου ότι οι προηγούμενες μέθοδοι αγνοούν την ύπαρξη ΗΖ και ΑΓ στο σύστημα χρησιμοποιήθηκε ένας γενικός κανόνας σχεδιασμού ΥΣΗ [20] ο οποίος λέει ότι σε ένα ΥΣΗ οι συσσωρευτές θα πρέπει να παρέχουν τουλάχιστο μια ημέρα αυτονομίας με τις μεθόδους Ah και Wh προσδιορίστηκε ένα ελάχιστος αριθμός συσσωρευτών [Σ-δ].

2.3. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΙΣΧΥΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΟΥ ΖΕΥΓΟΥΣ

Σύμφωνα με το [21] το ΗΖ θα πρέπει να είναι σε θέση να καλύψει ταυτόχρονα το μέγιστο φορτίο και τη φόρτιση των συσσωρευτών [HZ-α]: $P_{ED} = P_L + CR$, $CR = [(C_{120} \times V)/(120 \text{ h})] \times n$

Όπου, P_{ED} η ενεργός ηλεκτρική ισχύς ΗΖ, P_L το μέγιστο ηλεκτρικό φορτίο (ενεργός ισχύς), CR ο μέγιστος ρυθμός φόρτισης συσσωρευτών και n ο αριθμός των συσσωρευτών. Σύμφωνα με το [20] αρκεί να καλύπτει το μέγιστο φορτίο [HZ-β]: $P_{ED} = P_L$

Και στις δύο περιπτώσεις θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η άεργος ισχύς έτσι ώστε να υπολογίζεται τελικά φαινόμενη ισχύς του ΗΖ, N_{ED} .

Τέλος σύμφωνα με μια άλλη λογική προσέγγιση το ΗΖ θα πρέπει να χρησιμοποιείται μόνο για φόρτιση των συσσωρευτών [HZ-γ], , σε αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχει άεργος ισχύς.

$$N_{ED} = [(C_{10} \times V)/(120 \text{ h})] \times n$$

2.4. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Για τις ΑΓ θα πρέπει να προσδιοριστούν εκτός από την ονομαστική ισχύ (P_r) και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους, δηλ. ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας, ταχύτητα έναρξης και λήξης λειτουργίας (U_r , U_{ci} , U_{co}). Για το σχεδιασμό χρησιμοποιήθηκαν οδηγίες που αφορούν αυτόνομα συστήματα που συνδυάζουν ΑΓ με ΗΖ [21, 22]. Έτσι η εγκατεστημένη ισχύς θα πρέπει να μην είναι σημαντικά μεγαλύτερη από το φορτίο και να κυμαίνεται μεταξύ 20 και 30% του ονομαστικού φορτίου του ΗΖ. Η τιμή της ταχύτητας εκκίνησης (U_{ci}) θα πρέπει χοντρικά να είναι $U_{ci} > 0.6 U_{av}$, η ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας (U_r) θα πρέπει να είναι $U_r < 2 U_{av}$ και η ταχύτητα παύσης λειτουργίας $U_{co} < 3 U_{av}$ και επιπλέον να εξασφαλίζει ότι το 90% του χρόνου η διαθέσιμη τοπικά ταχύτητα ανέμου θα είναι μικρότερη από αυτή.

2.5. ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΤΗΣΙΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΥΣΗ

Η προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας των ΥΣΗ έγινε με τον κώδικα HOMER 2 [23], κάνοντας τις ακόλουθες παραδοχές: α) πραγματικό επιτόκιο δανεισμού 8%, β) χρόνος ζωής του συστήματος 20 έτη, γ) χρονικό βήμα προσομοίωσης 60 min, δ) ελάχιστο επίπεδο φόρτισης συσσωρευτών 40%, ε) μέγιστη αποδεκτή έλλειψη δυνατότητας κάλυψης φορτίου 0 και 10% ανάλογα με την εφαρμογή και στ) τιμή συμβατικού καυσίμου ΗΖ 1.3 €/lt.

3. ΜΕΛΕΤΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

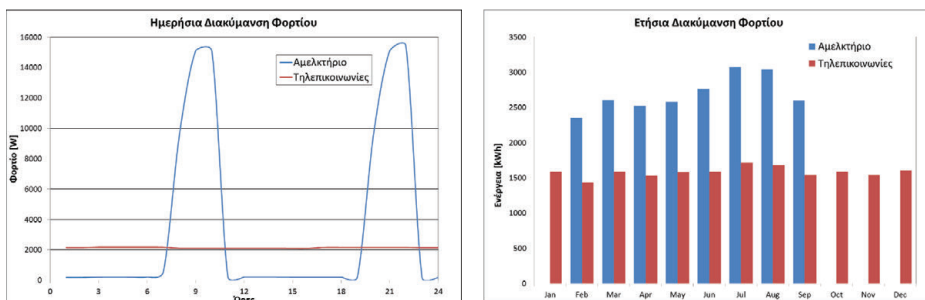
3.1. ΦΟΡΤΙΑ

Επιλέχθηκε να εξεταστούν δύο χαρακτηριστικές εφαρμογές οι οποίες αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικούς τύπους φορτίων. Η πρώτη αφορά την τροφοδοσία μονάδας τηλεπικοινωνιών 2 kW, η οποία χαρακτηρίζεται από σχεδόν σταθερό φορτίο σε όλη τη διάρκεια του 24ωρου και σε όλη τη διάρκεια του έτους. Η δεύτερη εφαρμογή αφορά τροφοδοσία αμελκτήριου 12 θέσεων για μονάδα 200 ζώων η οποία χαρακτηρίζεται από εντονότατη ημερήσια και εποχιακή διακύμανση φορτίου. Στον πίνακα 3.1 δίνεται η εγκατεστημένη ισχύς και η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας για χαμηλό ηλιακό δυναμικό. Σε κάθε περίπτωση έχει προστεθεί φορτίο 1.334 kW που αντιστοιχεί στις μονάδες διαχείρισης ενέργειας του ΥΣΗ και τον εξοπλισμό διαχείρισης εσωτερικού μικροκλίματος του οικίσκου, δεδομένου ότι η θερμοκρασία του θαλάμου εγκατάστασης των συσσωρευτών πρέπει να διατηρείται εντός συγκεκριμένων ορίων [15], δηλ. ανεμιστήρες, κλιματιστικό και φώτα.

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά φορτία των εξεταζόμενων εφαρμογών		
Εφαρμογή	Σταθμός τηλεπικοινωνιών	Αμελκτήριο
Εγκατεστημένη Ισχύς [kW]	3.334	23.15
Ετήσια κατανάλωση ενέργειας [kWh]	19000	21500

Ο προσδιορισμός των θερμικών και ψυκτικών φορτίων του θαλάμου των συσσωρευτών και της κατοικίας έγινε με προσομοίωση σε ετήσια βάση με χρονικό βήμα 10 min με το λογισμικό Energy+ [24]. Στο σχήμα 3.1 δίνονται οι ημερήσιες και οι ετήσιες διακυμάνσεις φορτίου.

Εξετάστηκαν συνολικά 18 ΥΣΗ, 9 για κάθε εφαρμογή, συνδυάζοντας τις τρεις περιπτώσεις ηλιακού δυναμικού, τις δύο περιπτώσεις αιολικού δυναμικού και την περίπτωση μη χρήσης ΑΓ στο ΥΣΗ.



Σχήμα 3.1 Ημερήσια και εποχιακή διακύμανση φορτίου των δύο εφαρμογών

3.2. ΗΛΙΑΚΟ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ

Εξετάστηκαν τρία ηλιακά δυναμικά τα οποία στο εξής θα χαρακτηρίζονται ως χαμηλό, μέσο και υψηλό και καλύπτουν τον Ελλαδικό χώρο [25] και παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1 Χαρακτηριστικά εξεταζόμενων ηλιακών δυναμικών				
Ηλιακό δυναμικό	Ετήσια ολική ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο [kWh/m ²]	Ετήσιος συντελεστής αιθιρότητας [%]	Μέση ετήσια θερμοκρασία ημέρας [C]	Μέγιστος αρ. διαδοχικών ημερών νεφοκάλυψης
Χαμηλό	1513.58	51	16.60	18
Μέσο	1628.79	54	18.78	8
Υψηλό	1722.60	56	19.52	5

Εξετάστηκαν δύο αιολικά δυναμικά τα οποία στο εξής θα χαρακτηρίζονται χαμηλό και υψηλό και καλύπτουν τον Ελλαδικό χώρο [26] και παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2. Για χαμηλότερο αιολικό δυναμικό θα θεωρείται ότι το σύστημα δε θα περιλαμβάνει ΑΓ.

Πίνακας 3.2 Χαρακτηριστικά εξεταζόμενων αιολικών δυναμικών		
Παράμετρος	Χαμηλό δυναμικό σε ορεινές και ημιορεινές περιοχές της ενδοχώρας	Υψηλό δυναμικό σε παραθαλάσσιες και ορεινές νησιωτικές περιοχές
Μέση ετήσια ταχύτητα δεκαλέπτου σε ύψος z=10 m [m/s]	5	7
Γενικευμένη παράμετρος ταχύτητας Weibull, C [m/s]	5.63	7.9
Συντελεστή μορφής κατανομής Weibull, k	1.8	2

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Αφού χρησιμοποιήθηκαν οι αναλυτικές ή/και ημιεμπειρικές σχέσεις που αναπτύχθηκαν στην παράγραφο 2 για την εκτίμηση του μεγέθους της κάθε συνιστώσας των εξεταζόμενων ΥΣΗ στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό HOMER για ευρείας έκτασης παραμετρικές μελέτες με στόχο τη βελτιστοποίηση της αρχικής επιλογής. Η βελτιστοποίηση έγινε με

κριτήριο το κόστος της παραγόμενης kWh και την ικανότητα του συστήματος να καλύπτει ικανοποιητικά το φορτίο. Στην περίπτωση της μονάδας τηλεπικοινωνιών ζητήθηκε 100% κάλυψη του φορτίου σε όλο το έτος, ενώ στις περιπτώσεις του αμελκτηρίου και της κατοικίας απαιτήθηκε 90% κάλυψη της ζήτησης. Στη συνέχεια παρατίθενται τα αποτελέσματα των αναλυτικών μεθόδων και των προσομοιώσεων.

4.1. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΦΒ

Στον πίνακα 4.1 παρατίθενται τα αποτελέσματα που αφορούν τις πέντε (5) αναλυτικές μεθόδους και την προσομοίωση για κάθε εφαρμογή και για κάθε εξεταζόμενο ηλιακό δυναμικό. Τα αποτελέσματα δίνονται με τη μορφή εγκατεστημένης ισχύος σε kW. Στην προσομοίωση δίνονται κάθε φορά τρεις τιμές που αντιστοιχούν στα τρία συστήματα που σχεδιάστηκαν για να καλύψουν το συνδυασμό του συγκεκριμένου ηλιακού δυναμικού με τα δύο εξεταζόμενα αιολικά δυναμικά και την περίπτωση (πρώτη στη σειρά των αποτελεσμάτων) κατά την οποία το αιολικό δυναμικό είναι τόσο χαμηλό που δεν εντάσσεται στο σύστημα ΑΓ. Η παρουσίαση αυτή εφαρμόζεται και στη διαστασιολόγηση του ΗΖ.

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης ΦΒ πλαισίων			
Εφαρμογή	Μονάδα Τηλεπικοινωνιών		
Μέθοδος / Ηλιακό Δυναμικό	Χαμηλό ηλιακό δυναμικό	Μέσο ηλιακό δυναμικό	Υψηλό ηλιακό δυναμικό
ΦΒ-α [kW]	10.08	10.8	10.56
ΦΒ-β [kW]	10.08	10.8	9.36
ΦΒ-γ [kW]	15.84	11.28	11.76
ΦΒ-δ [kW]	21.2 – 44.16	20.64-39.3	19.2 – 35.48
ΦΒ-ε [kW]	34.32	31.2	31.2
Προσομοίωση [kW]	11.04/11.04/10.32	11.04/10.32/8.88	11.04/10.32/9.6
Εφαρμογή	Αμελκτήριο		
Μέθοδος / Ηλιακό Δυναμικό	Χαμηλό ηλιακό δυναμικό	Μέσο ηλιακό δυναμικό	Υψηλό ηλιακό δυναμικό
ΦΒ-α [kW]	13.44	13.44	13.44
ΦΒ-β [kW]	14.64	14.4	13.68
ΦΒ-γ [kW]	17.28	16.32	21.36
ΦΒ-δ [kW]	21.36 – 46.08	20.4 – 41.28	19.2 – 40.08
ΦΒ-ε [kW]	40.8	37.92	37.44
Προσομοίωση [kW]	14.88/14.88/14.88	14.88/14.88/14.88	14.88/14.88/14.88

Στις εφαρμογές της μονάδας τηλεπικοινωνιών η καλύτερη προσέγγιση γίνεται με τη μέθοδο των Ah και των Wh (μέθοδοι ΦΒ-α και ΦΒ-β), ανάλογα με το αν το σύστημα περιλαμβάνει ή όχι ΑΓ και τι είδους ΑΓ, οι οποίες έχουν την τάση να υποτιμούν ελαφρώς την απαιτούμενη ισχύ. Καλές είναι και οι εκτιμήσεις της μεθόδου αρχικού προσδιορισμού του εμβαδού της επιφανείας των ΦΒ (μέθοδος ΦΒ-γ), η οποία όμως έχει την τάση να υπερεκτιμά την απαιτούμενη ισχύ. Στην περίπτωση του αμελκτηρίου η βέλτιστη προσέγγιση γίνεται πάντα με τη μέθοδο των Wh η οποία επίσης υποτιμά ελαφρώς την απαιτούμενη ισχύ.

4.2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

Στον πίνακα 4.2 παρατίθενται τα αποτελέσματα που αφορούν τις τέσσερις (4) αναλυτικές μεθόδους και την προσομοίωση για κάθε εφαρμογή και για κάθε εξεταζόμενο ηλιακό δυναμικό. Τα αποτελέσματα δίνονται με τον αριθμό συσσωρευτών.

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα διαστασιολόγησης συσσωρευτών			
Εφαρμογή	Μονάδα Τηλεπικοινωνιών		
Μέθοδος / Ηλιακό Δυναμικό	Χαμηλό ηλιακό δυναμικό	Μέσο ηλιακό δυναμικό	Υψηλό ηλιακό δυναμικό
Σ-α [τεμ]	360	336	312
Σ-β [τεμ]	351	188	328
Σ-γ [τεμ]	60 – 300	60 – 300	35 – 158
Σ-δ [τεμ]	24	24	24
Προσομοίωση [τεμ]	24	24	24
Εφαρμογή	Αμελκτήριο		
Μέθοδος / Ηλιακό Δυναμικό	Χαμηλό ηλιακό δυναμικό	Μέσο ηλιακό δυναμικό	Υψηλό ηλιακό δυναμικό
Σ-α [τεμ]	936	648	384
Σ-β [τεμ]	889	581	371
Σ-γ [τεμ]	202 – 1005	92 – 458	57 – 281
Σ-δ [τεμ]	72	72	48
Προσομοίωση [τεμ]	72	72	48

Σε όλες τις εφαρμογές και σε όλα τα συστήματα οι μέθοδοι Ah και Wh (μέθοδοι Σ-α και Σ-β) υπερτιμούν υπερβολικά τον αριθμό των απαιτούμενων συσσωρευτών, κάτι αναμενόμενο εφόσον θεωρούν ότι οι συσσωρευτές πρέπει να καλύψουν όλο το φορτίο που δε μπορεί να καλυφθεί από τα ΦΒ. Επίσης σε όλες τις περιπτώσεις η καλύτερη εκτίμηση γίνεται με τη μέθοδο Σ-δ κατά την οποία χρησιμοποιείται η μέθοδος των Ah αλλά θεωρώντας μόνο 1 ημέρα αυτονομίας (και όχι κάλυψη όλων των διαδοχικών ημερών νεφοκάλυψης).

4.3. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΟΥ ΖΕΥΓΟΥΣ

Στον πίνακα 4.3 παρατίθενται τα αποτελέσματα που αφορούν τις τρεις (3) αναλυτικές μεθόδους και την προσομοίωση για κάθε εφαρμογή και για κάθε εξεταζόμενο ηλιακό δυναμικό. Τα αποτελέσματα δίνονται με την ισχύ του ΗΖ σε kVA.

Πίνακας 4.3 Διαστασιολόγηση ΗΖ			
Εφαρμογή	Μονάδα Τηλεπικοινωνιών		
Μέθοδος / Ηλιακό Δυναμικό	Χαμηλό ηλιακό δυναμικό	Μέσο ηλιακό δυναμικό	Υψηλό ηλιακό δυναμικό
ΗΖ-α [kVA]	4.882		
ΗΖ-β [kVA]	4.167		
ΗΖ-γ [kVA]	3.072		
Προσομοίωση [kVA]	3		

Εφαρμογή	Αμελκτήριο			
	Μέθοδος / Ηλιακό Δυναμικό	Χαμηλό ηλιακό δυναμικό	Μέσο ηλιακό δυναμικό	Υψηλό ηλιακό δυναμικό
HZ-α [kVA]		14.416	14.416	14.416
HZ-β [kVA]		20.163	20.163	14.987
HZ-γ [kVA]		9.216	9.216	6.144
Προσομοίωση [kVA]		6/5/5	11/5/5	10/4/4

Στην περίπτωση της μονάδας τηλεπικοινωνιών η βέλτιστη πρόβλεψη επιτυγχάνεται με τη μέθοδο HZ-γ δηλαδή όταν η διαστασιολόγηση του HZ γίνεται μόνο για φόρτιση των συσσωρευτών. Όταν η διακύμανση του φορτίου γίνεται πιο έντονη τότε η εκτίμηση της ισχύος του HZ γίνεται πιο περίπλοκη. Πάντα η πιο κοντινή τιμή δίνεται με τη μέθοδο HZ-γ όμως ανάλογα με την εφαρμογή και το σύστημα παρατηρείται σημαντική υπερίμηση ή υποτίμηση της προτεινόμενης ισχύος.

4.4. ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Στην περίπτωση της ΑΓ εξετάστηκε μόνο μια μέθοδος, συνεπώς απλά θα παρατεθούν τα αποτελέσματα της εκτίμησης και της προσομοίωσης για τα δύο αιολικά δυναμικά και για κάθε εφαρμογή στον πίνακα 4.4

Πίνακας 4.4 Διαστασιολόγηση ΑΓ					
Εφαρμογή	Μονάδα Τηλεπικοινωνιών				
	Χαμηλό αιολικό δυναμικό		Υψηλό αιολικό δυναμικό		
	Εκτίμηση	Προσομοίωση		Εκτίμηση	Προσομοίωση
Pr [kW]	1.3	3.5	Pr [kW]	1.2	2.6
U _{ci} [m/s]	3	3	U _{ci} [m/s]	5.4	3
U _r [m/s]	10	8	U _r [m/s]	14	9
U _{co} [m/s]	15	16	U _{co} [m/s]	21	25
Εφαρμογή	Αμελκτήριο				
	Εκτίμηση	Προσομοίωση		Εκτίμηση	Προσομοίωση
Pr [kW]	4.2	3.6	Pr [kW]	4.2	2.8
U _{ci} [m/s]	3	3	U _{ci} [m/s]	5.4	3
U _r [m/s]	10	8	U _r [m/s]	14	9
U _{co} [m/s]	15	16	U _{co} [m/s]	21	25

Σε ότι αφορά την εκτίμηση της ισχύος στην περίπτωση του σταθερού φορτίου η εκτίμηση υποτιμά την προβλεπόμενη ισχύ ενώ στην περίπτωση του μεταβαλλόμενου φορτίου την υπερτιμά. Σε ότι αφορά τη μορφή της καμπύλης λειτουργίας ο γενικός κανόνας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα στην περίπτωση του χαμηλού αιολικού δυναμικού, ενώ στην περίπτωση του υψηλού αιολικού δυναμικού έχει την τάση να υπερτιμά την προβλεπόμενη ταχύτητες εκκίνησης καθώς και την προβλεπόμενη ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε κατά πόσο αναλυτικές ή/και ημιεμπειρικές μέθοδοι διαστασιολόγησης αυτόνομων συστημάτων παραγωγής ενέργειας μπορούν να αξιοποιηθούν στο σχεδιασμό πλήρων υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας που περιλαμβάνουν περισσότερες από μία πηγές ΑΠΕ, ΗΖ και συσσωρευτές.

Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η δυνατότητα των εξεταζόμενων μεθόδων να προβλέψουν ικανοποιητικά το μέγεθος της κάθε συνιστώσας εξαρτάται από: α) το χρονικό προφίλ του φορτίου και κυρίως από το αν υπάρχει σημαντική διακύμανση ημερήσια ή/και εποχιακή, β) από τη σύνθεση του ΥΣΗ και γ) από διατιθέμενο δυναμικό ΑΠΕ.

Σε ότι αφορά την προ-εκτίμηση της ισχύος των ΦΒ στις περισσότερες περιπτώσεις οι μέθοδοι Ah και Wh δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Σε ότι αφορά το μέγεθος των συσσωρευτών σε όλες τις περιπτώσεις η καλύτερη προσέγγιση γίνεται με τη μέθοδο Ah ή Wh θεωρώντας μόνο μία ημέρα αυτονομίας. Η καλύτερη μέθοδος εκτίμησης της ισχύος του ΗΖ δείχνει να είναι αυτή που θεωρεί ότι το ΗΖ χρησιμοποιείται μόνο για φόρτιση συσσωρευτών. Παρόλα αυτά και ενώ για σταθερό ημερήσιο και εποχιακό φορτίο η πρόβλεψη είναι πολύ καλή για μεταβαλλόμενα φορτία υπερτιμιά ή υποτιμιά σημαντικά την προβλεπόμενη ισχύ ανάλογα με το συνδυασμό των δυναμικών ΑΠΕ και τη σύνθεση του συστήματος ΥΣΗ. Τέλος η εξεταζόμενη μέθοδος για τη διαστασιολόγηση της ΑΓ δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε ότι αφορά την καμπύλη λειτουργίας για χαμηλό αιολικό δυναμικό, ενώ αποτυγχάνει να εκτιμήσει την ισχύ της ΑΓ υποτιμώντας ή υπερτιμώντας την πρόβλεψη ανάλογα με τη διακύμανση του φορτίου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία έχει υλοποιηθεί στο πλαίσιο του προγράμματος: Ενίσχυση Νέων και Μικρομεσαίων Επιχειρήσεων, ΕΣΠΑ 2007-2013, Έργο: 'Ανάπτυξη αυτόνομου υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ και συμβατικά καύσιμα'

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Sandia National Laboratories, 1991, "Stand-alone photovoltaic systems – a handbook of recommended design practices", SAND 87-7023.
- [2] Shrestha, G.B.. and Goel, L., 1998, "A study on optimal sizing of stand-alone photovoltaic stations", IEEE Trans Energy Convers., 13(4), pp. 373-8.
- [3] Al-Ashwal, A.M., and Moghram, I.S., 1997, "Proportion assessment of combined PV-wind generating systems", Renewable Energy, 10(1), pp. 43-51.
- [4] Maghraby, H.A.M., Shwehdi, M.H., and Al-Bassam, G.K., 2001, "Probabilistic assessment of photovoltaic (PV) generation systems", IEEE Trans power Syst., 17(1), pp. 205-8.
- [5] Lorenz, U., 1988, Elektrizitaetsversorgungsplanung for laendliche Gebiete in Entwicklungslaendern – Ein Optimierungsmodel, Springer Verlag, Berlin.
- [6] Markvart, T., 1996, "Sizing of hybrid PV-wind energy systems", Solar Energy, 59 (4), pp. 277-281.
- [7] Yang, H.X., Lu, L., and Zhou, W., 2007, "A novel optimization sizing model for hybrid solar-wind power generation system", Solar Energy, 81(1), pp. 76-84.
- [8] Koutroulis, E., Kolokotsa, D., Potirakis, A., and Kalaitzakis, K., 2006, "Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind –generator systems using genetic algorithms" Solar Energy, 80(9), pp. 1072-88.

- [9] Fragaki, A., and Markvart, T., 2008, "Stand alone PV system design: Result using a new sizing approach", *Renewable Energy*, 33(1), pp. 162-167.
- [10] Deshmukha, M.K., and Deshmukh, S.S., 2008, "Modeling of hybrid renewable energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, pp. 235-249.
- [11] Kaldellis, J.K., 2007, "An integrated model for performance simulation of hybrid wind diesel systems", *Renewable Energy*, 32, pp. 1544 -1564.
- [12] Kaldellis, J.K., Kondili, E., and Filios, A., 2006, "Sizing a hybrid wind-diesel stand-alone system on the basis of minimum long term electricity production cost", *Applied Energy*, 83, pp. 1384-1403.
- [13] Kaldellis, J.K., Kavadias, K.A., and Filios, A., 2009, "A new computational algorithm for the calculation of maximum wind energy penetration in autonomous electrical generation systems", *Applied Energy*, 86, pp. 1011-1023.
- [14] Kaldellis, J.K., Ninou, I., and Zafirakis, D., 2011, "Minimum long-term cost solution for remote telecommunication stations on the basis of photovoltaic-based hybrid power systems", *Energy Policy*, 39, pp. 2512-2527.
- [15] Kaldellis, J.K., 2010, "Optimum hybrid photovoltaic-based solution for remote telecommunication stations", *Renewable Energy*, 35, pp. 2307-2315.
- [16] Kaldellis, J.K., Spyropoulos, G.C., Kavadias, K.A., and Koronaki, I.P., 2009, "Experimental validation of autonomous PV-based water pumping system optimum sizing", *Renewable Energy*, 34, pp. 1106-1113.
- [17] Kaldellis, J.K., and Kostas, P., 2009, "Minimization of the Energy Storage Requirements of a Stand-alone Wind Power Installation by Means of Photovoltaic Panels", *Applied Energy*, 86, pp. 163-169.
- [18] Bataineh, K., and Dalalah, D., 2012, "Optimal configuration for design of stand-alone PV systems", *Smart Grid and Renewable Energy*, 3(1), pp 139-147.
- [19] Kolhe, M., 2009, "Techno-Economic Optimum sizing of a Stand-Alone Solar Photovoltaic System", *IEEE, Transactions on energy conversion*, 24(2), pp.511-519.
- [20] Seeling – Hochmuth, G., 1996, 'Small Village Hybrid Systems Performance Workshop', Expert Meeting, NREL, CO, US.
- [21] Hunter, R., and Elliot, G., 1999, *Wind-diesel systems. A guide to the technology and its implementation*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [22] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., and Bossanyi, E., 2001, *Wind Energy hand book*, Wiley, West Sussex.
- [23] HOMER ENERGY LLC, 2008, *Hybrid optimization model for electric renewables (HOMER)*, <http://www.nrel.gov/international/homer>.
- [24] U.S. Department of energy, 2012, *EnergyPlus Energy Simulation Software*, http://www.apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_testing.cfm.
- [25] TEE, 2010, TOTE 20701-3/2010 : Κλιματικά δεδομένα Ελληνικών περιοχών, Αθήνα.
- [26] Troen, I., and Petersen, E.L. 1989, 'European Wind Atlas', Commission of the European Communities, Directorate – General for Science, Research and Development, Brussels, Belgium.

ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΙΚΡΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΚΕΛΥΦΟΣ

I. Ανδριανόπουλος, Β. Καλογερόπουλος, Κ. Βαφειάδης, Α. Τουρλιδάκης*

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών,
Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας
50100, Κοζάνη, e-mail: atourlidakis@uowm.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι μικρές ανεμογεννήτριες μπορούν να αποτελέσουν μια σημαντική οικονομική και εύχρηστη πηγή ενέργειας για τον κτιριακό τομέα. Στο αστικό τοπίο η ροή του αέρα συναντά σημαντικά εμπόδια όπως για παράδειγμα την ύπαρξη συγκροτημάτων κτιρίων διαφορετικού ύψους και πυκνότητας. Για αυτόν τον λόγο επικρατούν ασταθείς συνθήκες ροής αέρα με μεγάλες μεταβολές τόσο στο μέγεθος της ταχύτητας όσο στη διεύθυνσή της και με μεγάλη ένταση τύρβης. Ως εκ τούτου είναι μεγάλο και το εύρος των τιμών της απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας υπό αυτές τις συνθήκες.

Ωστόσο, μία από τις μεθόδους που αναπτύχθηκαν για την αύξηση του βαθμού απόδοσης κυρίως μικρών ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα και την υπέρβαση του θεωρητικού ορίου του Betz είναι η εισαγωγή κελύφους σε σχήμα συγκλίνοντος – αποκλίνοντος ακροφυσίου. Η τεχνική αυτή μπορεί να επεκταθεί και στην περίπτωση ανεμογεννητριών κάθετου άξονα, ενώ μπορεί μέσω της ενσωμάτωσής τους στο κτιριακό κέλυφος να γίνει εκμετάλλευση υπαρχουσών γεωμετρικών ιδιοτήτων του κτιρίου. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση της διαδικασίας σχεδίασης, μελέτης και αεροδυναμικής ανάλυσης τέτοιων διατάξεων μέσω της υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Για βελτίωση της απόδοσης του διαχύτη στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα, τοποθετήθηκε στην έξοδο του μια στεφάνη (φλάντζα), η οποία εξομαλύνει τη ροή κατά μήκος του εσωτερικού του διαχύτη, επιτρέποντας μεγαλύτερες γωνίες διάχυσης. Στη συνέχεια, μεταβάλλοντας το ύψος της φλάντζας αλλά και την ταχύτητα του ανέμου, μελετήθηκαν οι επιδράσεις των ανωτέρω στην ανάπτυξη του ροϊκού πεδίου και στο συντελεστή ισχύος της ανεμογεννήτριας.

Η υπολογιστική μελέτη πραγματοποιήθηκε με χρήση του εμπορικού πακέτου ANSYS CFX και εφαρμογή κατάλληλων μοντέλων τύρβης. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν έδειξαν ότι υπάρχει μία σημαντική βελτίωση στην απόδοση των ανεμογεννητριών σε σχέση με τις ίδιες απουσία του κελύφους και η προτεινόμενη τροποποίηση είναι ιδιαίτερα ελκυστική για μικρές ανεμογεννήτριες.

Λέξεις Κλειδιά: ανεμογεννήτριες, κέλυφος με φλάντζα, Όριο Betz, Υπολογιστική Ρευστοδυναμική, βελτιστοποίηση συντελεστή ισχύος

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ενώ οι μεγάλης κλίμακας ανεμογεννήτριες εγκαθίστανται σε αιολικά πάρκα με γενικά υψηλές μέσες ταχύτητες ανέμου, οι μικρής κλίμακας ανεμογεννήτριες τοποθετούνται σε οποιοδήποτε σημείο υπάρχει απαίτηση για ενέργεια (π.χ. σε αστικό περιβάλλον με κτίρια) όπου οι επικρατούσες συνθήκες δεν είναι πάντα ευνοϊκές. Οι μικρές ανεμογεννήτριες προορίζονται σε μεγάλο βαθμό για να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια σε κτίρια. Η εγκατάσταση των ανεμογεννητριών σε ένα κτίριο έχει δυο κύριες πτυχές, την ενσωμάτωσή της στο κτιριακό κέλυφος και την αποδοτικότητα της ανεμογεννήτριας.

Το πρόβλημα της ενσωμάτωσης των ανεμογεννητριών στο κέλυφος του κτιρίου έχει μελετηθεί με σκοπό να αναπτυχθεί ένα μοντέλο που, α) θα ταιριάζει αισθητικά με το κτίριο, β) θα εξοικονομεί χώρο στο κτίριο και γ) θα εκμεταλλεύεται τη γεωμετρία του (από αεροδυναμικής πλευράς). Όσο αφορά το θέμα της αύξησης της αποδοτικότητας των ανεμογεννητριών που εγκαθίστανται σε αστικές περιοχές, το κύριο πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι ότι η ροή του ανέμου επηρεάζεται από τα κτίρια και έτσι είναι συνήθως ασταθής, με χαμηλή ταχύτητα και υψηλά επίπεδα τύρβης. Για να εξαχθεί λοιπόν ένα σημαντικό ποσό ισχύος από τέτοιες περιοχές με δυσμενείς ανεμολογικές συνθήκες, θα πρέπει οι χρησιμοποιούμενες ανεμογεννήτριες να έχουν σχεδιαστεί ειδικά για αυτό το σκοπό. Επειδή, η ισχύς που απομαστεύεται από τον άνεμο είναι ανάλογη της τρίτης δύναμης της ταχύτητας του ανέμου, οποιαδήποτε μικρή βελτίωση στην τιμή της ταχύτητας του ανέμου θα έχει μεγάλη επίδραση στην απόδοση της ανεμογεννήτριας. Πολλοί ερευνητές έχουν μελετήσει τρόπους και μεθόδους για να επιτύχουν μεγαλύτερη εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου από μικρής δυναμικότητας ανεμογεννήτριες μέσω επιτάχυνσης της ροής. Μελέτες σε αυτή τη κατεύθυνση έχουν πραγματοποιηθεί είδη από τη δεκαετία του '80 και περιλαμβάνουν τη προσθήκη διαχύτη σε μικρές ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα [1-4]. Μελέτες σαν και αυτές έχουν δείξει ότι το όριο του Betz (δηλαδή το μέγιστο ποσοστό αιολικής ενέργειας που μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του δρομέα είναι 59.3%) μπορεί να ξεπεραστεί κατά έναν παράγοντα ανάλογο του ποσού της παροχής μάζας που εξαναγκάζεται να διέλθει από τον δρομέα λόγω της ύπαρξης διαχύτη [5]. Από πειράματα και προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν σε ανεμογεννήτρια με περίβλημα μορφής διαχύτη (στην έξοδο) φάνηκε ότι ο συντελεστής ισχύος μπορεί να αυξηθεί μέχρι και τέσσερις φορές σε σχέση με αυτόν της ίδιας ανεμογεννήτριας χωρίς το περίβλημα [6-9]. Η απόδοση του διαχύτη σχετίζεται με το κατά πόσο λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της αποκόλλησης στο εσωτερικό του. Επίσης, η ύπαρξη του διαχύτη δρα θετικά στην επιτυχή διάσπαση των δινών που αναπτύσσονται στον ομόρρου του δρομέα. Μια άλλη διάταξη που μελετήθηκε είναι περίβλημα τύπου scoop, με μια συγκλίνουσα εισαγωγή έναν κύλινδρο στο εσωτερικό του οποίου τοποθετείται μια οικιακή ανεμογεννήτρια και μια έξοδο – διαχύτη [10]. Και αυτή η διάταξη παρουσιάζει αύξηση της παραγόμενης ισχύος λόγω της προσθήκης περιβλήματος. Αν και η περίπτωση της προσθήκης κελύφους σε ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχει μελετηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό, δυστυχώς, μόνο λίγοι ερευνητές έχουν διερευνήσει την επίδραση κελύφους σε ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα.

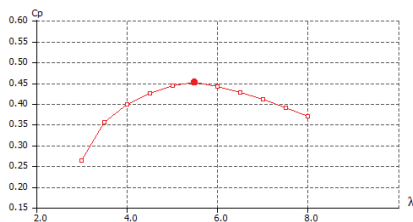
Μεταξύ των διαφόρων προσεγγίσεων για την υπολογιστική μελέτη της αεροδυναμικής των ανεμογεννητριών και των ανάντη και κατόπι ροικών πεδίων που αναλύονται εκταμμένα στις αναφορές [11-15], δυο ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι είναι η κλασική Μέθοδος Στοιχείων Πτερυγώσης (Blade Element Momentum – BEM) και η χρήση κωδίκων υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics – CFD). Η BEM βασίζεται σε ένα απλό θεωρητικό μοντέλο, μόνιμης ροής δυο διαστάσεων που για να καλύψει την τρισδιάστατη φύση των φαινομένων εφαρμόζει ημι-εμπειρικές διορθώσεις (οι οποίες βασίζονται σε πειραματικές μετρήσεις και υπολογιστικά αποτελέσματα) και χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση και τον υπολογισμό των επιδόσεων ανεμογεννητριών. Η υπολογιστική ρευστοδυναμική επιλύει τις εξισώσεις Reynolds-Averaged Navier-Stokes και τις εξισώσεις μοντελοποίησης της τύρβης. Λόγω των υψηλών υπολογιστικών απαιτήσεων των αναλύσεων CFD, η βιομηχανία

χρησιμοποιεί εργαλεία προκαταρκτικού σχεδιασμού και ανάλυσης που βασίζονται στην μέθοδο BEM. Σε αυτήν την μελέτη χρησιμοποιείται η μέθοδος BEM για τον σχεδιασμό και την ανάλυση του δρομέα μιας μικρής ανεμογεννήτριας, μέσω του ελεύθερου λογισμικού QBlade. Η υπολογιστική ανάλυση της ροής πραγματοποιήθηκε με τον εμπορικό κώδικα ANSYS CFX.

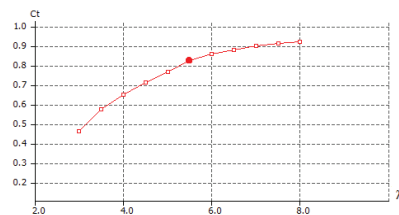
2. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

Για την παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκε μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα με τρία πτερύγια, ο δρομέας της οποίας έχει διάμετρο 1.32 m, ακτίνα πλήμνης 0.08 m και σχεδιάστηκε βάσει της μεθόδου BEM με το λογισμικό QBlade. Η δομή των πτερυγίων βασίζεται σε τρεις διαφορετικούς τύπους διατομών, οι οποίες αναπτύχθηκαν από το National Renewable Energy Laboratory (NREL) για χρήση σε δρομείς ανεμογεννητριών με διάμετρο 1-3 m [16]. Στον Πίνακα 1, παρουσιάζονται οι ακτινικές θέσεις και οι αντίστοιχες τιμές της χορδής, της γωνίας συστροφής και οι χρησιμοποιούμενες αεροτομές.

r (m)	c (m)	θ (°)	Σχήμα Διατομής
0.08	0.0600	0.00	Κύκλος
0.10	0.0600	0.00	Κύκλος
0.13	0.1300	21.82	NREL S835
0.15	0.1273	18.34	NREL S835
0.18	0.1150	14.30	NREL S835
0.22	0.1058	12.37	NREL S833
0.30	0.0804	7.53	NREL S833
0.48	0.0532	3.01	NREL S833
0.61	0.0465	0.34	NREL S834



(α)



(β)

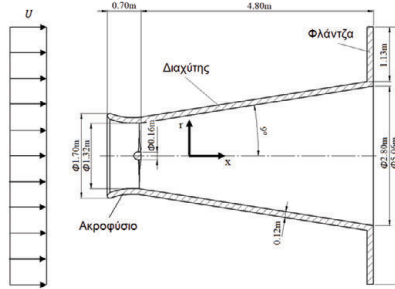
Σχήμα 1. Καμπύλες συντελεστή (α) ισχύος και (β) ώσης.

Ο δρομέας σχεδιάστηκε για περιστροφή με σταθερή ταχύτητα 600 RPM. Στο Σχήμα 1, παρουσιάζονται οι καμπύλες των συντελεστών ισχύος και ώσης σε σχέση με την αδιάστατη ταχύτητα ακροπτερυγίου, λ , η οποία ορίζεται από την Εξίσωση 1.

$$\lambda = \frac{2\pi\Omega R_o}{60U} \dots\dots\dots (1)$$

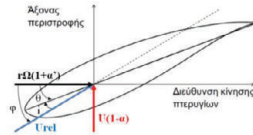
όπου, Ω είναι η περιστροφική ταχύτητα σε RPM, R_D είναι η ακτίνα των πτερυγίων του δρομέα και U είναι η ταχύτητα του ανέμου. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της μεθόδου BEM, η απόδοση του δρομέα είναι αρκετά ικανοποιητική για ταχύτητες ανέμου 5-10 m/s, με τον μέγιστο συντελεστή απόδοσης ≈ 0.45 , να εμφανίζεται για $U = 7 \text{ m/s}$ (ή $\lambda = 5.5$).

Η σχεδίαση του κελύφους (Σχ. 2) βασίζεται στον σχεδιασμό αντίστοιχων διατάξεων που παρουσιάστηκαν από ερευνητές σε άλλες εργασίες [6,7] και αποτελείται από μια συγκλίνουσα είσοδο (ακροφύσιο) και μια αποκλίνουσα έξοδο (διαχύτη) με φλάντζα στην έξοδο.



Σχήμα 2. Σκαρίφημα της διάταξης ανεμογεννήτριας-κελύφους.

Το QBlade βασίζεται στην Μέθοδο Στοιχείων Πτερύγωσης (BEM). Η μέθοδος αυτή απαιτεί ως είσοδο ένα αρχικό σύνολο αεροτομών, χορδών και γωνιών συστροφής για τις διάφορες ακτινικές θέσεις. Αυτό το σύνολο μπορεί είτε να διατηρηθεί ή να βελτιωθεί (σύμφωνα με τα κριτήρια της μεθόδου). Στην συνέχεια, εφαρμόζοντας τον επαναληπτικό αλγόριθμο της BEM μπορούν να υπολογιστούν τα χαρακτηριστικά του δρομέα για διάφορες ταχύτητες ανέμου. Το Σχήμα 3 δείχνει σχηματικά τις παραμέτρους της μεθόδου.



Σχήμα 3. Σχηματική αναπαράσταση των γωνιών και των παραμέτρων της μεθόδου BEM.

Ο αλγόριθμος της μεθόδου [17] περιγράφεται περιληπτικά παρακάτω. Για κάθε τιμή της ταχύτητας ακροπτερυγίου και για κάθε αδιάστατη τιμή της ακτινικής θέσης, $r^* = r/R_D$, εκτιμώνται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας οι συντελεστές επαγωγής, a και a' , του δρομέα. Εξετάζεται η σύγκλιση του αλγόριθμου και αν έχει συγκλίνει, υπολογίζονται οι συντελεστές ισχύος και ώσης της συγκεκριμένης ακτινικής θέσης: $C_P = 4a(1 - a)^2$ και $C_T = 4a(1 - a)$. Όταν ολοκληρωθεί ο υπολογισμός για όλες τις ακτινικές θέσεις, τότε είναι δυνατό να υπολογιστούν οι ολικόι συντελεστές ισχύος και ώσης, βάσει των Εξισώσεων 2 και 3.

$$C_{P\ total} = \frac{2}{R_D^2} \sum_{i=1}^N C_{P_i} r_i \Delta r_i \rightarrow P = C_{P\ total} 0.5 \rho U^3 \pi R_D^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$C_{T\ total} = \frac{2}{R_D^2} \sum_{i=1}^N C_{T_i} r_i \Delta r_i \rightarrow T = C_{T\ total} 0.5 \rho U^2 \pi R_D^2 \dots\dots\dots (3)$$

3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Οι διέπουσες εξισώσεις του ροϊκού πεδίου, οι οποίες επιλύονται από τον επιλύτη του ANSYS CFX, είναι οι εξισώσεις συνέχειας (Εξ. 4) και διατήρησης της ορμής (Εξ. 5).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla (\rho \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_M \quad \dots\dots\dots (5)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, ρ , είναι η πυκνότητα, \mathbf{u} , είναι το διάνυσμα της ταχύτητας, p , είναι η πίεση, $\boldsymbol{\tau}$, είναι ο τανυστής των τάσεων και \mathbf{S}_M , ένας όρος πηγών. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μελέτη μόνιμης και ασυμπίεστης ροής, η μορφή των Εξ. 4 και 5, τροποποιείται ώστε να απαλειφθούν οι μεταβατικοί όροι και η πυκνότητα του αέρα να είναι σταθερή.

Για την προσομοίωση της επίδρασης της τύρβης, χρησιμοποιείται το μοντέλο Shear Stress Transport (SST), ένα από τα ευρύτερα χρησιμοποιούμενα μοντέλα τύρβης δυο εξισώσεων. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά με συμβολισμό δεικτών, οι εξισώσεις του μοντέλου, για την τυρβώδη κινητική ενέργεια, k , και το ρυθμό σκέδασής της, ω .

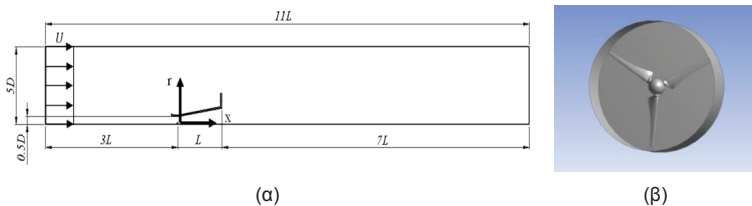
$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_3 \rho \omega^2 + P_{\omega b} \quad (7)$$

Η τιμή της F_1 , είναι ίση με το μηδέν μακριά από το τοίχωμα (μοντέλο k-ε) και ίση με την μονάδα μέσα στο οριακό στρώμα (μοντέλο k-ω). Οι αναλυτικές εκφράσεις που δίνουν τους διάφορους παράγοντες και τις σταθερές του μοντέλου παρουσιάζονται εκτενώς στις εργασίες [18-20].

3.1. ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ

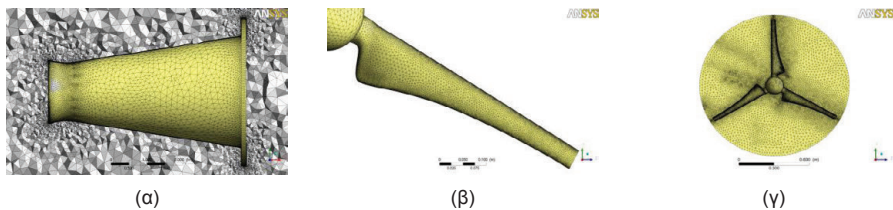
Κάθε προσομοίωση αφορά μόνιμη ροή. Το υπολογιστικό πεδίο έχει κυλινδρικό σχήμα με διάμετρο 11 φορές τη διάμετρο του διαχύτη, D , και μήκος επίσης 11 φορές το μήκος του διαχύτη, L (Σχ. 4.α). Το πεδίο αποτελείται από μια σταθερή και μια περιστρεφόμενη περιοχή. Και στις δυο περιοχές το ρευστό είναι αέρας σε θερμοκρασία 25°C. Η πίεση αναφοράς είναι 1 atm. Το υπολογιστικό πεδίο διέπεται από δυο συστήματα αναφοράς, ένα σταθερό και ένα περιστρεφόμενο. Ο διαχύτης ανήκει στη σταθερή περιοχή του πεδίου και οι εξισώσεις επιλύονται στο σταθερό σύστημα αναφοράς. Η περιοχή που διέπεται από το περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς είναι ένας δίσκος, μέσα στον οποίο υπάρχει ο δρομέας (Σχ. 4.β) και περιστρέφεται με ταχύτητα ίση με αυτή του δρομέα. Για ευκολία, το σύστημα υποστήριξης του δρομέα μέσα στον διαχύτη δεν περιλαμβάνεται στο μοντέλο της μελέτης.



Σχήμα 4. (α) Διαστάσεις του υπολογιστικού πεδίου. (β) Η περιστρεφόμενη περιοχή του πεδίου.

Στις διεπιφάνειες μεταξύ του σταθερού και του περιστρεφόμενου μέρους του χωριού, εφαρμόζεται το μοντέλο Frozen Rotor. Στις επιφάνειες των τοιχωμάτων του κελύφους, των πτερυγίων και της πλήμνης του δρομέα εφαρμόζονται οριακές συνθήκες μη ολίσθησης (no slip walls). Στην είσοδο του υπολογιστικού πεδίου ορίζεται σταθερή τιμή και διεύθυνση για την ταχύτητα ενώ στην έξοδο του ορίζεται η σχετική στατική πίεση ίση με 0 Pa.

Το υπολογιστικό πλέγμα δημιουργήθηκε με χρήση του εργαλείου ANSYS Meshing και αποτελείται από τετράεδρα κελιά κατάλληλα πυκνωμένα σε περιοχές καμπυλότητας και εγγύτητας μεταξύ τοιχωμάτων. Για την ανάλυση του οριακού στρώματος χρησιμοποιήθηκαν πρισματικά κελιά τα οποία σχηματίζουν στρώμα συνολικού πάχους 2 cm (συντελεστής μεγέθυνσης των κελιών 1.2). Η ανάλυση του οριακού στρώματος από υπολογιστικό πλέγμα έγινε έτσι ώστε να υπάρχουν τουλάχιστον 10 κελιά εντός του οριακού στρώματος. Για την προσομοίωση του απομονωμένου δρομέα χρησιμοποιήθηκαν ≈ 4.8 εκατομμύρια κελιά, για την πλήρη διάταξη χωρίς φλάντζα χρησιμοποιήθηκαν ≈ 8.5 εκατομμύρια κελιά ενώ για τις διατάξεις με φλάντζα χρησιμοποιήθηκαν ≈ 10 εκατομμύρια κελιά. Τα πλέγματα αυτά παρουσίασαν μια ανεξάρτητη του πλέγματος λύση. Στο Σχήμα 5, απεικονίζονται λεπτομέρειες του υπολογιστικού πλέγματος.

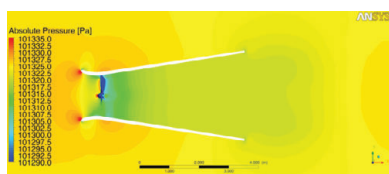


Σχήμα 5. Λεπτομέρειες του πλέγματος: (α) Το πλέγμα του σταθερού μέρους. Το πλέγμα της επιφάνειας των πτερυγίων. (γ) Το πλέγμα του περιστρεφόμενου μέρους.

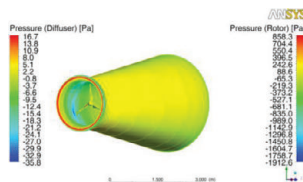
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Αρχικά, η ανάλυση απομονωμένου δρομέα έδειξε ότι ο προτεινόμενος σχεδιασμός πτερυγίων επιδεικνύει πολύ καλή αεροδυναμική συμπεριφορά με καλές συνθήκες πρόσπτωσης και επιφόρτισης των πτερυγίων σε όλες τις θέσεις επί του πτερυγίου. Επιπλέον, μελετήθηκε η ροή στο κέλυφος (με και χωρίς φλάντζα) απουσία του δρομέα με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση του στη ροή αέρα. Στην εισαγωγή του απομονωμένου κελύφους παρατηρείται μια μεγάλη επιτάχυνση της ροής (από 5 m/s στην είσοδο σε περίπου 18 m/s στον λαιμό), η οποία ακολουθείται από μια ομαλή ανάκτηση πίεσης στην περιοχή του διαχύτη.

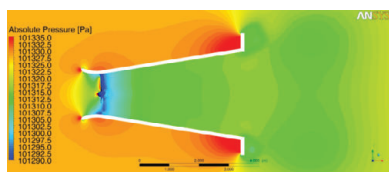
Στην συνέχεια δοκιμάστηκαν τρεις διαφορετικές εκδοχές της πλήρους διάταξης (κέλυφος χωρίς φλάντζα, κέλυφος με φλάντζα ύψους 0.056 m και κέλυφος με φλάντζα ύψους 1.13 m). Στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται, η κατανομή στατικής πίεσης στο μέσο επίπεδο της πλήρους διάταξης ανεμογεννήτριας-κελύφους (Σχ. 6.α, 6.γ και 6.ε) και στις στερεές επιφάνειες του κελύφους και του δρομέα (Σχ. 6.β, 6.δ και 6.στ). Διακρίνονται παρόμοια πρότυπα ροής σε σύγκριση με αυτά του απομονωμένου κελύφους. Η φλάντζα προκαλεί μια σημαντική πτώση πίεσης στην έξοδο του διαχύτη και αυτό οδηγεί σε μειωμένη στατική πίεση στην έξοδο του κελύφους, προσφέροντας έτσι τις κατάλληλες συνθήκες για αυξημένη παραγωγή έργου στον δρομέα. Επιπλέον, η μεγαλύτερη φλάντζα προκαλεί ένα σημαντικό εμπόδιο στην εξωτερική ροή καθιστώντας έτσι τη δίοδο δια μέσω της διάταξης μια ευκολότερη διαδρομή κίνησης του ρευστού και ενισχύοντας έτσι την παραγωγή ενέργειας από τον δρομέα της ανεμογεννήτριας.



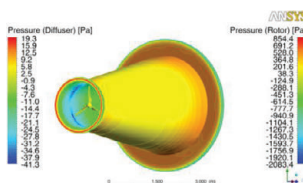
(α)



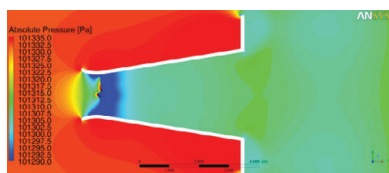
(β)



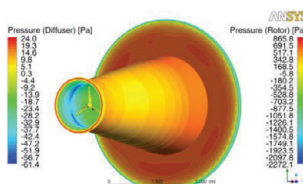
(γ)



(δ)

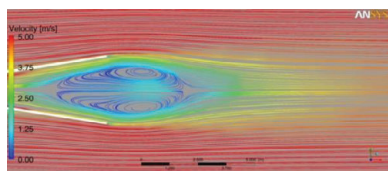


(ε)

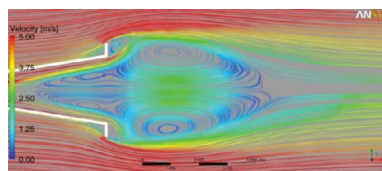


(στ)

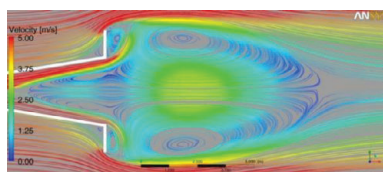
Σχήμα 6. (α), (γ), (ε) Κατανόμή στατικής πίεσης στο μέσο επίπεδο της πλήρους διάταξης για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις κελύφους. (β), (δ), (στ) Κατανόμή στατικής πίεσης στις στερεές επιφάνειες της διάταξης για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις κελύφους.



(α)



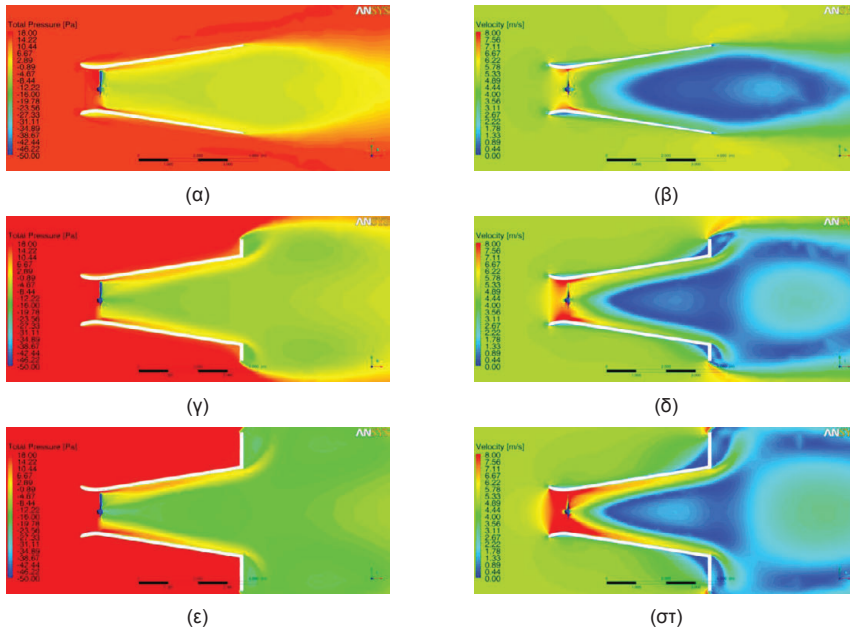
(β)



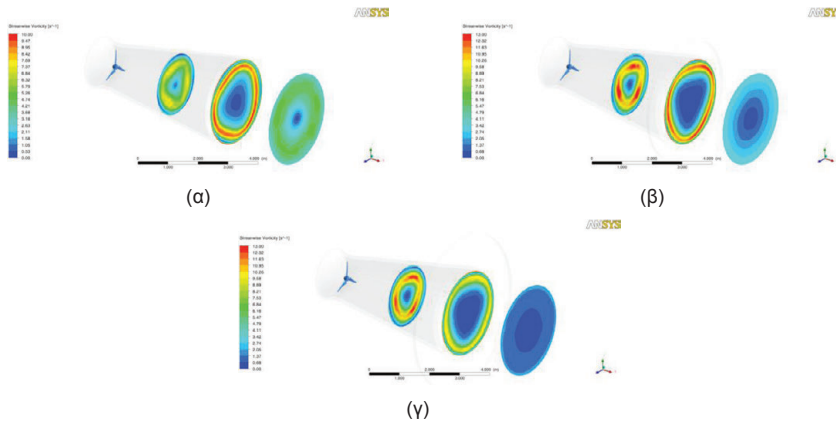
(γ)

Σχήμα 7. Ροϊκές γραμμές στην έξοδο της διάταξης (α) χωρίς φλάντζα, (β) με φλάντζα ύψους 0.056 m και (γ) με φλάντζα ύψους 1.13 m.

Το Σχήμα 7 παρουσιάζει ροϊκές γραμμές στην έξοδο της διάταξης. Και για τις τρεις περιπτώσεις, μια εκτενής περιοχή ανακυκλοφορίας προβλέπεται να αναπτυχθεί στο κέντρο της εξόδου της διάταξης, καθώς αναπτύσσονται δυο αντίστροφα περιστρεφόμενες δίνες.



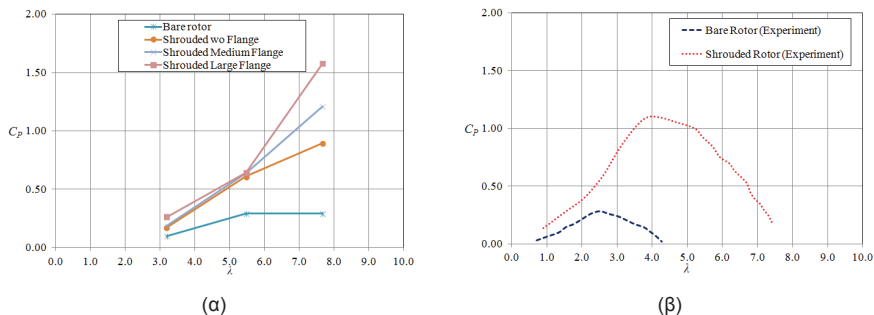
Σχήμα 8. (α), (γ), (ε) Κατανομή ολικής πίεσης στο μέσο επίπεδο της πλήρους διάταξης για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις κελύφους. (β), (δ), (στ) Κατανομή μεγέθους της ταχύτητας του ρευστού για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις κελύφους.



Σχήμα 9. Κατανομή στροβιλότητας 2.5 m, 5 m και 7.5 m κατάντη του δρομέα (α) χωρίς φλάντζα, (β) με μικρή φλάντζα και (γ) με μεγάλη φλάντζα.

Η κατανομή ολικής πίεσης και του μεγέθους της ταχύτητας για κάθε μια από τις τρεις περιπτώσεις παρουσιάζεται στο Σχήμα 8. Η φλάντζα ευθύνεται για μεγάλη μείωση της ολικής πίεσης. Η ύπαρξη μεγάλης περιοχής ρευστού που ανακυκλοφορεί κεντρικά, σε μέρος του διαχύτη, αναγκάζει τη ροή να κινηθεί προς τα τοιχώματα του κελύφους και να επιταχύνει κατά μήκος αυτών. Οι μέγιστες τιμές της στροβιλότητας εμφανίζονται σε περιοχές της ροής μέσα στον διαχύτη και οφείλονται στη διάτμηση η οποία αναπτύσσεται μεταξύ της ταχέως κινούμενης ροής πλησίον των τοιχωμάτων και της περιοχής ανακυκλοφορίας κατά μήκος του διαχύτη (Σχ. 9).

Ο συντελεστής ισχύος που υπολογίστηκε παρουσιάζεται στο Σχήμα 10.α. Η παρουσία του κελύφους βελτιώνει σημαντικά την παραγόμενη ισχύ από τον δρομέα της ανεμογεννήτριας, ενώ περαιτέρω βελτίωση επιτυγχάνεται μέσω της προσθήκης φλάντζας στην έξοδο του διαχύτη. Η παραγόμενη ισχύς βελτιώθηκε κατά έναν παράγοντα από 2 έως 5. Αυτό μπορεί αρχικά να αποδοθεί στην υψηλότερη τιμή της ταχύτητας που προσεγγίζει τον δρομέα λόγω της επιτάχυνσης που λαμβάνει χώρα στο συγκλινόν μέρος του κελύφους και στην μικρότερη στατική πίεση κατάντη του δρομέα λόγω της παρουσίας του διαχύτη. Προκειμένου να παραχθούν οι καμπύλες του Σχ. 10, έγινε ανάλυση της απόδοσης του δρομέα για τρεις διαφορετικές ταχύτητες ανέμου. Τα χαρακτηριστικά απόδοσης που επιτεύχθηκαν συμφωνούν πολύ καλά με τα αποτελέσματα που έχουν παρουσιαστεί σε άλλες εργασίες [7] και παρουσιάζονται στο Σχήμα 10.β. Η διαφορά μεταξύ των ακριβών τιμών συντελεστών ισχύος και της αδιάστατης ταχύτητας ακροπερυγίου, μεταξύ της παρούσας εργασίας και των αποτελεσμάτων της εργασίας [7] οφείλονται στη διαφορετική αεροδυναμική σχεδίαση των δρομέων των ανεμογεννητριών.



Σχήμα 10. Σύγκριση του συντελεστή ισχύος σε σχέση με την αδιάστατη ταχύτητα ακροπερυγίου (α) για τις τέσσερις υπό μελέτη περιπτώσεις και (β) για τα πειραματικά αποτελέσματα της εργασίας [7].

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η υπολογιστική διερεύνηση της επίδρασης ενός κελύφους με φλάντζα στην απόδοση μιας ανεμογεννήτριας επέδειξε ότι μπορούν να επιτευχθούν μεγάλες βελτιώσεις στην απόδοση και να ξεπεραστεί το όριο του Betz. Η παρουσία του κελύφους επιτρέπει την μείωση της στατικής πίεσης κατάντη του δρομέα (σε σύγκριση με την λειτουργία απομονωμένου δρομέα) οδηγώντας σε βελτιωμένη απομάστευση ενέργειας από το ρευστό. Η προσθήκη φλάντζας στην έξοδο τροποποιεί τη μορφή της ροής προκαλώντας μεγαλύτερη μείωση πίεσης στο εσωτερικό του διαχύτη, κάτι που βελτιώνει την παραγωγή μηχανικού έργου από τον δρομέα. Η προσθήκη κελύφους αποδεικνύεται μια χρήσιμη τροποποίηση για μικρές ανεμογεννήτριες, ειδικά σε περιοχές όπου η διεύθυνση του ανέμου είναι σχετικά σταθερή, προσανατολίζοντας την μηχανή στη διεύθυνση αυτή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Foreman, K.M., Gilbert, B.L., Oman, R.A., 1978. "Diffuser augmentation of wind turbines". *Solar Energy*, **20**(4), pp. 305-311.
- [2] Igra, O., 1981. "Research and development for shrouded wind turbines". *Energy Conv. & Mgmt.*, **21**(1), pp 13-48.
- [3] Fletcher, C.A.J., 1981. "Computational analysis of diffuser-augmented wind turbines", *Energy Conv. & Mgmt*, **21**(3), pp 175-183.
- [4] Gilbert, B.L., Foreman, K.M., 1983. "Experiments with a diffuser-augmented model wind turbine". *Trans. ASME J. Energy Res. Technol.*, **105**(1), pp. 46-53.
- [5] Hansen, M.O.L., Sorensen, N.N., Flay, R.G.J., 2000. "Effect of placing a diffuser around a wind turbine". *Wind Energy*, **3**(4), pp. 207-213.
- [6] Abe, K., Ohya, Y., 2004. "An investigation of flow fields around flanged diffusers using CFD". *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **92**(3-4), pp. 315-330.
- [7] Abe, K., Nishida, M., Sakurai, A., Ohya, Y., Kihara, H., Wada, E., Sato, K., 2005. "Experimental and numerical investigations of flow fields behind a small wind turbine with a flanged diffuser". *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **93**(12), pp. 951-970.
- [8] Ohya, Y., Karasudani, T., Sakurai, A., Abe, K., Inoue M., 2008. "Development of a shrouded wind turbine with a flanged diffuser". *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **96**(5), pp. 524-539.
- [9] Matsushima, T., Takagi, S., Muroyama, S., 2006. "Characteristics of a highly efficient propeller type small wind turbine with a diffuser". *Renewable Energy*, **31**(9), pp. 1343-1354.
- [10] Wang, F., Bai, L., Fletcher, J., Whiteford, J., Cullen, D., 2008. "The methodology for aerodynamic study on a small domestic wind turbine with scoop". *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, **96**(1), pp 1-24.
- [11] Sanderse, B., van der Pijl, S.P., Koren, B., 2011. "Review of computational fluid dynamics for wind turbine wake aerodynamics". *Wind Energy*, **14**(7), pp. 799-819.
- [12] Vermeer, L.J., Sørensen, J.N., Crespo, A., 2003. "Wind turbine wake aerodynamics". *Progress in Aerospace Sciences*, **39**(6-7), pp. 467-510.
- [13] Crespo, A., Hernández, J., Frandsen, S., 1999. "Survey of modelling methods for wind turbine wakes and wind farms". *Wind Energy*, **2**(1), pp. 1-24.
- [14] Snel, H., 2003. "Review of Aerodynamics for Wind Turbines. *Wind Energy*", **6**(3), pp. 203-211.
- [15] Hansen, M.O.L., Sørensen, J.N., Voutsinas, S., Sørensen, N., Madsen, H.A., 2006. "State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity". *Progress in Aerospace Sciences*, **42**(4), pp. 285-330.
- [16] Somers, D.M., 2005. "The S833, S834, and S835 Airfoils: November 2001–November 2002". Airfoils, Inc.
- [17] Hansen, M.O.L., 2008, *Aerodynamics of Wind Turbines - 2nd ed.*, Earthscan, UK.
- [18] ANSYS, 2010. *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*. Tech. rep., ANSYS Inc.
- [19] Menter, F.R., 1994. "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications". *AIAA Journal*, **32**(8), August 1994, pp. 1598-1605.
- [20] Menter, F.R., Kuntz, M., Langtry, R., 2003. "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model". *Proc. Turbulence Heat an Mass Transfer*, Eds. Hanjalic, Nagano, Tummers, Antalya, 2003.

ΣΙΦΩΝΕΣ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ - ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ

Κ. Γκαράκης^{1*}, Μ. Σιούτας²

^{1*}Εργαστήριο ΑΠΕ, Τμήμα Μηχανικών Ενεργειακής Τεχνολογίας, ΤΕΙ Αθήνας
Αγ. Σπυρίδωνος 17, 12210 Αιγάλεω
ape@teiath.gr

²ΕΛΓΑ - Κέντρο Μετεωρολογικών Εφαρμογών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η εξέταση της εμφάνισης των σιφώνων ξηράς και θάλασσας στην Ελλάδα την περίοδο της 14ετίας 2000-2013 (χωρική και χρονική κατανομή) και η διερεύνηση των βασικών χαρακτηριστικών τους καθώς και της συχνότητας εμφάνισης τους για τις περιφερειακές ενότητες της χώρας. Επίσης, γίνεται σύγκριση των δεδομένων σιφώνων με τα όρια των τριών κλάσεων α/γ, καθώς, και για τις περιοχές που αναπτύσσονται Α/Π. Εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τους κινδύνους που διατρέχει μια αιολική εγκατάσταση, και τις συνέπειες από την εμφάνιση ενός σίφωνα.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, η κλιματολογία των σιφώνων ξηράς και θάλασσας και τα δεδομένα κινδύνου του φαινομένων αυτών για τις διάφορες περιοχές, θα πρέπει να ενταχθούν στις τεχνικό-οικονομικές αναλύσεις των Α/Π και στην Ελλάδα.

Λέξεις Κλειδιά: σίφωνες, IEC 61400-1, ανεμογεννήτριες, αιολικά πάρκα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σίφωνες ξηράς και θάλασσας (ισχυροί ανεμοστρόβιλοι) σημειώνονται σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας και η έρευνα των τελευταίων ετών απέδειξε ότι δεν είναι τόσο σπάνιο φαινόμενο όσο θεωρούνταν παλαιότερα [1]. Η επιστημονική έρευνα και συστηματική καταγραφή των φαινομένων αυτών στη χώρα μας πραγματοποιείται την τελευταία 15ετία. Με βάση τα δεδομένα αυτής της περιόδου στη χώρα μας κατά μέσο σημειώνονται σίφωνες ξηράς ή θάλασσας ή σιφωνοειδή νέφη σε περίπου 50 ημέρες το χρόνο, κατά μέσο όρο. Η εξέταση της γεωγραφικής διανομής τους έδειξε ότι οι σίφωνες ξηράς εμφανίζονται σχεδόν σ' όλες τις περιοχές, αλλά με μεγαλύτερη συχνότητα στα νησιά του Ιονίου και στις παραλιακές περιοχές της Δυτικής Ελλάδας, καθώς επίσης στις πεδινές περιοχές της Θεσσαλίας και Μακεδονίας. Η μέγιστη συχνότητα των σιφώνων ξηράς εμφανίζεται στη βορειοδυτική Πελοπόννησο και συγκεκριμένα στην περιοχή της Ηλείας.

Οι σίφωνες θάλασσας εμφανίζονται σ' όλες της θαλάσσιες περιοχές, τόσο στο Αιγαίο όσο και στο Ιόνιο πέλαγος, αλλά με μεγαλύτερη συχνότητας στις θαλάσσιες περιοχές βόρεια του Ηρακλείου Κρήτης, στην Κέρκυρα και στη Ρόδο. Σε ότι αφορά τους ισχυρούς και ιδιαίτερα καταστρεπτικούς σίφωνες δηλ. έντασης τουλάχιστον F2 της κλίμακας Fujita, αυτοί εμφανίζονται κατά μέσο όρο 6 ημέρες το χρόνο σε διάφορες περιοχές της χώρας [2].

Οι ανεμογεννήτριες (α/γ) κατατάσσονται σε τρεις κλάσεις ανάλογα το αιολικό δυναμικό στην θέση εγκατάστασης τους (κλάση 1 : υψηλό αιολικό δυναμικό, κλάση 2: μέτριο αιολικό δυναμικό και κλάση 3 για χαμηλό αιολικό δυναμικό). Το πρότυπο IEC 61400-1 θέτει τους παράγοντες που πρέπει να ελέγχονται για την εγκατάσταση μιας α/γ μέσω μελέτης καταλληλότητας (site compliance study). Η μελέτη αυτή πραγματοποιείται για τον συγκεκριμένο τύπο α/γ για την δεδομένη περιοχή εγκατάστασης του αιολικού πάρκου (Α/Π) και την συγκεκριμένη χωροθέτηση βασισμένη στα σχεδιαστικά όρια της α/γ. Η σχεδίαση της α/γ εγγυάται ότι μπορεί να ανταπεξέλθει με ασφάλεια στις περιβαλλοντικές συνθήκες της περιοχής εγκατάστασης.

Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες της μελέτης καταλληλότητας α/γ είναι η εκτίμηση των ακραίων τιμών ανέμου (V_{ref} - ταχύτητα αναφοράς της κλάσης (10min)). Μια α/γ που σχεδιάζεται για μία κλάση με ταχύτητα αναφοράς V_{ref} αναμένεται να λειτουργεί ασφαλώς σε κλιματολογικές συνθήκες όπου η ακραία δεκάλεπτη τιμή της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος του άξονα του δρομέα και για περίοδο επανεμφάνισης 50 ετών είναι μικρότερη ή ίση της V_{ref} . Η παράμετρος V_{ref} είναι στοχαστική εκφρασμένη σε πιθανοτικούς όρους. Η τιμή της είναι πιθανή αλλά όχι ακριβής. Η συγκεντρωτική πιθανότητα εμφάνισης ακραίων τιμών αέρα είναι αναγκαία για τον υπολογισμό της V_{ref} . Ο υπολογισμός πραγματοποιείται μέσω των στατιστικών μεθόδων POT-N (Method of Independent Storms-MIS) και Gumbel. Όπως είναι γνωστό οι στατιστικές μέθοδοι που στηρίζονται σε ανεμολογικές μετρήσεις μερικών ετών δεν είναι δυνατό να δώσουν προβλέψεις για βίαια φυσικά φαινόμενα όπως οι σίφωνες.

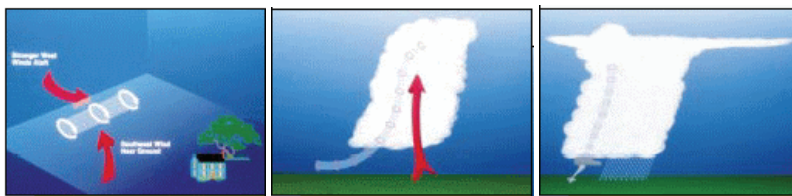
Το αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η μελέτη της εμφάνισης των σιφώνων στην Ελλάδα την περίοδο της 14ετίας 2000-2013 (χωρική και χρονική κατανομή) και η διερεύνηση των βασικών χαρακτηριστικών τους καθώς και της συχνότητας εμφάνισης τους ανά περιφερειακή ενότητα. Επίσης πραγματοποιείται σύγκριση των προαναφερθέντων δεδομένων με τα όρια των τριών κλάσεων α/γ αλλά και τις περιοχές που αναπτύσσονται Α/Π και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τους κινδύνους που διατρέχει μια αιολική εγκατάσταση αλλά και τις συνέπειες που μπορεί να έχει η εμφάνιση ενός σίφωνα.

2. ΣΙΦΩΝΕΣ ΞΗΡΑΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

2.1. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΣΙΦΩΝΩΝ

Οι σίφωνες είναι από τα πλέον βίαια φαινόμενα μικρής κλίμακας και χαρακτηρίζονται από έντονα περιστροφικούς ανέμους σε μικρή οριζόντια έκταση και είναι ένα από τα πλέον καταστροφικά ατμοσφαιρικά φαινόμενα.

Ο σίφωνας εκδηλώνεται κατά κανόνα πάνω από επίπεδη έκταση κοντά σε ισχυρές καταιγίδες καθώς και σε περιοχές που συναντιούνται και συγκρούονται ιδιαίτερα ψυχρές με ιδιαίτερα θερμές και υγρές αέριες μάζες όπως για παράδειγμα κατά τη διέλευση ενός ψυχρού μετώπου. Ως κατάλληλες συνθήκες θεωρούνται η ύπαρξη μια θερμής και πλούσιας σε υγρασία αέριας μάζας κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, η ύπαρξη ενός έντονου ανοδικού ρεύματος και η αλλαγή της διεύθυνσης του ανέμου καθ' ύψος. Καθώς ο άνεμος αλλάζει διεύθυνση με το ύψος, σχηματίζεται αρχικά ένας αόρατος κύλινδρος (σχήμα 1). Στη συνέχεια το ανοδικό ρεύμα παρασύρει μέρος αυτού του περιστρεφόμενου κυλίνδρου προς μεγαλύτερα ύψη, μέχρι να φθάσει στο ύψος των νεφών (σχήμα 2). Καθώς ο ανερχόμενος θερμός αέρας συναντά τον ψυχρό αέρα των νεφών αρχίζει να συμπυκνώνεται σχηματίζοντας γύρω από τον περιστρεφόμενο κύλινδρο νέφος. Το νέφος που σχηματίζεται κάνει ορατό πλέον τον περιστρεφόμενο κύλινδρο σχηματίζοντας την χαρακτηριστική νεφική χοάνη (σχήμα 3).



Σχήματα 1-3 (από αριστερά προς τα δεξιά): Σχηματισμός σίφωνα [3].

Αν ο σίφωνας εκδηλωθεί πάνω από στεριά ονομάζεται σίφωνας ξηράς ή ανεμοστρόβιλος. Πρόκειται για μια μικρή αέρια μάζα που περιστρέφεται ταχύτητα σε ένα περίπου κατακόρυφο άξονα γύρω από μια μικρή περιοχή πολύ χαμηλής ατμοσφαιρικής πίεσης. Γίνεται ορατός όταν η νεφική μάζα, σκόνη και παρασυρόμενα αντικείμενα αρχίζουν να εισρέουν στην περιστρεφόμενη αυτή αέρια μάζα.

Ο σίφωνας θάλασσας ή λίμνης είναι μια περιστρεφόμενη στήλη αέρα πάνω από την υδάτινη επιφάνεια και συνήθως μικρότερων διαστάσεων, μικρότερης έντασης και διάρκειας ζωής από τους σίφωνες ξηράς. Περιέχει αρκετές ποσότητες νερού μαζί με το περιεχόμενο του που μπορεί να είναι ψάρια, βατράχια κ.λ.π. Συνήθως σχετίζονται με νέφη αστάθειας (πυρογείδεις σωρείτες ή σωρειτομελανίτες), αλλά εμφανίζονται και με απουσία νεφών. Η υψηλή θερμοκρασία στην επιφάνεια του νερού προκαλεί αστάθεια των χαμηλότερων στρωμάτων της ατμόσφαιρας και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να δημιουργούνται έντονα ρεύματα αέρα που στροβιλίζονται και δίνουν αυτό το φαινόμενο. Συχνά, βγαίνουν στην ξηρά και διαλύονται ωστόσο μπορούν να ισχυροποιηθούν. Χωνοειδές νέφος (funnel cloud) είναι ο σίφωνας που δεν φτάνει στο έδαφος.

Το σχήμα των σιφώνων ποικίλει, μπορεί να είναι κυλινδρικοί, λεπτοί, αιωρούμενοι, σχοινοειδούς μορφής. Ένας τυπικός σίφωνας στο έδαφος έχει διάμετρο που ξεπερνά τα 100 μέτρα, ανέμους έντασης μέχρι 180 χλμ/ώρα (50m/s) και χρόνο ζωής από τρία ως δεκαπέντε λεπτά, ενώ ένας σφοδρός σίφωνας π.χ. της Βόρειας Αμερικής μπορεί να έχει διάμετρο που να φτάνει τα 1500 μέτρα και ταχύτητα ανέμου τα 500 χλμ/ώρα (139m/s) και χρόνο ζωής πάνω από 2 ώρες. Οι σίφωνες κινούνται με ταχύτητες της τάξης των 50 χλμ/ώρα και μπορούν να φθάσουν και τα 200 χλμ/ώρα. Στην πλειονότητα τους κινούνται από νοτιοδυτικές διευθύνσεις συνδεδεμένοι με ισχυρή καταιγίδα ή υπερκύτταρο (βαριές καταιγίδες).

2.2. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ

Οι σίφωνες είναι δύσκολο να παρατηρηθούν και να αναγνωριστούν αφού είναι φαινόμενα μικρής κλίμακας. Πολλές φορές είναι αδύνατο η εμφάνισή τους να επιβεβαιωθεί λόγω της ανάπτυξής τους σε ερημικές περιοχές, έλλειψη αυτόπτη μάρτυρα ή ζημιών, της νύχτας και την απόκρυψη τους από εμπόδια (ορεινοί όγκοι, κτίρια κα)[1].

Η εμφάνιση των σιφώνων μπορεί να επιβεβαιωθεί από διάφορες αξιόπιστες πληροφορίες και δεδομένα κυρίως όμως με την επιτόπια εξέταση της ζημιάς, φωτογραφίες, βίντεο και αξιόπιστες περιγραφές μαρτύρων. Η μεθοδολογία που ακολουθείται στη διερεύνηση για την

επιβεβαίωση και καταγραφή των συμβάντων σιφώνων, περιλαμβάνει αξιολόγηση με πολύ προσοχή διαφόρων πληροφοριών (εξέταση ζημιάς, φωτογραφία, βίντεο, αναφορά αυτόπτη μάρτυρα, αναφορά ζημιά σίφωνα κ). Η εξέταση της ζημιάς περιλαμβάνει τον προσδιορισμό διαφόρων χαρακτηριστικών των σιφώνων, όπως η διαδρομή τους, το μήκος και το πλάτος της ζημιάς, η διεύθυνση κίνησης και το είδος και το επίπεδο της ζημιάς καθώς και η κατηγοριοποίηση του σύμφωνα με τις κλίμακες FUJITA και TORRO [1].

Συστηματική προσπάθεια και η δημιουργία της πρώτης βάσης δεδομένων σιφώνων στην Ελλάδα ξεκίνησε το 2000, με τη χρήση πολλών πηγών δεδομένων και πληροφοριών. Σημαντικές πηγές αποτελούν πληροφορίες πολιτών-αυτόπτων μαρτύρων, φωτογραφίες, βίντεο, αναφορές ζημιών σε ΜΜΕ και ιστοσελίδες, επιτόπια εξέταση ζημιών σε συνδυασμό με μαρτυρίες, δεδομένα της ΕΜΥ, του ΕΛΓΑ, πληροφορίες από διάφορους δημόσιους και ιδιωτικούς φορείς.

Στην ιστοσελίδα της Ευρωπαϊκής Βάση Δεδομένων Ισχυρών Καιρικών Φαινομένων [4] υπάρχει καταγραφή και των σιφώνων στον Ελλαδικό χώρο ενώ υπάρχει και η ιστοσελίδα του Παγκοσμίου Κέντρου για την έρευνα των σιφώνων θάλασσας [5] που ασχολείται με την καταγραφή, μελέτη και την έρευνα αυτών των φαινομένων. Επιπλέον χρήσιμες πηγές πληροφοριών για σίφωνες στην Ελλάδα είναι οι ιστοσελίδες ερασιτεχνών μετεωρολόγων και παρατηρητών [6], [7].



Εικόνα 1: Σίφωνας θάλασσας στη θάλασσα περιοχή του Αγ. Όρους (9/2014).



Εικόνα 2: Χωνοειδές νέφος στον Ασπρόπυργο Αττικής (9/2014).

Οι συνέπειες των σιφώνων είναι συχνά καταστροφικές λόγω των ισχυρών ανέμων που τους συνοδεύουν. Κατατάσσονται σε 6 μεγάλες κατηγορίες με βάση την ταχύτητα των ανέμων τους και τα αποτελέσματα που προκαλούν στο έδαφος. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι

κλίμακες κατάταξης τους (FUJITA και TORRO), το εύρος ταχυτήτων τους και των ζημιών που προκαλούν.

Πίνακας 1: Κατάταξη των σιφώνων, το εύρος των ταχυτήτων ανέμου και των ζημιών που προκαλούν.

Κλίμακα Fujita	Κλίμακα Torro	Εύρος ταχύτητας ανέμου (m/s)	Περιγραφή ζημίας
F0	T0-T1	17,9-36,7	Κάποια ζημιά σε καμινάδες και κεραίες τηλεόρασης, σπασίματα σε κλαδάκια δέντρων, σπρώχνει πέρα φυτά με ρηχές ρίζες.
F1	T2-T3	32,1-49,5	Εξάγει επιφάνειες από τις οροφές, σπασμένα παράθυρα, ανατροπές σε τροχόσιπα, θέπει αυτοκίνητα εκτός δρόμου.
F2	T4-T5	50,0-69,6	Στέγες αποκόπτονται από τα σπίτια με ξύλινο σκελετό αφήνει έντονη όρθια τοιχώματα, καταστροφή αδύναμων κτιρίων σε αγροτικές περιοχές, σπίτια ρυμουλκούμενα καταστρέφονται, μεγάλα δέντρα σπάζουν ή ξεριζώνονται, σιδηροδρομικά βαγόνια βγάζει εκτός ραγών (ανασηκώνει), καταστροφή φιατσικών οδών και εκτόξευση αυτοκινήτων.
F3	T6-T7	70,6-92,09	Στέγες και κάποιοι τοίχοι αποκόπτονται από σπίτια με ξύλινο σκελετό, ορισμένες αγροτικές κτήρια εντελώς κατεδαφίζονται, τρένα ανατρέπονται, δομές τύπου υποστεγο-αποθήκη με χάλυβα-ηλεκαιωμένο διαρρηγνύονται αυτοκίνητα σηκώνονται από το έδαφος περισσότερα δέντρα στο δάσος ξεριζώνονται, σπάνε ή ισοπεδώνονται.
F4	T8-T9	92,53-116,23	Ολόκληρα σπίτια ισοπεδώνονται, αφήνοντας σωρούς από μπόζα, μεταλλικές κατασκευές καταστρέφονται δέντρα ξεριζώνονται και αυτοκίνητα και τρένα ρίχνονται σε μεγάλες αποστάσεις μεγάλα βλήματα δημιουργούνται.
F5	T10-T11	116,68-142,16	Ολόκληρα σπίτια καταστρέφονται από τα θεμέλια και το οπλισμένο σκυρόδεμα παθαίνει σοβαρές ζημιές.

2.2. ΧΩΡΙΚΗ ΚΑΙ ΧΡΟΝΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ

Σίφωνες ξηράς και θάλασσας ή ανεμοστρόβιλοι, σημειώνονται σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας και η έρευνα των τελευταίων ετών απέδειξε ότι δεν είναι τόσο σπάνιο φαινόμενο [8],[9]. Σίφωνες με μεγάλη μεταβλητότητα στη χωρική και χρονική κατανομή της εμφάνισής τους, παρατηρούνται σε όλη την Ελλάδα ως αποτέλεσμα των διαφορών του γεωγραφικού, τοπογραφικού και κλιματικού υποβάθρου [10], [11].

Οι σίφωνες μπορούν να εμφανιστούν σε όλες τις περιοχές της χώρας, αν και η πλειοψηφία τους παρατηρείται στη Δ. Ελλάδα, τα Ιόνια νησιά και στις δυτικές παραλιακές περιοχές. Επίσης, περιοχή συχνών εμφανίσεων εμφανίζεται στην βορειοδυτική Πελοπόννησο (Ηλεία, Αχαΐα, Μεσσηνία), στις πεδινές περιοχές της Κεντρικής Μακεδονίας και Θεσσαλίας και στη Ρόδο. Αντίθετα εμφανίζεται μικρότερη συχνότητα εμφάνισης στις ηπειρωτικές ορεινές περιοχές και στο εσωτερικό της χώρας.

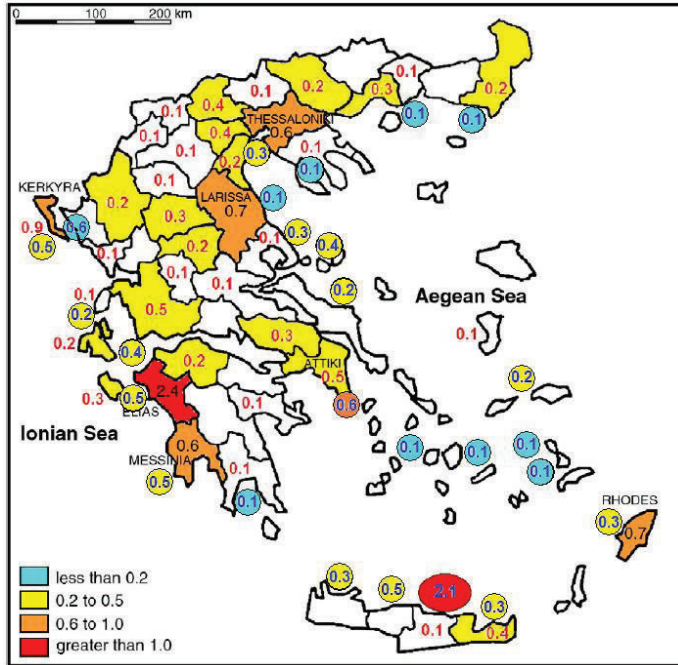
Οι σίφωνες θάλασσας παρουσιάζουν αυξημένη συχνότητα στα βόρεια της Κρήτης, στη θαλάσσια περιοχή Λασιθίου και Ηρακλείου. Βασιζόμενοι στην 14ετή βάση δεδομένων (2000-13), εξάγεται ετήσιος μέσος όρος 23,5 ημερών με δραστηριότητα σιφώνων θάλασσας με μέσο όρο 45 συμβάντων για το Αιγαίο και το Ιόνιο Πέλαγος.

Η γεωγραφική κατανομή του ετήσιου μέσου αριθμού ημερών σιφώνων για τις περιφερειακές ενότητες στην Ελλάδα παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.

Ο Σεπτέμβριος είναι ο μήνας με τις ιδανικές καιρικές συνθήκες για να σχηματιστούν σίφωνες θάλασσας αφού η θερμοκρασία της θάλασσας είναι η υψηλότερη του έτους

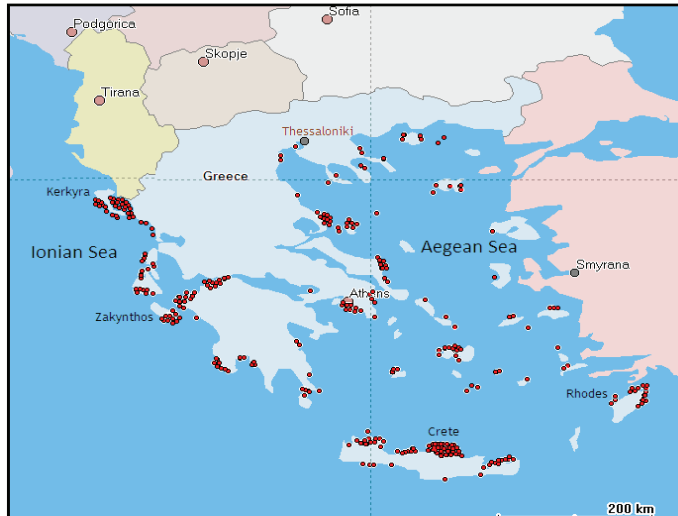
Οι σίφωνες ξηράς εμφανίζονται στην πλειονότητα τους το καλοκαίρι και κατά δεύτερο λόγο το χειμώνα, ενώ οι σίφωνες θάλασσας στο μεγαλύτερο ποσοστό τους εκδηλώνονται το φθινόπωρο και ακολουθεί το καλοκαίρι.

Στο πλαίσιο της κλιματικής αλλαγής και της παγκόσμιας θέρμανσης είναι πιθανό να εμφανίζονται σίφωνες συχνότερα και να είναι σφοδρότεροι αλλά και σε περισσότερες περιοχές.



Σχήμα 4: Συχνότητα εμφάνισης (ημέρες/έτος) και χωρική κατανομή σιφώνων (2000-13).

Στο σχήμα 5 παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των σιφώνων θάλασσας (2000-13).

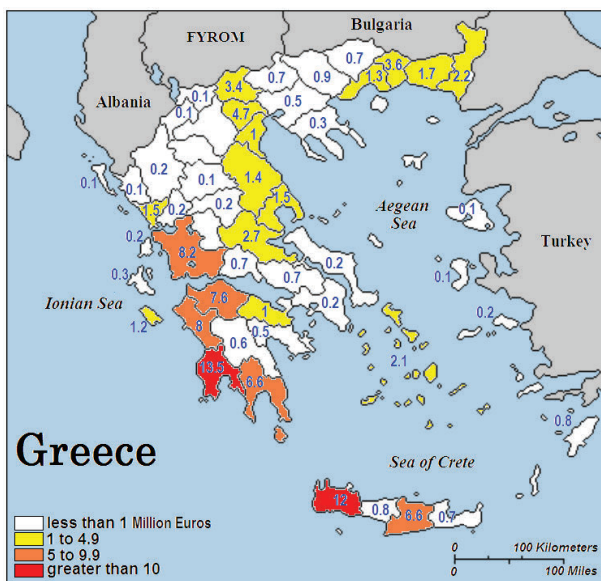


Σχήμα 5: Χωρική κατανομή σιφώνων θάλασσας (2000-13).

2.3. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΖΗΜΙΩΝ

Το 65% των σιφώνων στην Ελλάδα είναι ισχυροί φθάνοντας σε ένταση τις κατηγορίες T4,T5 και T6 (F2-F3 κλίμακα Fujita) Η μέγιστη ένταση σιφώνων που έχει παρατηρηθεί στην Ελλάδα είναι της τάξης T7 (κλίμακα Τορρο) (F3) και είναι περίπου το 10% του συνόλου. Το 50% των σιφώνων που παρουσιάζονται είναι της τάξης T4-T5 (F2)

Τα στοιχεία των ζημιών έχουν προσδιοριστεί από τις αποζημιώσεις που έχουν δοθεί από τον ΕΛ.Γ.Α. στους αγρότες, για επιβεβαιωμένες ζημιές από ανεμοθύελλα στη γεωργία της περιόδου 1999-2009 (Σχήμα 6). Θα πρέπει να τονιστεί ότι αυτά τα ποσά αφορούν τη ζημιά από τους σίφωνες αλλά και από τους ισχυρούς ανέμους θύελλας, που έπληξαν διάφορες περιοχές.



Σχήμα 6: Ποσά αποζημιώσεων σε εκατομμύρια ευρώ ανά περιφερειακή ενότητα 1999-2009.

Έχουν καταγραφεί δύο συμβάντα σιφώνων στον Αστακό Αιτωλοακαρνανίας το 1934, στο οποίο σκοτώθηκαν τρία άτομα και τραυματίστηκαν σαράντα, ενώ το 2004 σκοτώθηκε ένα δεκάχρονο παιδί χτυπημένο από βάρκα που είχε παρασυρθεί από τον σίφωνα, στην Μεθώνη Πιερίας.

3. ΚΛΑΣΕΙΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ (Α/Γ)

Οι ριπές ανέμου, η κάθετη διάτμηση και η κλίση ροής αέρα μπορούν να προκαλέσουν κοπωτικά φορτία τα οποία με τη σειρά τους μπορούν να μειώσουν τον χρόνο ζωής των υλικών της ανεμογεννήτριας (α/γ) ή ακόμη και να τα καταστρέψουν.

Η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου για την οποία έχει σχεδιαστεί η α/γ να αντέχει είναι η λεγόμενη τιμή V_{e50} , δηλαδή η μέγιστη ριπή (3 δευτερολέπτων) σε μια περίοδο αναφοράς 50 ετών (Πίνακας 2). Ωστόσο, η τιμή V_{e50} είναι έγκυρη μόνο σε ένα περιθώριο ανεμολογικών συνθηκών, (μέγιστη τιμή της κάθετης διάτμηση (0,2), κλίση ροής ($\leq 8^\circ$) και η πυκνότητα του αέρα ($1,225 \text{ kg/m}^3$)). Σε περίπτωση που οι συνθήκες ξεπερνούν τα προαναφερθέντα όρια η πραγματική ακραία ταχύτητα ανέμου που πρέπει να αντέχει η α/γ είναι ακόμη χαμηλότερη και μπορεί να αξιολογείται από τον κατασκευαστή της α/γ. Ακόμα οι ακραίες τιμές είναι έγκυρες μόνο εάν η α/γ λειτουργεί υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας, αφού υπάρχει υψηλή πιθανότητα να υπάρχει διακοπή ηλεκτρικής σύνδεσης σε εκείνες τις συνθήκες.

Πίνακας 2 : Μέγιστες ταχύτητες ανέμου IEC κλάσεων (Πηγή: IEC 61400-1 Ed.3)

IEC κλάση α/γ	I	II	III	S
Vref (m/s)*	50	42.5	37.5	Οι τιμές καθορίζονται από τον κατασκευαστή
Ve 50 (m/s)**	70	59.5	52.5	

*Vref είναι η μέση ταχύτητα αναφοράς 10λέπτου στο ύψος πλήμνης της α/γ

** Ve50 είναι η μέγιστη ριπή για χρονική περίοδο 50ετίας για χρονικό διάστημα 3 δευτερολέπτων.

4. ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ ΖΗΜΙΩΝ ΑΠΟ ΣΙΦΩΝΕΣ ΣΕ Α/Γ ΔΙΕΘΝΩΣ

Η επίδραση σίφωνα σε α/γ μπορεί να προκαλέσει καταστροφή των πτερυγίων, λύγισμα τους και υπερτάχυνση του δρομέα. Επιπλέον, μπορεί να υπάρξει λύγισμα του πυλώνα της α/γ ακόμη και πτώση της. Ένας σίφωνας κλάσης F3 της κλίμακας Fujita μπορεί να φτάσει ταχύτητες ριπών ανέμου (τριών δευτερολέπτων) υψηλότερες από το όριο της IEC κλάσης I (70 m/s) και μπορεί έτσι να αποτελέσει σοβαρή απειλή για την α/γ.

Τα τελευταία χρόνια και λόγω της βελτίωσης της τεχνολογίας και της ταχείας ανάπτυξης του διαδικτύου και της κοινωνικής δικτύωσης υπάρχουν κυρίως στις ΗΠΑ καταγεγραμμένα περιστατικά σιφώνων που πέρασαν μέσα από αιολικά πάρκα. Αξίζει να αναφερθούν δύο περιπτώσεις περάσματος σιφώνων από αιολικά πάρκα:

α) 19/5/2012 – Harper County, Kansas

Πέρασε σίφωνας τάξης F1 σε αιολικό πάρκο και κατέστρεψε τη πτερωτή αρκετών α/γ διαλύοντας τα πτερύγια. Υπάρχουν βίντεο [12],[13],[14] και φωτογραφίες [15], [16],[17].

β) 7/11/2011 - Oklahoma – Αιολικό Πάρκο Blue Canyon

Πέρασε σίφωνας άγνωστης τάξης σε αιολικό πάρκο και δεν προκάλεσε εμφανείς ζημιές. Πιθανόν να ήταν χαμηλής έντασης. Υπάρχουν βίντεο [18] και φωτογραφίες [19].



Εικόνες 3,4 : Αιολικό πάρκο στο Harper County, Kansas.



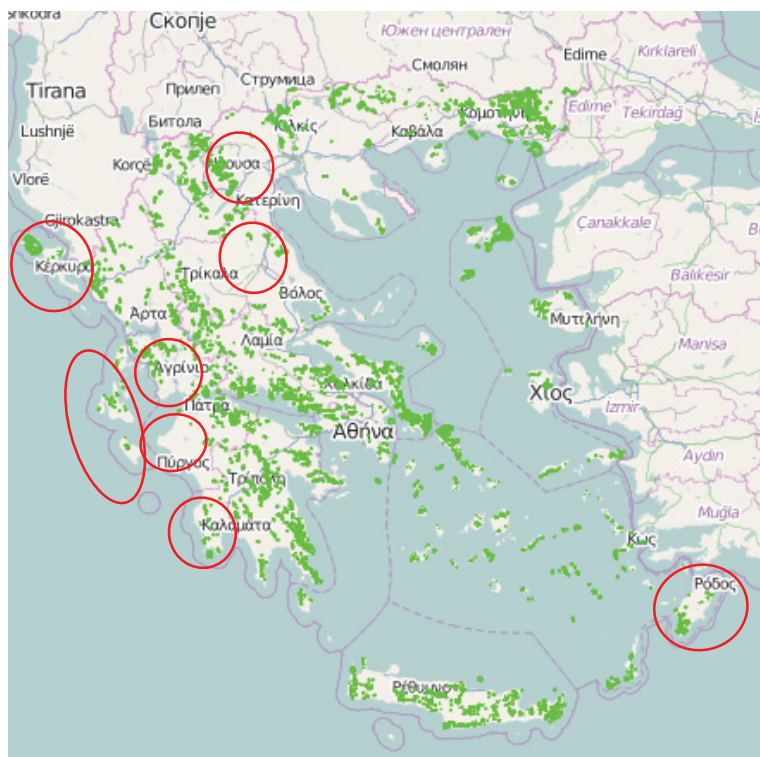
Εικόνα 5 : Αιολικό πάρκο Blue Canyon, Oklahoma.

5. ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι σίφωνες που παρουσιάζονται στην Ελλάδα μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές ζημιές στις α/γ. Αναλυτικά σίφωνες κλάσης F2 (50% των σιφώνων) ξεπερνούν τα όρια των κλάσεων α/γ II και III. Η κλάση F3 (10% των σιφώνων) ξεπερνά και τα όρια της κλάσης α/γ I. Ακόμη και οι χαμηλής έντασης σίφωνες (F1) μπορούν να αποτελέσουν απειλή για τις α/γ και να προκαλέσουν ζημιές στην πτερωτή.

Οι περιοχές με υψηλή συχνότητα εμφάνισης σιφώνων στην Ελλάδα είναι : α) Ηλεία, β) Κέρκυρα και Ιόνια Νησιά, γ) Αιτωλοακαρνανία δ) Μεσσηνία, ε) Ρόδος, στ) Λάρισα ζ) Ημαθία-Πέλλα.

Από αυτές τις περιοχές χαμηλό ενδιαφέρον για αιολικά πάρκα υπάρχει μόνο στην Ηλεία και τη Λάρισα αν και εκεί υπάρχουν υπό ανάπτυξη έργα (σχήμα 7).



Σχήμα 7 : Θέσεις περιοχών ανάπτυξης αιολικών πάρκων [20] και οι περιοχές που παρουσιάζονται συχνότερα σίφωνες.

Οι σίφωνες είναι τοπικά φαινόμενα με σχετικά μικρή έκταση, με καταστροφικά όμως αποτελέσματα για την περιοχή από την οποία θα πλήξουν. Αυτό ισχύει και για τις α/γ και στον γεωγραφικό χώρο της Ελλάδας στον οποίο σήμερα λειτουργούν αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος 1.900 MW και έχει τεθεί στόχος για το 2020 η ισχύς αυτή να είναι ίση με 7.500 MW [21].

Οι ζημιές που μπορούν να προκαλέσουν ξεκινούν από φθορές στα πτερύγια της α/γ μέχρι την καταστροφή αυτών, ενώ μπορεί να επέλθει ολική καταστροφή της α/γ και πώση της ανάλογα με την κλάση της και την ένταση του σίφωνα. Επιπλέον, μπορούν να προκαλέσουν ζημιές στο κτίριο ελέγχου του αιολικού πάρκου αλλά και στο δίκτυο ηλεκτρικής διασύνδεσης.

Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη από τις εταιρείες που αναπτύσσουν αιολικά πάρκα στην Ελλάδα και τους κατασκευαστές α/γ, η πιθανότητα να πληγούν στην διάρκεια της εικοσαετούς λειτουργίας τους. Η καλύτερη γνώση των σιφώνων που παρουσιάζονται στον Ελλαδικό χώρο είναι εξαιρετικά χρήσιμη για την ασφαλή και την ομαλή λειτουργία των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας.

Η κλιματολογία και τα δεδομένα κινδύνου από την εμφάνιση σιφώνων θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στις τεχνικό-οικονομικές αναλύσεις των αιολικών πάρκων και στην Ελλάδα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Σιούτας Μ., «Χαρακτηριστικά των σιφώνων ξηράς και θάλασσας στην Ελλάδα», Πρακτικά 8^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Μετεωρολογίας, Κλιματολογίας και Φυσικής Ατμόσφαιρας, Ελληνική Μετεωρολογική Εταιρεία, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 23-26/5/2006.
- [2] Sioutas, M., I. Matsagouras, P. Nastos and H. Flocas, 2012: METEOROLOGICAL [x] CONDITIONS ASSOCIATED WITH STRONG TORNADOES IN GREECE. Proceedings, 11th International Conference on Meteorology-Climatology and Atmospheric Physics, HMS, National and Kapodistrian University of Athens, 30 May-1 June 2012.
- [3] Ιστοσελίδα: <http://www.weatherwizkids.com/weather-tornado.htm>
- [4] Ιστοσελίδα: <http://essl.org/cgi-bin/eswd/eswd.cgi>
- [5] Ιστοσελίδα: <http://www.icwr.ca/>
- [6] Ιστοσελίδα: <http://www.metar.gr>
- [7] Ιστοσελίδα: www.meteoclub.gr
- [8] Sioutas, M.V., 2002 "Damaging tornadoes in Greece.July-September 2001",*J.Meteor* 27,17-22.
- [9] Sioutas, M.V., 2003 "Tornadoes and waterspouts in Greece",*Atmos.Res.*67-68(2003),645-656.
- [10] Keul, A.G., 2003. A series of waterspouts off the Cretan north coast, 5 September 2002. *J. Meteorol.* 28, 15–26 41.
- [11] Sioutas, M.V., 2011. A tornado and waterspout climatology for Greece. *Atmos. Res.* 100, 344–356.
- [12] Ιστοσελίδα: <http://addins.wrex.com/blogs/weather/2012/05/tomado-vs-wind-turbine>
- [13] Ιστοσελίδα: <https://www.youtube.com/watch?v=Egdtlnv6Gio>
- [14] Ιστοσελίδα: <http://addins.kwwl.com/blogs/weather/category/video>
- [15] Ιστοσελίδα: <http://zoomradar.com/blog/?p=954>
- [16] Ιστοσελίδα: http://www.crh.noaa.gov/ict/scripts/viewstory.php?STORY_NUMBER=2012052709
- [17] Ιστοσελίδα: http://www.windaction.org/posts/33879-tornado-destroys-turbine#_U_8O9o0cSUk
- [18] Ιστοσελίδα:<http://www.examiner.com/article/storm-chasers-capture-video-of-tornado-striking-oklahoma-wind-farm>
- [19] Ιστοσελίδα: <http://stormeyes.org/tornado/SkyPix/wfrmtor2.htm>
- [20] Ιστοσελίδα PAE: <http://www.rae.gr/geo>
- [21] Υπουργική Απόφαση 19598 (ΦΕΚ Β'1630/11.10.2010)

ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΜΙΚΡΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΒΡΑΧΥΚΥΚΛΩΜΕΝΟΥ ΚΛΩΒΟΥ

Ν. Καρακάσης¹, Α. Μεσεμανώλης¹, Χ. Μαδεμλής¹ και Ι. Κιοσκερίδης²

¹ Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Α.Π.Θ.

² Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών ΤΕ, ΑΤΕΙ-Θ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αιολική ενέργεια ως εναλλακτική πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζει μεγάλη διάδοση τα τελευταία χρόνια γιατί έχει τη μικρότερη δυνατή επιβάρυνση για το περιβάλλον και επίσης μπορεί να ανταποκριθεί ικανοποιητικά στις διαρκώς αυξανόμενες ανάγκες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αν εξαιρέσουμε την υδροηλεκτρική ενέργεια, η αιολική ενέργεια είναι στη σημερινή εποχή η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας από όλες τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Μάλιστα, ύστερα από την εξέλιξη της τεχνολογίας και τις βελτιώσεις στον αεροδυναμικό σχεδιασμό του ανεμοκινητήρα (ανεμοτουρμπίνα), υπάρχουν διαθέσιμες και λειτουργούν ανεμογεννήτριες ισχύος πολλών εκατοντάδων kW έως και μερικών MW. Ωστόσο, η περιοχή των ανεμογεννητριών μεσαίας και κυρίως μικρής ισχύος που θα προορίζονταν για οικιακές και μικρές βιομηχανικές εγκαταστάσεις δεν έχει την ανάπτυξη που θα αναμενόταν.

Τα κριτήρια επιλογής του τύπου του ανεμοκινητήρα και της ηλεκτρογεννήτριας εξαρτώνται κυρίως από την ισχύ λειτουργίας, το κόστος και την αξιοπιστία της εγκατάστασης. Με δεδομένη την επιλογή τους, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια εξαρτάται σημαντικά από τη διάταξη διασύνδεσης της γεννήτριας με το δίκτυο. Αν η ταχύτητα στον άξονα της ανεμογεννήτριας παραμένει σταθερή, η ισχύς που λαμβάνεται από τον άνεμο και μετατρέπεται σε ηλεκτρική δεν είναι η μέγιστη δυνατή. Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει η ταχύτητα της ανεμογεννήτριας να προσαρμόζεται στην ταχύτητα του ανέμου ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού. Ωστόσο, στα υπάρχοντα συστήματα ανεμογεννητριών δεν αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της εξοικονόμησης ενέργειας μέσω της ελαχιστοποίησης των απωλειών της ηλεκτρογεννήτριας, με αποτέλεσμα ο βαθμός απόδοσης του συνολικού αιολικού συστήματος να είναι μικρότερος του βέλτιστου και επίσης να είναι μικρότερη η περιοχή ταχυτήτων ανέμου στην οποία λειτουργεί η ανεμογεννήτρια. Τα παραπάνω έχουν ως συνέπεια, η εγκατάσταση μικρής και μεσαίας ισχύος αιολικών συστημάτων να είναι μέχρι σήμερα αρκετά έως πολύ περιορισμένη όχι μόνο στην Ελλάδα αλλά και σε διεθνές επίπεδο και γενικά να θεωρείται ότι η περιοχή των μικρής και μεσαίας ισχύος αιολικών συστημάτων ως οικονομικά μη-συμφέρουσα.

Συνεπώς, υπάρχει η ανάγκη ενός ολοκληρωμένου συστήματος ελέγχου της ανεμογεννήτριας που θα αυξάνει το συνολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος. Το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου επιτυγχάνει αύξηση της αντλούμενης μηχανικής ενέργειας, ταυτόχρονα με την αύξηση της απόδοσης της ηλεκτρογεννήτριας, με συνέπεια τη μείωση της cut-in ταχύτητας του ανέμου και έτσι τη διεύρυνση της εκμεταλλεύσιμης περιοχής ταχυτήτων ανέμου. Στο άρθρο παρουσιάζεται η μεθοδολογία και το σύστημα ελέγχου και δίνονται πειραματικά αποτελέσματα από μια πρότυπη ανεμογεννήτρια, με τα οποία επιβεβαιώνονται η λειτουργικότητα του συστήματος και η βελτίωση στην απόδοση.

Λέξεις Κλειδιά: Ανεμογεννήτρια, αιολική ενέργεια, αύξηση απόδοσης, επαγωγική γεννήτρια, MPPT έλεγχος.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως βασίζεται κυρίως στην καύση των ορυκτών καυσίμων με συνέπεια τη μόλυνση του περιβάλλοντος. Αντίθετα, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως είναι η βιομάζα, η υδροηλεκτρική, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια είναι πρωτογενείς πηγές ενέργειας φιλικές προς το περιβάλλον. Επίσης, έχουν εξαιρετικά μικρό λειτουργικό κόστος και ορισμένες από αυτές όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια είναι ανεξάντλητες, δωρεάν διαθέσιμες στη φύση και επιπλέον είναι ιδανικές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές, οι οποίες δεν εξυπηρετούνται από το ηλεκτρικό δίκτυο.

Είναι γνωστό ότι ένα μεγάλο μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές μπορεί να παραχθεί από μικρά αιολικά συστήματα, είτε για οικιακή χρήση σε αυτόνομη λειτουργία είτε με τη μορφή μιας μικρής επένδυσης για την έγχυση της ενέργειας στο δίκτυο, αρκεί η επένδυση αυτή να είναι οικονομικά συμφέρουσα. Γι' αυτό το λόγο υπάρχει η ανάγκη ενός ολοκληρωμένου συστήματος μορφομετατροπής (μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική), που θα επιτυγχάνει ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης στο αιολικό σύστημα, ώστε η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας να είναι οικονομικά συμφέρουσα ως προς την απόσβεση της αρχικής επένδυσης. Επιπλέον υπάρχει η ανάγκη βελτίωσης της δυναμικής του συστήματος, μέσω της τεχνικής ελέγχου που θα εφαρμοστεί για τον έλεγχο ταχύτητας της ανεμογεννήτριας, ώστε το σημείο μέγιστης ισχύος του ανεμοκινητήρα να προσδιορίζεται συνεχώς και με ακρίβεια.

Τα τελευταία χρόνια, το ερευνητικό ενδιαφέρον για τα αιολικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας είναι ιδιαίτερα μεγάλο σε διεθνές επίπεδο και ένας σημαντικός αριθμός ερευνητικών εργασιών έχει δημοσιευθεί σε έγκριτα τεχνικά περιοδικά. Ενδεικτικά θα αναφερθούν στη συνέχεια ορισμένες εργασίες, οι οποίες σχετίζονται με τον έλεγχο της ανεμογεννήτριας και της διασύνδεσης του συστήματος με το δίκτυο. Στην [1] παρουσιάζεται ένα αιολικό σύστημα με μια επαγωγική γεννήτρια σε αυτοδιέγερση και στην [2] γίνεται μια αναλυτική διερεύνηση ως προς το βαθμό απόδοσης ενός συστήματος που αποτελείται από τρεις ανεμογεννήτριες. Στην [3] παρουσιάζεται ένας μετατροπέας ισχύος βαθμωτού ελέγχου V/f , ο οποίος ελέγχει με την τεχνική της αναζήτησης τη συχνότητα λειτουργίας της ανεμογεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου, ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη ισχύς του ανεμοκινητήρα. Στην [4] μελετάται η δυναμική συμπεριφορά μιας ανεμογεννήτριας μεταβλητής ταχύτητας σε διάφορες συνθήκες ταχύτητας ανέμου και ηλεκτρικής φόρτισης και στην [5] παρουσιάζεται η σύγκριση του συμβατικού ελέγχου σε σχέση με την τεχνική του ευφυούς ελέγχου (intelligent control) και αναδεικνύονται ορισμένα από τα πλεονεκτήματα του δεύτερου.

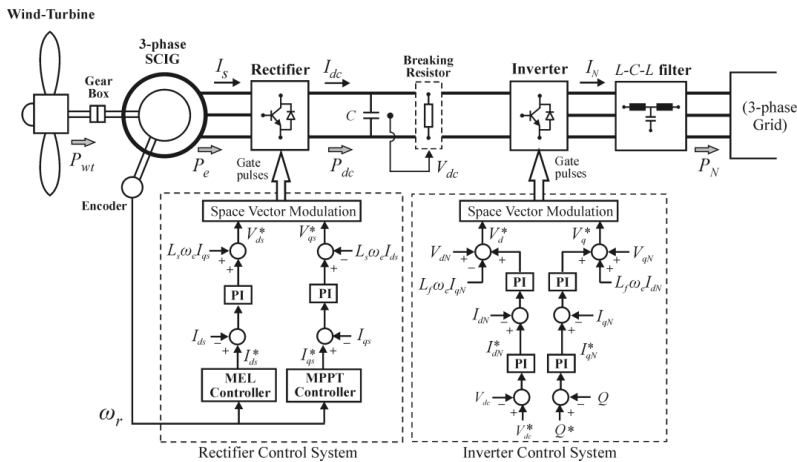
Είναι γνωστό ότι ο μετατροπέας ισχύος και κυρίως το σύστημα ελέγχου του είναι το σημαντικότερο τμήμα της διάταξης ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστος βαθμός απόδοσης σε οποιαδήποτε ταχύτητα ανέμου. Πολλές τεχνικές ελέγχου έχουν αναπτυχθεί [6]-[8] ώστε να παρακολουθείται το σημείο μέγιστης ισχύος του ανεμοκινητήρα. Ειδικότερα, διάφορες τεχνικές αναζήτησης έχουν προταθεί στις [9]-[12], ενώ στις [13]-[15] παρουσιάζονται τεχνικές διανυσματικού ελέγχου για επαγωγικές ηλεκτρογεννήτριες, οι οποίες δεν χρειάζονται αισθητήριο ταχύτητας για την υλοποίησή τους.

Έχει αποδειχθεί ότι ο κατάλληλος έλεγχος της διέγερσης μιας ηλεκτρικής μηχανής είτε λειτουργεί ως γεννήτρια είτε ως κινητήρας, μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των ηλεκτρικών απωλειών [16]. Η αύξηση του βαθμού απόδοσης που μπορεί να επιτευχθεί με τον έλεγχο της διέγερσης της μηχανής, σε σχέση με την κατάσταση ονομαστικής διέγερσης, είναι μεγαλύτερη όσο μειώνεται το φορτίο στη μηχανή. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι στα μικρά φορτία απαιτείται πολύ μικρότερη διέγερση ως προς την ονομαστική, με αποτέλεσμα να μειώνονται σημαντικά οι απώλειες σιδήρου και οι καταναμεμμένες απώλειες (stay loss), ενώ αντισταθμίζεται η τυχόν μικρή αύξηση που θα υπάρξει στις ωμικές απώλειες των

τυλιγμάτων. Βασιζόμενοι στα παραπάνω συμπεράσματα έχουν παρουσιαστεί ερευνητικές εργασίες που επιτυγχάνουν μεγιστοποίηση του βαθμού απόδοσης διαφόρων τύπων ηλεκτροκινητήριων συστημάτων, είτε με την τεχνική της αναζήτησης (search control) είτε με την τεχνική του μοντέλου απωλειών (loss model control). Η τεχνική της αναζήτησης έχει το πλεονέκτημα ότι δεν εξαρτάται από τις παραμέτρους του συστήματος, ωστόσο έχει σημαντικά προβλήματα ως προς την ακρίβεια εύρεσης του σημείου ελαχίστων απωλειών, ενώ εμφανίζει ταλαντώσεις της ροπής. Επιπλέον είναι αργή μέθοδος, καθώς απαιτείται να ισορροπήσει το σύστημα σε κάθε βήμα ελέγχου. Συνεπώς δεν μπορεί να παρακολουθήσει τις γρήγορες μεταβατικές καταστάσεις, με αποτέλεσμα η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος να μην είναι ικανοποιητική [17], [18]. Αντίθετα, η τεχνική του μοντέλου απωλειών, η οποία αν και εξαρτάται από τις παραμέτρους του μοντέλου απωλειών, επιτυγχάνει πάντοτε να βρίσκει με ικανοποιητική ακρίβεια το σημείο ελαχίστων απωλειών, είναι γρηγορότερη μέθοδος και γενικά το σύστημα έχει πολύ καλή δυναμική συμπεριφορά. Η τεχνική αυτή έχει αναπτυχθεί από τα μέλη της ερευνητικής ομάδας και έχουν δημοσιευθεί εργασίες για διάφορους τύπους ηλεκτροκινητήριων [19]-[22]. Σημαντικό είναι ότι στις εργασίες αυτές, παράλληλα με τη μέθοδο της εξοικονόμησης ενέργειας από τη μείωση των απωλειών, παρουσιάζεται μια ειδική μεθοδολογία με την οποία προσδιορίζονται εύκολα και με απλά πειράματα οι παράμετροι που απαιτούνται για την εφαρμογή της τεχνικής του μοντέλου απωλειών. Έτσι, η τεχνική του μοντέλου απωλειών συγκεντρώνει σημαντικά πλεονεκτήματα, σε σύγκριση με την τεχνική αναζήτησης, χωρίς να απαιτείται να είναι γνωστές οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου απωλειών.

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι για να έχουμε μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο, θα πρέπει να σχεδιαστεί ένα βελτισμένο σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας. Είναι γνωστό ότι ο κατάλληλος έλεγχος του πεδίου διέγερσης της ηλεκτρογεννήτριας μπορεί να οδηγήσει στη μείωση των ηλεκτρικών απωλειών της. Αυτό σημαίνει ότι αν σε κάθε συνθήκη φόρτισης και ταχύτητας περιστροφής που επιβάλλεται από το υπάρχον αιολικό δυναμικό ελέγχεται η διέγερση της ηλεκτρογεννήτριας μέσω ενός συστήματος ελέγχου κλειστού βρόχου, τότε μπορεί να επιτευχθεί μέγιστος βαθμός απόδοσης. Σε ένα σύστημα διανυσματικού ελέγχου της ηλεκτρογεννήτριας, ο έλεγχος του πεδίου διέγερσης μπορεί να επιτευχθεί μέσω του ελέγχου του ρεύματος διέγερσης και μάλιστα ο έλεγχος αυτός μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε τύπο ηλεκτρογεννήτριας εναλλασσομένου ρεύματος (επαγωγική ή σύγχρονη με τύλιγμα διέγερσης ή σύγχρονη με μόνιμους μαγνήτες). Ως μεταβλητή ελέγχου θα χρησιμοποιηθεί το ρεύμα πεδίου (συνιστώσα του ρεύματος φορτίου κατά το διαμήκη άξονα, d-άξονα), ενώ η βέλτιστη ταχύτητα που επιτυγχάνει τη μέγιστη ισχύ του ανεμοκινητήρα θα γίνεται μέσω του ελέγχου του ρεύματος ροπής (συνιστώσα του ρεύματος φορτίου κατά τον εγκάρσιο άξονα, q-άξονα).

Συνεπώς στόχος του άρθρου είναι να παρουσιάσει το σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος ελέγχου ανεμογεννήτριας, το οποίο θα επιτυγχάνει αύξηση του συνολικού βαθμού απόδοσης του αιολικού συστήματος, μέσω ελαχιστοποίησης των ηλεκτρικών απωλειών της ανεμογεννήτριας και επέκταση της εκμεταλλεύσιμης περιοχής ταχυτήτων ανέμου προς την περιοχή των χαμηλών ταχυτήτων. Με αυτό τον τρόπο θα επιτυγχάνεται αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, για τις οποίες στις μέχρι τώρα εγκαταστάσεις η ηλεκτρογεννήτρια τίθεται εκτός λειτουργίας. Ακόμη, επιτυγχάνεται εύρεση του σημείου μέγιστης ισχύος του ανεμοκινητήρα άμεσα και με ακρίβεια σε όλο το φάσμα ταχυτήτων ανέμου, χωρίς να απαιτείται η αναζήτηση του σημείου αυτού. Επειδή στόχος της εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός αιολικού συστήματος χαμηλού κατασκευαστικού κόστους, προτιμήθηκε να χρησιμοποιηθεί επαγωγική ηλεκτρογεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού. Τα θεωρητικά αποτελέσματα έχουν ελεγχθεί πειραματικά σε εργαστηριακή πέδη εξομοίωσης της ανεμογεννήτριας, σε σήραγγα εξαναγκασμένης ροής αέρα και σε πραγματική ανεμογεννήτρια.



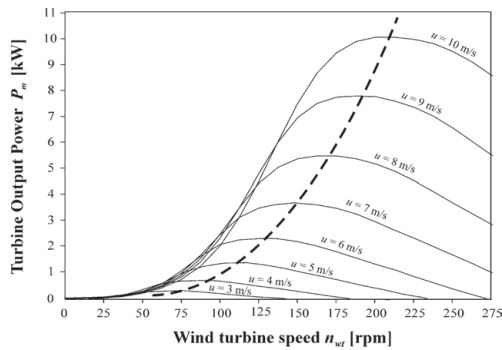
Εικόνα 1. Δομή αιολικού συστήματος βέλτιστης απόδοσης με 3-φασική επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται το λειτουργικό διάγραμμα του προτεινόμενου αιολικού συστήματος με βέλτιστο έλεγχο. Ο ανεμοκινητήρας συνδέεται μηχανικά με την ηλεκτρογεννήτρια μέσω ενός κιβώτιου ταχυτήτων, το οποίο αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής στο επίπεδο ταχυτήτων λειτουργίας της ηλεκτρογεννήτριας. Για τον έλεγχο της λειτουργίας του αιολικού συστήματος και τη διασύνδεσή του με το ηλεκτρικό δίκτυο χρησιμοποιούνται δύο μετατροπείς ισχύος σε συνδεσμολογία back-to-back.

Στον ανορθωτή εφαρμόζεται η τεχνική διανυσματικού ελέγχου και χρησιμοποιούνται δύο κλειστοί βρόχοι ελέγχου. Ο εσωτερικός PI (Proportional-Integral) βρόχος ελέγχου ρυθμίζει τις συνιστώσες d- και q- του ρεύματος του στάτη, ώστε να επιτυγχάνονται οι αντίστοιχες d- και q-συνιστώσες της τάσης μέσω της τεχνικής διαμόρφωσης διανύσματος χώρου. Ο εξωτερικός βρόχος ελέγχου περιλαμβάνει τον ελεγκτή ελαχιστοποίησης απωλειών (Minimum electric loss, MEL), ο οποίος προσδιορίζει το βέλτιστο I_{ds} ρεύμα ώστε να ελαχιστοποιούνται οι ηλεκτρικές απώλειες της ηλεκτρογεννήτριας και τον ελεγκτή παρακολούθησης μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking, MPPT). Ο ελεγκτής MPPT προσδιορίζει το βέλτιστο I_{qs} ρεύμα ώστε να μεγιστοποιείται η μηχανική ισχύς που αντλείται από τον ανεμοκινητήρα. Οι δύο ελεγκτές έχουν κοινή είσοδο την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα ω_r .

Στον αντιστροφέα, ο οποίος πραγματοποιεί τη διασύνδεση με το δίκτυο, εφαρμόζεται έλεγχος προσανατολισμένης τάσης χρησιμοποιώντας δύο βρόχους με ελεγκτές PI. Ο εσωτερικός βρόχος ελέγχει τις d- και q- συνιστώσες του ρεύματος, ώστε να επιτυγχάνονται οι αντίστοιχες d- και q-συνιστώσες της τάσης μέσω της τεχνικής διαμόρφωσης διανύσματος χώρου. Ο εξωτερικός βρόχος ελέγχου χρησιμοποιείται για τον ανεξάρτητο έλεγχο της ενεργού και της άεργου ισχύος που προσφέρει η ανεμογεννήτρια στο δίκτυο, ελέγχοντας τις I_{dN} και I_{qN} συνιστώσες του ρεύματος. Ειδικότερα, ο ένας PI ελεγκτής του εξωτερικού βρόχου χρησιμοποιείται για να διατηρεί σταθερή την τάση στον dc-διαύλο και συνεπώς να ελέγχει την ενεργό ισχύ. Ο άλλος PI ελεγκτής χρησιμοποιείται για να ελέγχει το συντελεστή ισχύος στους ακροδέκτες σύνδεσης με το δίκτυο και συνεπώς να ελέγχει την άεργο ισχύ που προσφέρει το αιολικό σύστημα στο δίκτυο.



Εικόνα 2. Χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος-ταχύτητας περιστροφής ανεμοκινητήρα ανεμογεννήτριας οριζώντιου τύπου για διάφορες ταχύτητες ανέμου και γωνία πτερυγίων 0 μοίρες ($\beta = 0^\circ$).

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος-ταχύτητας ανεμοκινητήρα ισχύος 10kW οριζώντιου τύπου με τρία πτερύγια και για γωνία των πτερυγίων 0 μοίρες.

3. ΤΕΧΝΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ

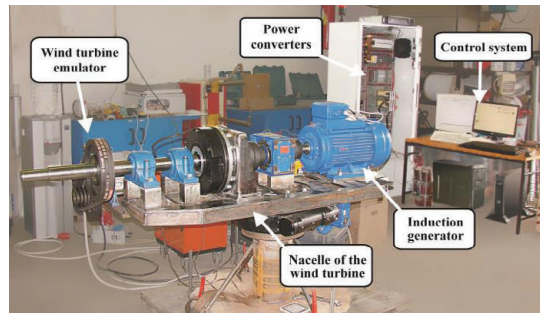
Από τον έλεγχο του πεδίου διέγερσης και του ρεύματος ροπής της ηλεκτρογεννήτριας προκύπτουν δύο συνθήκες, οι οποίες όταν ικανοποιούνται ταυτόχρονα επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση του αιολικού συστήματος [23]. Ειδικότερα, η συνθήκη

$$I_{d_{s,opt}} = \omega_r \sqrt{G_d (G_{q1} + G_{q2} \omega_r)} \left[\frac{1 + T_a^2 \omega_e^2}{1 + T_b^2 \omega_e^2} \right]^{1/4} \quad (1)$$

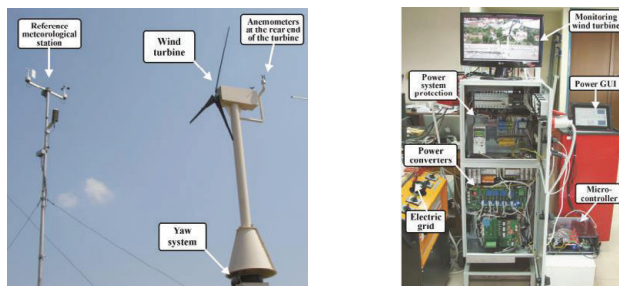
προσδιορίζει το βέλτιστο ρεύμα διέγερσης για το οποίο επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση των απωλειών της ηλεκτρογεννήτριας (ελεγκτής MEL). Η δεύτερη συνθήκη

$$\left| I_{q_{s,opt}} \right| = \omega_r \sqrt{\frac{G_{q1}}{G_d} \left[\frac{1 + T_b^2 \omega_e^2}{1 + T_a^2 \omega_e^2} \right]^{1/4}} \quad (2)$$

προσδιορίζει το βέλτιστο ρεύμα ροπής για το οποίο επιτυγχάνεται η μέγιστη ισχύς στον ανεμοκινητήρα (ελεγκτής MPPT). Η υλοποίηση των παραπάνω δύο συνθηκών επιτυγχάνεται μέσω του εξωτερικού βρόχου ελέγχου του ανορθωτή, όπου κοινό σήμα ανάδρασης είναι η ταχύτητα περιστροφής του άξονα της ανεμογεννήτριας.



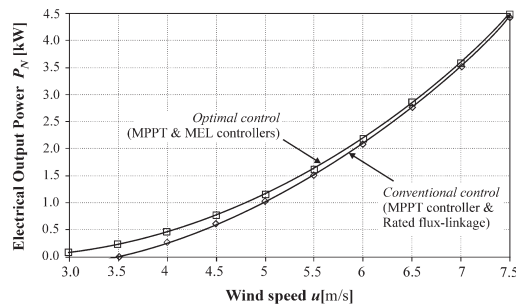
Εικόνα 3 Σύστημα εργαστηριακής εξομοίωσης της ανεμογεννήτριας.



(α)

(β)

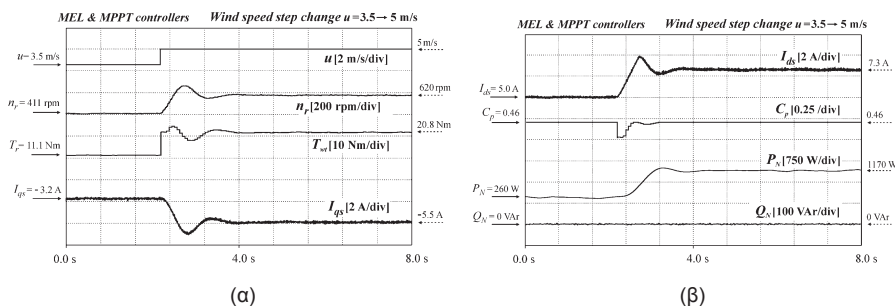
Εικόνα 4 (α) Πειραματική ανεμογεννήτρια ισχύος 1.1kW και (β) διάταξη ελέγχου.



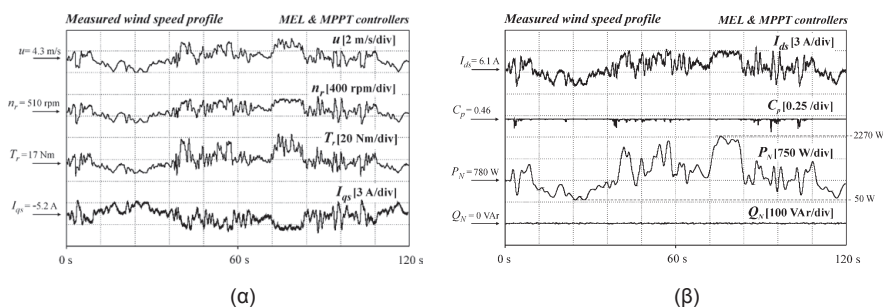
Εικόνα 5 Σύγκριση της λειτουργίας, (ως προς την ισχύ εξόδου) ενός αιολικού συστήματος βέλτιστης απόδοσης, σε σχέση με το συμβατικό έλεγχο.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την πειραματική επιβεβαίωση των θεωρητικών συμπερασμάτων χρησιμοποιήθηκε αρχικά ένα σύστημα εργαστηριακής εξομοίωσης της ανεμογεννήτριας, με επαγωγική γεννήτρια 10kW (Εικόνα 3) και στη συνέχεια μια πραγματική ανεμογεννήτρια με μηχανή ισχύος 1.1kW. Στην Εικόνα 4(α) εικονίζεται η πειραματική ανεμογεννήτρια ισχύος 1.1kW που είναι εγκατεστημένη στο δώμα του 9-όρουφου κτιρίου της Πολυτεχνικής Σχολής ΑΠΘ και στην Εικόνα 4(β) το σύστημα ελέγχου που βρίσκεται στον 5-όροφο του ίδιου κτιρίου (στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών).



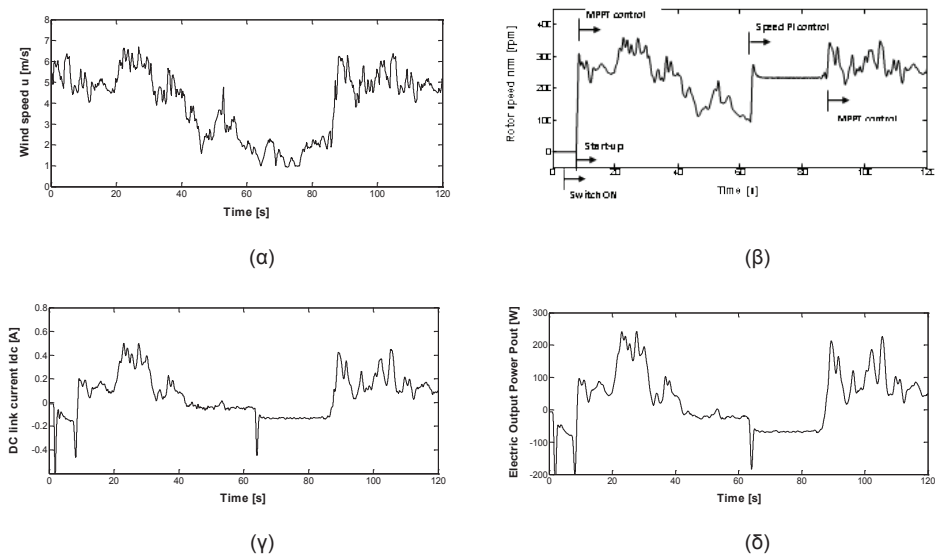
Εικόνα 6 Πειραματικά αποτελέσματα της απόκρισης του αιολικού συστήματος ισχύος 10kW, με βέλτιστο έλεγχο, σε απότομη μεταβολή της ταχύτητας ανέμου.



Εικόνα 7 Πειραματικά αποτελέσματα της απόκρισης του αιολικού συστήματος ισχύος 10kW, με βέλτιστο έλεγχο, σε προφίλ ανέμου που έχει ληφθεί από μετρήσεις.

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα από το σύστημα εργαστηριακής εξομοίωσης, όπου διακρίνεται η βελτίωση στην απόδοση που επιτυγχάνεται με την προτεινόμενη τεχνική ελέγχου. Στις Εικόνες 6 και 7 παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα από το σύστημα εργαστηριακής εξομοίωσης, όπου διακρίνεται αντίστοιχα η απόκριση του αιολικού συστήματος βέλτιστης απόδοσης σε βηματική μεταβολή της ταχύτητας και η απόκριση του συστήματος σε ένα προφίλ ταχύτητας ανέμου που έχει ληφθεί από μετρήσεις. Τέλος, στην Εικόνα 8 δίνονται πειραματικά αποτελέσματα από την εκκίνηση (start-up) της ανεμογεννήτριας ισχύος 1.1 kW.

Από τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνεται ότι με τη προτεινόμενη βέλτιστη τεχνική ελέγχου επιτυγχάνεται, για το ίδιο αιολικό δυναμικό, αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος στο δίκτυο και επίσης μείωση της cut-in ταχύτητας ανέμου (Εικόνα 5). Η μεγαλύτερη αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας παρατηρείται στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου, λόγω της δυνατότητας που υπάρχει στην περιοχή αυτή για μεγαλύτερη μείωση του πεδίου διέγερσης της επαγωγικής ηλεκτρογεννήτριας και συνεπώς τη μεγαλύτερη μείωση των απωλειών πυρήνα.



Εικόνα 8 Πειραματικά αποτελέσματα της εκκίνησης πραγματικής ανεμογεννήτριας ισχύος 1.1kW.

Από τα πειραματικά αποτελέσματα της δυναμικής απόκρισης προκύπτει το συμπέρασμα ότι το σύστημα ελέγχου λειτουργεί ικανοποιητικά τόσο σε μεμονωμένες απότομες μεταβολές (Εικόνα 6) όσο και σε συνεχείς μεταβολές (Εικόνα 7) της ταχύτητας του ανέμου. Και στις δύο περιπτώσεις, ο MPPT ελεγκτής παρακολουθεί τις μεταβολές της ταχύτητας ανέμου και προσδιορίζει τη βέλτιστη ταχύτητα περιστροφής του ανεμοκινητήρα. Ταυτόχρονα ο ελεγκτής MEL εντοπίζει με ακρίβεια το βέλτιστο ρεύμα πεδίου I_{ds} , ώστε να επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση των απωλειών της ηλεκτρογεννήτριας.

Τέλος, από τα πειραματικά αποτελέσματα της πραγματικής ανεμογεννήτριας 1.1kW επιβεβαιώνεται ότι το σύστημα ελέγχου λειτουργεί ικανοποιητικά και επιτυγχάνει ομαλή εκκίνηση σε όλο το εύρος περιοχής ταχυτήτων.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το άρθρο παρουσιάστηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου ανεμογεννήτριας που επιτυγχάνει αύξηση του συνολικού βαθμού απόδοσης του αιολικού συστήματος. Το προτεινόμενο σύστημα ελέγχου επιτυγχάνει αύξηση της αντλούμενης μηχανικής ισχύος, μέσω του βέλτιστου ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής του ανεμοκινητήρα (ελεγκτής MPPT) και αύξηση της απόδοσης της ηλεκτρογεννήτριας, μέσω της μείωσης των ηλεκτρικών απωλειών της (ελεγκτής MEL). Τα παραπάνω έχουν ως επιπλέον πλεονέκτημα τη μείωση της cut-in ταχύτητας του ανέμου και έτσι τη διεύρυνση της εκμεταλλεύσιμης περιοχής ταχυτήτων ανέμου προς τη περιοχή των χαμηλών ταχυτήτων. Επειδή στόχος της εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός αιολικού συστήματος χαμηλού κατασκευαστικού κόστους, προτιμήθηκε να χρησιμοποιηθεί επαγωγική ηλεκτρογεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της ερευνητικής εργασίας μπορούν να εφαρμοστούν και σε ανεμογεννήτρια με σύγχρονη ηλεκτρογεννήτρια μόνιμου μαγνήτη. Τα θεωρητικά συμπεράσματα που παρουσιάζονται στο άρθρο επιβεβαιώθηκαν πειραματικά σε σύστημα

εργαστηριακής εξομοίωσης ανεμογεννήτριας, σε σήραγγα εξαναγκασμένης ροής αέρα και σε πραγματική ανεμογεννήτρια.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή χρηματοδοτήθηκε από τη ΓΓΕΤ ΕΥΔΕ-ΕΤΑΚ μέσω του ερευνητικού προγράμματος “Συνεργασία 2009”, κωδικός έργου 09ΣΥΝ-32-624.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] G. Raina and O. P. Malik, ‘Wind Energy Conversion using a Self-Excited Induction Generator’, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, no. 12, pp. 3933-3936, Dec. 1983.
- [2] A. Grauers, ‘Efficiency of Three Wind Energy Generator Systems’, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 11, no. 3, pp. 650-657, Sept. 1996.
- [3] A. Miller, E. Muljadi, and D. S. Zinger, ‘A Variable Speed Wind Turbine power Control’, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 12, no. 2, pp. 181- 186, June 1997.
- [4] S. A Papathanassiou and M. P. Papadopoulos, ‘Dynamic Behavior of Variable Speed Wind Turbines under Stochastic Wind’, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 14, no. 4, pp. 1617-1623, Dec. 1999.
- [5] R. Chedid, F. Mrad, and M. Basma, ‘Intelligent Control of a Class of Wind Energy Conversion Systems’, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 14, no. 4, pp. 1597-1604, Dec. 1999.
- [6] H. D. Battista, P. F. Pulaston, R. J. Mantz, and C. F. Christiansen, ‘Sliding Mode Control of Wind Energy Systems with DOIG – Power Efficiency and Torsional Dynamics Optimization’, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 15, no. 2, pp. 728-734, May 2000.
- [7] B. Beltran, T. Ahned-Ali, and M. E. H. Benbouzid, ‘Sliding Mode Power Control of Variable-Speed Wind Energy Conversion Systems’, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 23, no. 2, pp. 551-558, June 2008.
- [8] Munteanu, S. Bacha, A. I. Bratcu, J. Guiraud, and D. Roze, ‘Energy-Reliability Optimization of Wind Energy Conversion Systems by Sliding Mode Control’, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 23, no. 3, pp. 975-984, Sept. 2008.
- [9] A. M. De Broe, S. Drouilhet, and V. Gevorgian, ‘A peak power tracking for small wind turbines in battery charging applications’, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 14, no. 4, pp. 1630-1635, Dec. 1999.
- [10] R. Datta and V. T. Ranganathan, ‘A Method of Tracking the Peak Power Points for a Variable Speed Wind Energy Conversion System’, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 18, no. 1, pp. 163-168, March 2003.
- [11] E. Koutroulis and K. Kalaitzakis, ‘Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications’, IEEE Trans on Industrial Electronics, vol. 53, no. 2, pp. 486-494, April 2006.
- [12] W. Qiao, W. Zhou, J. M. Aller, and R. G. Harley, ‘Wind Speed Estimation Based Sensorless Output Maximization Control for a Wind Turbine Driving a DFIG’, IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 23, no. 3, pp. 1156-1169, May 2008.
- [13] R. Cárdenas and R. Peña, ‘Sensorless Vector Control of Induction Machines for Variable-Speed Wind Energy Applications’, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 19, no. 1, pp. 196-205, March 2004.

- [14] K. Tan and S. Islam, 'Optimum Control Strategies in Energy Conversion of PMSG Wind Turbine System without Mechanical Sensors', *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 19, no. 2, pp. 3, June 2004.
- [15] E. Echeniques, J. Dixon, R. Cárdenas, and R. Peña, 'Sensorless Control for a Switched Reluctance Wind Gen-erator, Based on Current Slopes and Neural Networks', *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 817-825, March 2009.
- [16] A. Kusko and D. Galler, 'Control Mans for Minimization of Losses in AC and DC Motor Drives', *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. IA-19, no. 4, pp. 561-570, Jult/Aug. 1983.
- [17] R. S. Colby and D. W. Novotny, 'Efficiency Operation of Surface-Mounted PM Synchronous Motors', *IEEE Trans. On Industry Applications*, vol. IA-23, pp. 1048-1054, Nov./Dec. 1987.
- [18] I. Kioskeridis and N. Margaris, 'Loss Minimization in Scalar-Controlled Induction Motor Drives with Search Controllers', *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 11, no. 2, pp. 213-220, March 1996.
- [19] I. Kioskeridis and N. Margaris, 'Loss Minimization in Induction Motor Adjustable-Speed Drives', vol. 43, no. 1, pp. 226-231, Feb. 1996.
- [20] C. Mademlis, J. Xypteras, and N. Margaris, 'Loss Minimization in Surface Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives', *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 1, pp. 115-122, Feb. 2000.
- [21] C. Mademlis and I. Kioskeridis, 'Energy Efficiency Optimization in Synchronous reluctance Motor Drives', *IEE-Electrical Power Applications*, vol. 150, no. 2, pp. 201-209, March 2003.
- [22] C. Mademlis, I. Kioskeridis, N. Margaris, 'Optimal Efficiency Control Strategy for Inter- or Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives', *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 19, no. 4, pp. 715-723, Dec. 2004.
- [23] Mesemanolis A., Mademlis C., and Kioskeridis I., "Optimal Efficiency Control Strategy in Wind Energy Conversion System with Induction Generator", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 4, pp. 238-246, Dec. 2013.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΙΚΡΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΜΕΣΟΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Κ. Χ. Γκαράκης

Ενεργειακός Μηχανικός, MSc – Εμπειρογνώμων ΕΣΥΔ

Γ.Κοτζιά 23 - Τ.Κ. 15126 Μαρούσι

email : kgarakis@otenet.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια οι μικρές ανεμογεννήτριες γνωρίζουν πολύ σημαντική ανάπτυξη σε όλο το κόσμο. Σύμφωνα με τα στοιχεία του Διεθνούς Οργανισμού Αιολικής Ενέργειας (WWEA), ο ρυθμός ανάπτυξης της παγκόσμιας αγοράς μικρών ΑΓ βαίνει αυξανόμενος, τάση που θα συνεχιστεί και στο μέλλον. Οι μικρές ΑΓ που ήταν σε λειτουργία στο τέλος του 2012 έφθαναν τις 806.000 με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 687 MW με πρωτοπόρες χώρες την Κίνα, ΗΠΑ και Ηνωμένο Βασίλειο.

Στην Ελλάδα, το νομοθετικό πλαίσιο για την δυνατότητα εγκατάστασης μικρών ΑΓ βρίσκεται σε ισχύ από το 2010 για τις ΑΓ ισχύος μέχρι 50KW. Παρόλο το μεγάλο επενδυτικό ενδιαφέρον με κατάθεση περίπου 1000 αιτημάτων σύνδεσης μικρών ΑΓ (ισχύος ~500MW) στον Διαχειριστή του Δικτύου/Μη διασυνδεδεμένων νήσων, σχεδόν καμία αίτηση δεν έχει λάβει προσφορά σύνδεσης και ελάχιστα έργα έχουν πραγματοποιηθεί. Ο νόμος 4203/2013 όρισε την εφαρμογή Ειδικού Προγράμματος Ανάπτυξης μικρών ΑΓ που καταρτίζεται με απόφαση του Υπουργού Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, έως 30.6.2014 και όρισε και προϋποθέσεις για την σύνδεση μικρών ΑΓ στα δίκτυα. Στα τέλη του 2013, η ακύρωση της διαδικασίας αιτήσεων σύνδεσης μικρών αιολικών σταθμών στα μη διασυνδεδεμένα νησιά, μεταφέροντας την για μετά την έγκριση του Ειδικού Προγράμματος, σταμάτησε οποιαδήποτε δραστηριότητα. Επιπλέον, τον Ιούνιο του 2014 υπήρξε η αναβολή της έκδοσης υπουργικής απόφασης για το Ειδικό Πρόγραμμα ενώ με τον νόμο 4254/2014 έπαυσε να ισχύει η αυξημένη τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας από μικρές ΑΓ. Οπότε, σήμερα η κατάσταση στην αγορά των μικρών ανεμογεννητριών είναι σε μηδενικό σημείο στην Ελλάδα, αναμένοντας το Ειδικό Πρόγραμμα ανάπτυξης τους.

Η αποδοτικότητα μιας μικρής ΑΓ δηλαδή η ηλεκτρική ενέργεια που θα παραχθεί ανά εγκατεστημένο kW σε ετήσια βάση, καθορίζεται από την ποιότητα του αιολικού δυναμικού της περιοχής. Κύριο πρόβλημα για τους επενδυτές σε μικρές ΑΓ είναι η αξιόπιστη γνώση του και σίγουρα η τελική λύση είναι η μέτρηση στο σημείο εγκατάστασης. Πριν όμως την εγκατάσταση ανεμολογικού ιστού στην τοποθεσία εγκατάστασης και την καταγραφή του αιολικού δυναμικού, είναι διαθέσιμες σήμερα μέθοδοι για την ακριβή, αξιόπιστη και μακροχρόνια εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μέσω της χρήσης μεσοκλιματικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης. Συνάμα μέσω αυτών των δεδομένων και σύνθετων λογισμικών πακέτων μπορεί να εξαχθεί η μακροχρόνια ενεργειακή παραγωγή.

Η εργασία αποσκοπεί στην περιγραφή της διαδικασίας εκτίμησης του αιολικού δυναμικού και της ενεργειακής παραγωγής μικρών ΑΓ μέσω της χρήσης μεσοκλιματικών δεδομένων από την βάση EMD ConWx διάρκειας 20 ετών και σε ύψη 10 και 25μ (πλέγμα κόμβων δεδομένων 3x3 χλμ – ωριαίες τιμές ταχύτητας, διεύθυνσης ανέμου καθώς και θερμοκρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης). Παρουσιάζεται αναλυτικά η χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία και παρατίθενται αποτελέσματα για δύο μικρά νησιά του Αιγαίου Πελάγους (αιολικός άτλαντας σε ύψος 18 και 30μ από την επιφάνεια του εδάφους) αλλά και υπολογισμός της ενεργειακής παραγωγής δύο μικρών ΑΓ ονομαστικής ισχύος 10 και 50kW.

Λέξεις Κλειδιά: μικρές ανεμογεννήτριες, αιολικό δυναμικό, ενεργειακή παραγωγή, ConWx.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ιστορική ομόφωνη απόφαση του Συμβουλίου των Πρωθυπουργών των Κρατών Μελών της 8/3/2007, έθεσε για πρώτη φορά δεσμευτικούς στόχους για τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου το 2020 σε επίπεδο 20% χαμηλότερο από τις εκπομπές του 1990 και τη χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) τουλάχιστον στο 20% των συνολικών ενεργειακών αναγκών της Ευρώπης το 2020. Αποφασίσθηκε επίσης στόχος για Εξοικονόμηση Ενέργειας κατά 20% και για συμμετοχή των βιοκαυσίμων στις μεταφορές κατά 10%.

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.

Σύμφωνα με τις προβλέψεις της Υπουργικής Απόφασης 19598 (ΦΕΚ Β'1630/11.10.2010) για την επιδιωκόμενη αναλογία εγκατεστημένης ισχύος και την κατανομή της στο χρόνο μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών ΑΠΕ, η εγκατεστημένη ισχύς αιολικών πάρκων (Α/Π) ήταν για το τέλος του 2014: 4.000 MW ενώ το 2020: 7500 MW.

Η εγκατεστημένη ισχύς σήμερα αιολικών πάρκων είναι 1903MW [1].

Στα πλαίσια αυτά, το νομοθετικό πλαίσιο για την δυνατότητα εγκατάστασης μικρών ΑΓ (ΜΑΓ) στην Ελλάδα βρίσκεται σε ισχύ από το 2010 και για τις ΑΓ ισχύος μέχρι 50kW.

Βασικός παράγοντας για την ενεργειακή αποδοτική εγκατάσταση ΜΑΓ είναι η ακριβής εκτίμηση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού.

Στην εργασία αυτή αξιοποιούνται τα state-of-the-art μεσοκλιματικά δεδομένα υψηλής ανάλυσης EMD ConWx με τη συνδυασμένη χρήση λογισμικών πακέτων EMD WindPro [2] και DTU WAsP για την εκτίμηση του μακροχρόνιου αιολικού δυναμικού και της ενεργειακής παραγωγής ΜΑΓ. Πραγματοποιείται αναλυτική παρουσίαση της χρησιμοποιούμενης μεθοδολογίας και της εφαρμογής της σε δύο μικρά νησιά του Αιγαίου (Κίμωλος και Ψέριμος) για δύο ΜΑΓ οριζοντίου άξονα, ισχύος 10 και 50kW.

2. ΜΙΚΡΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ (ΜΑΓ)

2.1. ΚΑΤΗΓΟΡΟΠΟΙΗΣΗ

Η κατηγοριοποίηση των ΜΑΓ μπορεί να πραγματοποιηθεί βασιζόμενοι στα παρακάτω κριτήρια:

- Διάμετρος του στροφείου (Rotor Diameter)
- Επιφάνεια σάρωσης του στροφείου (rotor swept area)
- Ονομαστική ισχύς λειτουργίας (Nominal operation power)

Βάση των κριτηρίων αυτών και των ορίων που θέτει το πρότυπο IEC 61400-2 οι κατηγορίες είναι οι εξής :

Πίνακας 1 : Κατηγορίες ΜΑΓ σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400-2.

	Μicro	Πολύ μικρές	Μικρές
Επιφάνεια σάρωσης	$A \leq 3,5m^2$	$3,5m^2 < A \leq 40m^2$	$40m^2 < A \leq 200m^2$
Διάμετρος ρότορα	$D \leq 2,1m$	$2,1m < D \leq 7m$	$7m < D \leq 16m$
Ονομαστική ισχύς	$P \leq 1kW$	$1kW < P \leq 10kW$	$10kW < P \leq 75kW$

Το πρότυπο IEC 61400-2 (το οποίο έχει συνταχθεί με τη συμμετοχή του ΤΕΙ Κρήτης) αναφέρει ότι θα πρέπει η επιφάνεια σάρωσης να μην ξεπερνά το εμβαδό των 200m² το οποίο αντιστοιχεί σε εγκατεστημένη ισχύ ΑΓ περίπου 50kW με τάση λειτουργίας 1000 V AC ή 1500 V DC.

Στην Ελλάδα ως ΜΑΓ σύμφωνα με την Νομοθεσία ορίζονται οι ΑΓ με ισχύ μικρότερη ή ίση των 50kW. Σε άλλες χώρες όπως στο Ηνωμένο Βασίλειο υπάρχουν 3 διαφορετικές κατηγορίες [3]:

–Micro wind: ≤ 1.5 kW, ύψος πύργου ως 5m και ετήσια παραγωγή ως 1.000kWh.

–Small wind : >1.5 – 15 kW, ύψος πύργου 2-50m και ετήσια παραγωγή ως 50.000kWh.

–Small-medium wind: >15 kW – 100 kW ύψος πύργου 50-250m και ετήσια παραγωγή ως 200.000kWh.

Οι ΜΑΓ μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τον προσανατολισμό τους των αξόνων τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου, σε οριζοντίου και κατακόρυφου άξονα. Οι ΑΓ οριζοντίου άξονα έχουν συνήθως τον άξονα τους παράλληλο προς την κατεύθυνση του ανέμου (head on), ενώ σε μερικές περιπτώσεις έχουμε ΑΓ των οποίων ο άξονας είναι παράλληλος προς την επιφάνεια της γης και κάθετος προς την κατεύθυνση του ανέμου (cross-wind) [4].

Οι βασικοί τύποι ΜΑΓ οριζοντίου άξονα είναι οι διπτέρυγες, τριπτέρυγες και πολυπτέρυγες, ενώ κατακόρυφου άξονα οι Darrieus και οι Savonius.

Σήμερα υπάρχουν περισσότεροι από 330 κατασκευαστές ΜΑΓ σε όλο τον κόσμο οι οποίοι κατασκευάζουν ΜΑΓ οριζοντίου άξονα το 74%, κατακόρυφου άξονα το 18%, ενώ το 6% συνδυασμούς των δύο και τέλος το 2% είναι διάφορες άλλου τύπου ΜΑΓ [3].

2.2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Οι εφαρμογές των ΜΑΓ μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες :

A. Αυτόνομα συστήματα

Τα αυτόνομα συστήματα έχουν εφαρμογή σε απομονωμένες οικίες μακριά από ηλεκτρικό δίκτυο, με συνηθέστερη συνδυαστικά χρήση φωτοβολταϊκών γεννητριών (υβριδικά), σε τηλεπικοινωνιακές εγκαταστάσεις, συστήματα αφαλάτωσης, αντλιοστάσια αλλά και σε ιστιοπλοϊκά σκάφη.

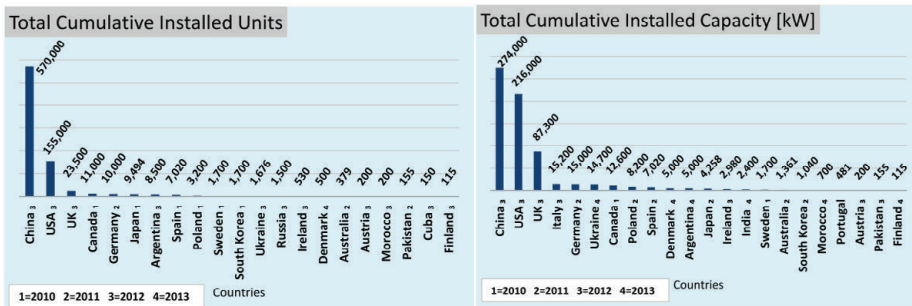
B. Διασυνδεδεμένα συστήματα

Τα διασυνδεδεμένα συστήματα ΜΑΓ είναι οι οικιακές ΑΓ σε στέγες, σε αγροκτήματα και ελεύθερους χώρους αλλά και σε εμπορικές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις (με αυτοπαραγωγή ή net-metering).

3. ΔΙΕΘΝΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Τα τελευταία χρόνια οι ΜΑΓ γνωρίζουν πολύ σημαντική ανάπτυξη σε όλο το κόσμο. Σύμφωνα με τα στοιχεία του Διεθνούς Οργανισμού Αιολικής Ενέργειας (WWEA) [3], ο ρυθμός ανάπτυξης της παγκόσμιας αγοράς ΜΑΓ βαίνει αυξανόμενος, τάση που θα συνεχιστεί και στο μέλλον. Η αύξηση παγκόσμια στον αριθμό των ΜΑΓ ήταν της τάξης του 10% από το προηγούμενο έτος, ενώ της εγκατεστημένης ισχύος 18%.

Οι ΜΑΓ που ήταν σε λειτουργία στο τέλος του 2012 έφθαναν τις 806.000 με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 678 MW με πρωτοπόρες χώρες την Κίνα, ΗΠΑ και Ηνωμένο Βασίλειο. Στα σχήματα 1 και 2 παρουσιάζεται ο αριθμός των εγκατεστημένων ΜΑΓ και της συνολικής τους ισχύος ανά χώρα στο τέλος του 2012 [3].



Σχήματα 1,2 : Συνολικές εγκατεστημένες ΜΑΓ συνολική εγκατεστημένη ισχύς ΜΑΓ ανά χώρα.

Παρόλα αυτά η αγορά ακόμα βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο, αφού χρειάζονται πολλά ακόμη βήματα για να ωριμάσει, με σημαντικότερα εμπόδια για την ανάπτυξη της αγοράς ΜΑΓ καταγράφονται η παγκόσμια οικονομική επιβράδυνση μαζί με το χαμηλό επίπεδο ενημέρωσης της κοινής γνώμης, το υψηλό κόστος παραγωγής ΜΑΓ, έλλειψης πολιτικών στήριξης, αλλά και της πιστοποίησης των ΜΑΓ.

Η πρόβλεψη της WWEA είναι το 2020 η εγκατεστημένη ισχύς ΜΑΓ να ισούται με 3GW.

4. ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Στην Ελλάδα, το νομοθετικό πλαίσιο για την δυνατότητα εγκατάστασης ΜΑΓ βρίσκεται σε ισχύ από το 2010 και για τις ΑΓ ισχύος μέχρι 50KW προβλέπεται ειδική επιδοτούμενη τιμή πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και μια απλουστευμένη και εξορθολογισμένη αδειοδοτική διαδικασία.

Παρόλο το μεγάλο επενδυτικό ενδιαφέρον με κατάθεση περίπου 1000 αιτημάτων σύνδεσης ΜΑΓ (ισχύος ~500MW) στον Διαχειριστή του Δικτύου/Μη διασυνδεδεμένων νήσων, σχεδόν καμία αίτηση δεν έχει λάβει προσφορά σύνδεσης και ελάχιστα έργα έχουν πραγματοποιηθεί. Ο νόμος 4203/2013 όρισε την εφαρμογή Ειδικού Προγράμματος Ανάπτυξης ΜΑΓ που καταρτίζεται με απόφαση του Υπουργού Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, έως 30.6.2014 και όρισε και προϋποθέσεις για την σύνδεση ΜΑΓ στα δίκτυα. Επιπλέον στα τέλη του 2013, η ακύρωση της διαδικασίας αιτήσεων σύνδεσης μικρών αιολικών σταθμών στα μη διασυνδεδεμένα νησιά, μεταφέροντας την για μετά την έγκριση του Ειδικού Προγράμματος εγκατάστασης ΜΑΓ, σταμάτησε οποιαδήποτε δραστηριότητα.

Επίσης, τον Ιούνιο του 2014 υπήρξε η αναβολή της έκδοσης υπουργικής απόφασης για το Ειδικό Πρόγραμμα ενώ με τον νόμο 4254/2014 έπαυσε να ισχύει η αυξημένη τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας από ΜΑΓ.

Σύμφωνα μάλιστα με πληροφορίες από την αγορά στην καλύτερη περίπτωση η υπουργική απόφαση δεν πρόκειται να εκδοθεί πριν περάσουν 6 - 8 μήνες. Και τούτο διότι η μελέτη που από το νόμο θεωρείται προαπαιτούμενη για την υπουργική απόφαση και η οποία θα διενεργηθεί από ιδιώτη και θα χρηματοδοτηθεί από το ΕΣΠΑ δεν έχει ακόμα ανατεθεί [5].

Οπότε, σήμερα η κατάσταση στην αγορά των ΜΑΓ είναι σε μηδενικό σημείο στην Ελλάδα, αναμένοντας το Ειδικό Πρόγραμμα ανάπτυξης τους.

Σήμερα, δεν υπάρχουν ΜΑΓ διασυνδεδεμένες στο δίκτυο που να είναι σε λειτουργία και η χρήση τους περιορίζεται μόνο σε αυτόνομα συστήματα.

5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

5.1. ΠΕΡΙ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ – ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Η μελέτη της ενεργειακής αποδοτικότητας μέσω της εκτίμησης του μακροχρόνιου αιολικού δυναμικού αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης, την μείωση της αβεβαιότητας αλλά και την χρηματοδότηση της.

Το αιολικό δυναμικό εξαρτάται από : i) την τοπογραφία της θέσης και την αεροδυναμική της έκθεση, ii) την κατηγορία του αιολικού δυναμικού της θέσης, iii) τα εμπόδια, το υψόμετρο της θέσης εγκατάστασης και iv) την πιθανή ύπαρξη παραγόντων επιτάχυνσης της αέριας μάζας (καναλισμός, φαινόμενο Bernoulli).

Η αποδοτικότητα μιας ΜΑΓ δηλαδή η ηλεκτρική ενέργεια που θα παραχθεί ανά εγκατεστημένο kW σε ετήσια βάση, καθορίζεται από την ποιότητα του αιολικού δυναμικού της περιοχής. Κύριο πρόβλημα για τους επενδυτές σε ΜΑΓ είναι η αξιόπιστη γνώση του και σίγουρα η τελική λύση είναι η μέτρηση στο σημείο εγκατάστασης. Πριν όμως την εγκατάσταση ανεμολογικού ιστού στην τοποθεσία εγκατάστασης και την καταγραφή του αιολικού δυναμικού, είναι διαθέσιμες σήμερα μέθοδοι για την ακριβή, αξιόπιστη και μακροχρόνια εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μέσω της χρήσης μεσοκλιματικών δεδομένων υψηλής ανάλυσης. Συνάμα μέσω αυτών των δεδομένων και σύνθετων λογισμικών πακέτων μπορεί να εξαχθεί η μακροχρόνια ενεργειακή παραγωγή.

Για την κατασκευή του έργου επιβάλλεται η μέτρηση του αιολικού δυναμικού στην υποψήφια θέση εγκατάστασης της ΜΑΓ και για ύψος ίσο με το ύψος πλήμνης της ΑΓ, με παράλληλη συσχέτιση των μετρήσεων με μακροχρόνια δεδομένα (από διαθέσιμες βάσεις δεδομένων όπως EMD ConWx, MERRA κα)

Επιπλέον, θα πρέπει να πραγματοποιείται μελέτη καταλληλότητας για την εγκατάσταση της ΜΑΓ (έλεγχος ακραίων τιμών ανέμου, καμπύλης διάρκειας ανέμου, τύρβης, κλίσης ροής κα), σύμφωνα με την οποία ο κατασκευαστής θα πρέπει να εγγυάται για την ΜΑΓ. Η αξιόπιστη μέτρηση του αιολικού δυναμικού στη θέση εγκατάστασης αποτελεί εξασφάλιση για την αποδοτική λειτουργία και ασφάλεια της ΜΑΓ.

5.2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

5.2.1. ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΠΑΚΕΤΑ

Ο υπολογισμός του πεδίου ροής στην περιοχή της θέσης εγκατάστασης πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το αριθμητικό μοντέλο επίλυσης φασματικών εξισώσεων του οριακού στρώματος WAsP 11.0 (Wake Model N.O. Jensen) μέσω του υπολογιστικού εργαλείου ανάλυσης, σχεδίασης και βελτιστοποίησης Α/Π EMD WindPro Park έκδοση 2.9, που έχει αναπτυχθεί από το αναγνωρισμένο ινστιτούτο RISØ Δανίας (DTU Wind). Το WAsP είναι ο παλαιότερος κώδικας αυτού του είδους και γενικά αναγνωρίζεται ως ένα αξιόπιστο και καλά ενημερωμένο εργαλείο. Παρόλα αυτά δεν παύει να αποτελεί μία προσέγγιση της πραγματικότητας με συγκεκριμένους περιορισμούς.

Το WAsP εκτελεί ενεργειακούς υπολογισμούς με βάση τις τομεακές κατανομές Weibull οι οποίες είναι λιγότερο ακριβείς από την μετρημένη κατανομή ταχύτητας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το EMD WindPro που αξιοποιεί τα αποτελέσματα του WAsP για να υπολογίσει τις τοπογραφικές επιδράσεις ανά τομέα διεύθυνσης και υποδιάστημα ταχύτητας σε κάθε θέση ΑΓ. Οι τοπογραφικές επιδράσεις ανά τομέα διεύθυνσης και υποδιάστημα ταχύτητας σε κάθε θέση ΑΓ. Οι τοπογραφικές επιδράσεις εφαρμόζονται επί της μετρημένης κατανομής ταχυτήτων στον εκάστοτε χρησιμοποιούμενο σταθμό αναφοράς ώστε να αναπροσαρμοστεί η μέση ταχύτητα στις θέσεις των ΑΓ.

Χρησιμοποιείτε το υπολογιστικό εργαλείο ανάλυσης, σχεδίασης και βελτιστοποίησης Α/Π EMD WindPro. Το λογισμικό έχει ενσωματωμένα μοντέλα συσχέτισης ταχυτήτων, επίλυσης του πεδίου ροής, προσομοίωσης του ορόρου και αλγορίθμων βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης.

Παρόλο, που το εν λόγω εργαλείο είναι βελτιωμένο σε μεγάλο ποσοστό σε σχέση με τις προηγούμενες εκδόσεις του, διατηρεί ακόμα ορισμένους περιορισμούς, ειδικά σε περιπτώσεις σύνθετης τοπογραφίας με έντονες κλίσεις (17% και άνω), οι οποίες ενδέχεται να

προκαλέσουν αποκόλληση της ροής και φαινόμενα ανακυκλοφορίας. Έτσι, σε αυτές τις περιπτώσεις, οι προλέξεις θεωρούνται λιγότερο ασφαλείς, ενώ η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτάται κυρίως από την εμπειρία και την τεχνογνωσία των αναλυτών. Επιπλέον, υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου και διόρθωσης της υπερεκτίμησης/υποεκτίμησης της ενεργειακής παραγωγής ανά ΑΓ μέσω του module Uncertainty/RIX.

5.2.2. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ

Η Ετήσια Παραγόμενη Ενέργεια (ΕΠΕ) εκτιμάται με την εφαρμογή της καμπύλης ισχύος της χρησιμοποιούμενης ανεμογεννήτριας στην κατανομή της ταχύτητας που ισχύει σε κάθε θέση που έχει εγκατασταθεί ανεμογεννήτρια δεδομένου ότι η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου μεταβάλλεται από θέση σε θέση λόγω της σύνθετης τοπογραφίας του εδάφους. Για την περιγραφή της κατανομής πιθανότητας εμφάνισης ταχύτητας ανέμου έχει χρησιμοποιηθεί η μετρημένη κατανομή ταχύτητας και διεύθυνσης, όπως μετασχηματίζεται μέσω του λογισμικού WAsP. Ο υπολογισμός της ετήσιας παραγωγής ενέργειας μιας ανεμογεννήτριας γίνεται με την χρήση της ακόλουθης σχέσης:

$$ΕΠΕ = N_h \sum_{j=1}^{16} \sum_{i=1}^N \left((F_j(V_i) - F_j(V_{i-1})) \frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right)$$

όπου $F_j(V < V_i)$ η συνάρτηση κατανομής αθροιστικής πιθανότητας εμφάνισης ταχύτητας ανέμου $V < V_i$ στο j -τομέα διεύθυνσης, P_i η αποδιδόμενη ισχύς της επιλεγμένης ΜΑΓ στο υποδιάστημα ταχύτητας $V_{i-1} \dots V_i$ και $N_j = 8760$ ώρες. Η ταχύτητα του ανέμου είναι ανηγμένη στο ύψος της πλήμνης, ενώ η ισχύς ανάγεται στην εκτιμώμενη πυκνότητα αέρα στη θέση του Α/Π.

Στο στάδιο της εκτίμησης της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας της εξεταζόμενης ΜΑΓ ή αιολικού πάρκου συνδυάζονται τα αποτελέσματα της αναπαράστασης του πεδίου ροής και τα δεδομένα των καμπυλών ισχύος και ώσης της/των ΜΑΓ με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ομόρρου για να εξαχθεί τελικά η συνολική παραγωγή της ΜΑΓ ή του αιολικού πάρκου ως το ολοκλήρωμα της ενέργειας στους δεκαέξι (16) προκαθορισμένους τομείς διεύθυνσης. Για να ενισχυθεί η ασφάλεια των εκτιμήσεων χρησιμοποιούνται διακριτές ανηγμένες ετήσιες κατανομές ταχυτήτων στο ύψος πλήμνης για τις θέσεις των ΜΑΓ, με βάση την ανάλυση των ανεμολογικών δεδομένων και τις προλέξεις του πεδίου ροής. Οι υπολογισμοί εκτελούνται επαναληπτικά με σημείο αναφοράς τη θέση κάθε ΜΑΓ και η τελική εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης του αιολικού πάρκου προκύπτει από το σταθμισμένο άθροισμα των επιμέρους υπολογισμών.

5.2.3. ΜΕΣΟΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Πραγματοποιείται χρήση της κλιματικής βάσης δεδομένων EMD ConWx [6] (ERA interim data from ECMWF, ωριαία, με ανάλυση ανά 3 χλμ) και των πλησιέστερων κόμβων για την αποτύπωση του αιολικού δυναμικού αλλά και για τον υπολογισμό της ενεργειακής παραγωγής της ΜΑΓ.

Τα στοιχεία περιλαμβάνουν τις οριζόντιες συνιστώσες του ανέμου (u και v) ανά, $(0,3^\circ$ γεωγραφικό μήκος και $0,3^\circ$ γεωγραφικό πλάτος) ανά μία ώρα από το 1979. Είναι διαθέσιμα σε ένα πυκνό παγκόσμιο πλέγμα και χρησιμοποιούνται δεδομένα σε ύψος 10,25,50,75,100,150 και 200m agl (ταχύτητα, διεύθυνση, θερμοκρασία και ατμοσφαιρική πίεση).

Για τις ανάγκες μελετών ως «μακροχρόνια αντιπροσωπευτική» περίοδος θεωρείται η πιο πρόσφατη 20ετία δεδομένων.

Τα EMD ConWx data αποτυπώνουν με όσο το δυνατό μεγαλύτερη ακρίβεια την ατμοσφαιρική κυκλοφορία της περιοχής και περιλαμβάνουν την επίδραση θερμικών ροών καθώς και των μηχανισμών τοπογραφικής επίδρασης που επικρατούν κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

Τα EMD ConWx data έχουν προταθεί ως εναλλακτική μέθοδος εφαρμογής «κλιματικών» προσαρμογών όταν απουσιάζουν τα συμβατικά μετεωρολογικά δεδομένα για την αναγωγή βραχυχρόνιων μετρήσεων και όχι για να αντικαταστούν επιτόπιες μετρήσεις. Ως τώρα μελέτες έχουν δείξει διαφοροποιήσεις της τάξης του 10-15% στην μέση ετήσια ταχύτητα σε τοποθεσίες της Κεντρικής Ευρώπης [5]. Μέσω της προαναφερθείσας μεθοδολογίας είναι δυνατή η χρήση των μεσοκλιματικών δεδομένων EMD ConWx για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού και της ενεργειακής παραγωγής, προτού ο επενδυτής προχωρήσει σε επιτόπιες μετρήσεις.

5.2.4. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΣΧΥΟΣ

Χρησιμοποιείται η καμπύλη ισχύος MAG όπως δίνεται από τον κατασκευαστή για πυκνότητα αέρα $1,225 \text{ kg/m}^3$. Κατά την εκτέλεση των ενεργειακών υπολογισμών γίνεται διόρθωση της καμπύλης ισχύος από το λογισμικό EMD WindPro ώστε να αντιστοιχεί στη μέση ετήσια πυκνότητα του αέρα στο ύψος πλήμνης της MAG και συγκεκριμένα ξεχωριστά για κάθε ΑΓ.

5.2.5 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ-ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΑΕΡΑ

Για τον υπολογισμό της μέσης ετήσιας πυκνότητας στο ύψος της πλήμνης και σε κάθε MAG ξεχωριστά χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό EMD WindPro. Ο υπολογισμός πραγματοποιείται με τη χρήση της θερμοκρασίας από τα δεδομένα EMD ConWx σε ύψος 100μ του πλησιέστερου κόμβου στην θέση της MAG. Εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αναφορά οι μετρήσεις του πλησιέστερου σταθμού της EMY.

5.2.6 ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ (ΟΡΟΓΡΑΦΙΑ – ΤΡΑΧΥΤΗΤΑ)

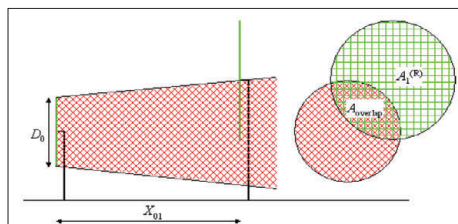
Το τοπογραφικό υπόβαθρο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πεδίου περιλάμβανε μια έκταση εμβαδού ικανού να περιγράψει την ευρύτερη περιοχή του έργου (διαστάσεις μεγαλύτερες από 40x40km) με χρήση ψηφιακού μοντέλου εδάφους ανάλυσης 10 μέτρων (STRM data) [6]. Οι συντεταγμένες αναφοράς είναι σε ΕΓΣΑ '87. Βάσει των υποβάθρων των χαρτών αλλά και επιτόπιων παρατηρήσεων όπου αυτές είναι δυνατό να υπάρξουν, εκτιμάται και καταγράφεται η τραχύτητα του εδάφους (terrain roughness) στα επιμέρους σημεία της περιοχής ενώ γίνεται και χρήση χαρτών τραχύτητας εδάφους. Οι διαστάσεις του χρησιμοποιούμενου υποβάθρου τραχύτητας είναι παρόμοιες με αυτές της ορογραφίας. Οι χάρτες τραχύτητας στηρίζονται στο πρόγραμμα Corine Land Cover 2000 (CLC2000) το οποίο παράχθηκε από την Ευρωπαϊκή Υπηρεσία Περιβάλλοντος. Στηρίζεται στα αποτελέσματα του προγράμματος δορυφορικής απεικόνισης IMAGE2000.

5.2.7. ΕΜΠΟΔΙΑ-ΓΕΙΤΟΝΙΚΕΣ ΑΓ

Κτίρια, σειρές δέντρων, φράκτες και άλλα εμπόδια με ύψος μεγαλύτερο από το ένα τέταρτο του ύψους πλήμνης της ΑΓ σε ακτίνα 1000μ γύρω από αυτή μπορεί να θεωρηθούν ως εμπόδιο στη ροή του αέρα. Επιπλέον αν υπάρχουν εγκατεστημένες ΑΓ σε κοντινή απόσταση (ως 12 διάμετροι του ρότορα της μεγαλύτερης ΑΓ) ή πρόκειται να εγκατασταθούν, θα πρέπει να λαμβάνονται και αυτές υπόψη στους υπολογισμούς.

5.2.8 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΑΓ

Για τον υπολογισμό των απωλειών ενέργειας που οφείλονται στην αλληλεπίδραση της λειτουργίας των ΑΓ (αλληλεπίδραση ομόρου), χρησιμοποιήθηκαν συνδυαστικά τα υπολογιστικά εργαλεία DTU WAsP και EMD WindPro, θεωρώντας αξονοσυμμετρική δομή του ομόρου (axisymmetric wake), υπέρθεση πολλαπλού ομόρου με εξισορρόπηση ενέργειας (energy balance) και το μοντέλο N.O.Jensen για τον υπολογισμό των απωλειών λόγω σκίασης.



Η σκίαση του προκαλείται από μια ΑΓ σε κάποια όμορη εξαπλώνεται γραμμικά και η μείωση της ταχύτητας του ανέμου μετά από την ΑΓ υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\delta V_{01} = U_0 \left(1 - \sqrt{1 - C_t}\right) \left(\frac{D_0}{D_0 + 2kX_{01}}\right)^2 \frac{A_{\text{overlap}}}{A_1^{(R)}}$$

Όπου : U : η ταχύτητα του ανέμου πριν την ΑΓ

D_0 : η διάμετρος της ΑΓ

V : η ταχύτητα του ανέμου μετά την ΑΓ (μειωμένη ταχύτητα)

C_t : ο συντελεστής ώσης

k : ο συντελεστής μείωσης της σκίασης

X_{01} : η οριζόντια απόσταση μεταξύ των ΑΓ

A_1 : καλυπτόμενη επιφάνεια της δεύτερης ΑΓ

A_{overlap} : κοινή καλυπτόμενη επιφάνεια της πρώτης με τη δεύτερη ΑΓ

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του DTU WAsP και EMD WindPro παρουσιάζονται ως ποσοστό % του ελλείμματος ενέργειας σε σχέση με την ενέργεια που θα παρήγαγε η κάθε ΑΓ αν λειτουργούσε στην ίδια θέση χωρίς αλληλεπίδραση με τις άλλες ΑΓ.

5.2.9. ΠΡΟΣΘΕΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ

Οι ενεργειακές απώλειες πλέον της επίδρασης του ομόρου οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη για την εξαγωγή της εκτίμησης της τελικής ενεργειακής παραγωγής είναι οι εξής:

α) Η διαθεσιμότητα των ΑΓ αποτελεί συνήθως όρο του συμβολαίου με τον προμηθευτή για την περίοδο εγγύησης.

β) Οι απώλειες μεταφοράς-διασύνδεσης ανάλογα με την απόσταση της γραμμής διασύνδεσης.

γ) Η υστέρηση λόγω υψηλών ταχυτήτων προκύπτει από την λογική του ελεγκτή της ανεμογεννήτριας στις περιοχές της ταχύτητας αποκοπής της ανεμογεννήτριας (συνήθως 25 m/s), όπου μετά την διακοπή της λειτουργίας λόγω υψηλής ταχύτητας του ανέμου, η ανεμογεννήτρια επανασυνδέεται στο δίκτυο όταν η ταχύτητα του ανέμου γίνει μικρότερη από ένα συγκεκριμένο κατώφλι. Για τον υπολογισμό απαιτούνται δεδομένα 10min.

δ) Απώλειες λόγω μη ύπαρξης ηλεκτρικού δικτύου.

ε) Απώλειες λόγω αδυναμίας πρόσβασης στη περιοχή.

στ) Απώλειες λόγω της πιθανής διαφοροποίησης της πυκνότητας στη θέση εγκατάστασης της καμπύλης ισχύος των ΑΓ αλλά της πιθανής επικάθισης σκόνης και αλατότητας στα πτερύγια των ΜΑΓ.

6. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

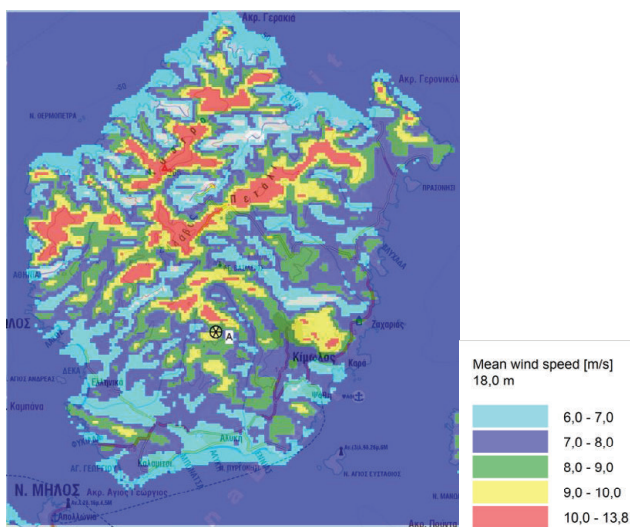
Θεωρήθηκε ως μελέτη περίπτωσης δύο μικρά νησιά του Αιγαίου Πελάγους (Κίμωλος & Ψέριμος) για τα οποία πραγματοποιήθηκε αποτύπωση του αιολικού τους δυναμικού (αιολικός άτλαντας σε ύψος πλήμνης 18 και 30μ από την επιφάνεια του εδάφους) αλλά και υπολογισμός της ενεργειακής παραγωγής δύο μικρών τριπτέρυγων ΑΓ ονομαστικής ισχύος 10 και 50kW.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα που εισήχθησαν στις δύο υπό μελέτη περιπτώσεις:

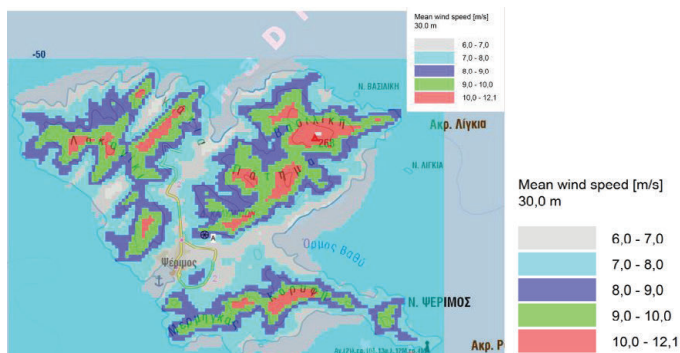
Πίνακας 2 : Δεδομένα εισαγωγής για τα δύο νησιά.

Δεδομένα	Νήσος Κίμωλος	Νήσος Ψερίμος
Ορογραφία	Ψηφιακό μοντέλο εδάφους ανά 10μ – STRM data.	
Τραχύτητα	Corine land cover 2000 (CLC2000)	
Ισχύς ΜΑΓ	10kW	50kW
Διάμετρος ρότορα	7m	19,2m
Ύψος πλήμνης	18m	30m
Διάστημα δεδομένων ConWx	1994-2013 (20 έτη)	
Ύψος δεδομένων ConWx	10m	25m
Σύνολο χρησιμοποιούμενων κόμβων ConWx	7	5

Στο σχήμα 3 δίνεται ο αιολικός χάρτης της νήσου Κιμώλου σε ύψος 18μ και στο σχήμα 4 ο αιολικός χάρτης της νήσου Ψερίμου σε ύψος 30μ.



Σχήμα 3 : Αιολικός χάρτης της Κιμώλου σε ύψος 18m agl.



Σχήμα 4 : Αιολικός χάρτης της Ψερίμου σε ύψος 30m agl.

Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ενεργειακής μελέτης των δύο υπό μελέτη ΜΑΓ για το κάθε νησί.

Πίνακας 3 : Αποτελέσματα υπολογισμών για τα δύο νησιά.

Αποτελέσματα	Νήσος Κίμωλος – 10kW	Νήσος Ψέριμος – 50kW
Μέση ετήσια ταχύτητα στο ύψος πλήμνης	8,4 m/s	8,2m/s
Απώλειες διαθεσιμότητας ΜΑΓ	5%	5%
Απώλειες διαθεσιμότητας ηλ. δικτύου	2%	3%
Απώλειες λόγω απόκλισης καμπύλης ισχύος ΜΑΓ	2%	3%
Ηλεκτρικές απώλειες	2%	3%
Υστέρηση λόγω υψηλών ταχυτήτων	2%	3%
Υψόμετρο θέσης εγκατάστασης – Μέση ετήσια θερμοκρασία στο ύψος πλήμνης	130m – 17,8 C	50m – 18,3 C
Πυκνότητα αέρα στο ύψος πλήμνης	1,191 kg/m ³	1,200 kg/m ³
Καθαρός συντελεστής φορτίου CFnet	43,2%	47,0%

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία εκτίμησης του μακροχρόνιου αιολικού δυναμικού και της ενεργειακής παραγωγής ΜΑΓ μέσω της χρήσης μεσοκλιματικών δεδομένων από την βάση EMD ConWx διάρκειας 20 ετών και σε ύψη 10 και 25μ (πλέγμα κόμβων δεδομένων 3x3 χλμ – ωριαίες τιμές ταχύτητας, διεύθυνσης ανέμου καθώς και θερμοκρασίας, ατμοσφαιρικής πίεσης). Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε εφαρμογή σε δύο μικρά νησιά του Αιγαίου Πελάγους (αιολικός άτλαντας σε ύψος 18 και 30μ από την επιφάνεια του εδάφους) αλλά και υπολογισμός της ενεργειακής παραγωγής δύο τριπτέρυγων ΜΑΓ ονομαστικής ισχύος 10 και 50kW.

Η χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία με τους περιορισμούς που έχει λόγω της χρήσης των μεσοκλιματικών δεδομένων, είναι σε θέση να δώσει μια καθαρή εικόνα για την ποιότητα του αιολικού δυναμικού σε υποψήφιες θέσεις για εγκατάσταση ΜΑΓ αλλά και μια καλή εκτίμηση της ενεργειακής παραγωγής. Αδιαμφισβήτητα, αποτελεί λύση για την διερεύνηση του αιολικού δυναμικού και τον υπολογισμό της ενεργειακής παραγωγής σε υποψήφιες θέσεις εγκατάστασης ΜΑΓ, πριν προχωρήσει ο επενδυτής σε επιτόπια μέτρηση (με το ανάλογο κόστος και χρονική αναμονή τουλάχιστον ενός έτους).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΕΛΕΤΑΕΝ, (ιστοσελίδα www.eletaen.gr), ημέρα αναφοράς 01.09.2014.
- [2] EMD WindPro, 2013 Εγχειρίδιο χρήσης.
- [3] S. Gsaenger et al.(2014), «Small wind report 2014»,WWEA, Γερμανία, σελ.13-14.
- [4] Ι.Κ. Καλδέλλης, «Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας», σελ.179-201, Αθήνα 1999.
- [5] Ιστοσελίδα energypress.gr, <http://www.energypress.gr/news/Anaballetai-h-Ypourgikh-Aprofash-gia-tis-mikres-anemogennhtries>, ημέρα αναφοράς 30.08.2014.
- [6] http://help.emd.dk/mediawiki/index.php?title=Main_Page, 2014, “WindPro documentation on online data”, ημέρα αναφοράς 01.09.2014.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ REANALYSIS ΜΕΣΩ ΤΗΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥΣ ΜΕ ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Δημήτρης Φουσέκης^{1*}, Κων/νος Γκαράκης²

^{1*}Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ)

19^ο χλμ Λ. Μαραθώνος, 19009 Πικέρμι, Ελλάδα

e-mail: dfousek@cres.gr

²Εργαστήριο ΑΠΕ, Τμήμα Μηχανικών Ενεργειακής Τεχνολογίας, ΤΕΙ Αθήνας

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μεθοδολογία εκτίμησης του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής περιλαμβάνει εκτός των άλλων την αναγωγή των βραχυχρόνιων μετρήσεων (συνήθως μονοετούς διάρκειας) σε μακροχρόνιες, έτσι ώστε να προσεγγισθεί με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια η παραγωγή ενός αιολικού πάρκου (Α/Π) κατά την αναμενόμενη διάρκεια λειτουργίας του (συνήθως 20ετία).

Τα τελευταία χρόνια είναι διαθέσιμα δεδομένα αιολικού δυναμικού (καθώς και άλλων φυσικών μεγεθών) από βάσεις δεδομένων οι οποίες έχουν προκύψει από επεξεργασία δορυφορικών μετρήσεων (Reanalysis data), σε συνδυασμό με κλιματικά μοντέλα και με το ψηφιακό ανάγλυφο της περιοχής. Τα δεδομένα αυτά είναι σε μορφή χρονοσειρών με ικανοποιητική χωρική και χρονική ανάλυση.

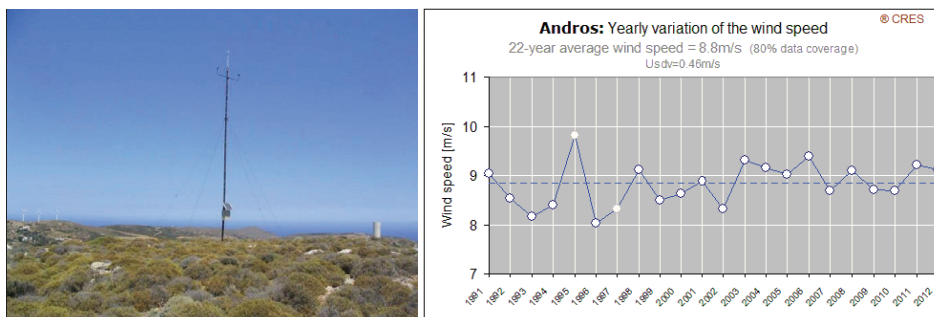
Η εργασία αυτή έχει ως σκοπό να αξιολογήσει δεδομένα Reanalysis από διαφορετικές πηγές συγκρίνοντάς τα με μακροχρόνιες μετρήσεις αιολικού δυναμικού από επτά μετεωρολογικούς σταθμούς του ΚΑΠΕ, ύψους 10-100m και χρονικής διάρκειας 3-22 ετών. Οι πηγές των δεδομένων Reanalysis είναι : α. Blended coastal winds – (10m), β. CFSR-E-(10m), γ. ConWx – (10m έως 200m), δ. EMD ERA -(10 έως 200m), ε. MERRA (50m), στ. NCAR (10 και 42m). Οι συσχετίσεις των δεδομένων γίνονται με 3 διαφορετικές τεχνικές MCP (Measure Correlate Predict). Τα αποτελέσματα εξαρτώνται από την χρησιμοποιούμενη μέθοδο MCP, την χρονική ανάλυση των μετρήσεων και την διεύθυνση του ανέμου. Παρατηρούνται συντελεστές συσχέτισης πολύ υψηλοί κυρίως για τα δεδομένα ConWx, MERRA και EMD ERA και ιδιαίτερα σε μηνιαίες τιμές.

Τα αποτελέσματα των συσχετίσεων αναδεικνύουν τα πλεονεκτήματα και τις αδυναμίες των έξι υπό μελέτη πηγών reanalysis data, μετά την σύγκριση τους με τις μακροχρόνιες υψηλής ποιότητας μετρήσεις αιολικού δυναμικού. Γενικά η χρήση δεδομένων ConWx, MERRA και EMD ERA προσφέρουν ικανοποιητικούς συντελεστές συσχέτισης, αλλά με περιορισμούς που απορρέουν από την τοπογραφία (περιπτώσεις ιδιαίτερως σύνθετου ανάγλυφου ή παραθαλάσσιες θέσεις). Η αξιολόγηση αυτή παρέχει χρήσιμη πληροφορία για τα κριτήρια επιλογής της καταλληλότερης πηγής δεδομένων reanalysis, έτσι ώστε η αναγωγή των μετρήσεων από μετεωρολογικό ιστό του βραχυχρόνιου αιολικού δυναμικού, σε μακροχρόνιο να είναι επιτυχής και να οδηγεί σε ασφαλέστερη εκτίμηση της ενεργειακής παραγωγής ενός Αιολικού Πάρκου στην διάρκεια ζωής του.

Λέξεις κλειδιά: ανεμολογικά δεδομένα, reanalysis data, συσχέτιση δεδομένων, αιολικό δυναμικό

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαδικασία της αποτίμησης του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής εμπεριέχει την αναγωγή των βραχυχρόνιων ανεμολογικών μετρήσεων σε μακροχρόνιες, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της στοχαστικότητας του ανέμου στην διάρκεια του χρόνου. Ένα παράδειγμα της μεταβολής της μέσης ετήσιας ταχύτητας του αέρα φαίνεται στις Εικόνες 1 και 2 για την περιοχή της Άνδρου (22 συναπτά έτη μετρήσεων). Λόγω της μεταβαλλόμενης απόκλισης κάθε έτους από την μέση τιμή των 8,8m/s, είναι φανερό ότι ασφαλής εκτίμηση για τον προσδιορισμό της μακροχρόνιας μέσης τιμής, μπορεί να γίνει με 5ετή κατ' ελάχιστον δεδομένα μετρήσεων. Αυτό δεν είναι τις περισσότερες φορές εφικτό για πρακτικούς λόγους. Έτσι η χρήση των Reanalysis δεδομένων έχει καθιερωθεί σαν μια εναλλακτική λύση και στην παρούσα εργασία, εξετάζεται η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που παρέχει.



Εικόνες 1, 2: Μέτρηση αιολικού δυναμικού στην Άνδρο (10m ιστός). Μακροχρόνια μεταβολή της μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου.

Διευκρινίζεται εδώ ότι οι απαιτήσεις των μετρήσεων για την εκτίμηση του (μακροχρόνιου) αιολικού δυναμικού διαφέρουν από αυτές για την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης ενός Αιολικού Πάρκου (που συνήθως έπονται), ως προς την απαίτηση για μετρήσεις στο ύψος της πλήμνης των Α/Γ, την διάρκεια των μετρήσεων, τα μετρούμενα μεγέθη (τύρβη, κλίση ροής, πυκνότητα αέρα, την επαρκή και αντιπροσωπευτική κάλυψη της έκτασης του πάρκου κλπ.

Απώτερος στόχος της ανάλυσης των δεδομένων αυτών είναι ο καθορισμός των μακροχρόνιων ανεμολογικών χαρακτηριστικών που επικρατούν στην περιοχή του Α/Π. Το ετήσιο αιολικό δυναμικό μεταβάλλεται χρονικά λόγω της κλιματικής μεταβλητότητας. Η μηνιαία μεταβλητότητα του αιολικού δυναμικού είναι σημαντική, αλλά η απόκλιση της μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου συνήθως κυμαίνεται στη περιοχή 95-105% της κλιματικής τιμής. Δεδομένης της διάρκειας ζωής ενός Α/Π (20ετία κατ' ελάχιστον), η καθιερωμένη μεθοδολογία για την εκτίμηση της ενεργειακής παραγωγής του, συμπεριλαμβάνει και την αναγωγή των (βραχυχρόνιων) μετρήσεων στη περιοχή μελέτης σε μακροχρόνιες, με χρήση μακροχρόνιων δεδομένων αναφοράς.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ Reanalysis ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα reanalysis δεδομένα προκύπτουν από την σύνθεση δορυφορικών παρατηρήσεων-μετρήσεων με επίγειους σταθμούς μέτρησης, καθώς και με την χρήση αριθμητικών κλιματικών-μετεωρολογικών μοντέλων που διαμορφώνουν τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν με βάση ιστορικά δεδομένα. Τα πρωταρχικά reanalysis δεδομένα αφορούν ένα πολύ αραιό πλέγμα (30-50km ανά κόμβο), σε ύψος αρκετών χιλιομέτρων. Στην συνέχεια διακρίνονται σε global και mesoscale. Τα global reanalysis δεδομένα λαμβάνουν υπόψη το σύνολο της γήινης ατμόσφαιρας και -με χρήση μοντέλων- την αλληλεπίδραση των ψυχρών και θερμών αερίων ρευμάτων (π.χ. από τον Ισημερινό προς τους Πόλους) με τα θαλάσσια ρεύματα και την κατάσταση της στρατόσφαιρας, καταλήγοντας σε αποτελέσματα για ένα αραιό πλέγμα με 3ωρη ή 6ώρη χρονική ανάλυση. Τα mesoscale reanalysis δεδομένα προέρχονται κυρίως από χωρικές παρατηρήσεις μικρότερης έκτασης, κάνουν παραδοχές για

τις αρχικές συνθήκες στα όρια του πλέγματος που επιλύουν και σε συνδυασμό με μοντέλο (τοπικού) ατμοσφαιρικού οριακού στρώματος, παρέχουν αποτελέσματα που διακρίνονται για την καλύτερη χωρική ανάλυσή τους (1-10km) και την μικρότερο χρονικό βήμα (10λεπτο ή 1 ώρα)[1].

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα πέντε χρησιμοποιηθέντα global reanalysis δεδομένα (Blended Coastal Seas, CFSR-E, MERRA, EMD-ERA και NCAR basic), καθώς και το μοναδικό διαθέσιμο mesoscale reanalysis dataset (EMD-ConWx).

NCEP/NCAR

Είναι το αποτέλεσμα κοινής δραστηριότητας των National Centers for Environmental Prediction (NCEP) και National Center for Atmospheric Research (NCAR) των ΗΠΑ. Πρόκειται για το πρώτο σύνολο reanalysis δεδομένων που ήταν διαθέσιμο στην επιστημονική κοινότητα και προέρχεται από πληθώρα διαφορετικών μετρήσεων της ατμόσφαιρας (κίνηση νεφών από γεωστατικούς δορυφόρους, επίγειες μετρήσεις σε στεριά και θάλασσα με χρήση buoys, δορυφορικές μετρήσεις θερμοκρασίας με χρήση υπερύθρων, δεδομένα από μετεωρολογικά μπαλόνια, κλπ). Τα δεδομένα ξεκινούν από το έτος 1948, είναι δωρα, σε ανάλυση 2,5° και σε 2 ύψη: 42m και 10m. Η ακρίβειά τους βελτιώνεται με την πάροδο των ετών, αναγνωρίζεται όμως ότι επειδή βασίζονται σε μετρήσεις ατμοσφαιρικής πίεσης, η εφαρμογή τους σε «ψυχρά» κλίματα (Β. Ευρώπη, Β. Αμερική) έχει καλύτερα αποτελέσματα, εν αντιθέσει με την Ν. Ευρώπη όπου υπάρχουν εντονότερες τοπικές θερμοκρασιακές διαφορές [5].

Blended Coastal winds

Προέρχεται από το NOAA/NESDIS/National Climatic Data Center των ΗΠΑ [2], επεξεργασμένο (post processed) από την εταιρία EMD που κατασκευάζει το πρόγραμμα ανάλυσης ανεμολογικών δεδομένων και σχεδιασμού αιολικών πάρκων WindPRO [6]. Τα δεδομένα είναι 10λεπτα, σε ύψος 10m, με γεωγραφική ανάλυση 0.25° και προέρχονται από την σύνθεση πρωτογενούς πληροφορίας από (έως 6) δορυφόρους, εξοπλισμένους από scatterometers οι οποίοι καταγράφουν κυρίως τους επιφανειακούς ανέμους στις θάλασσες. Τα δεδομένα αυτά έχουν εφαρμογή σε παραθαλάσσιες περιοχές και νησιά.

CFSR-E(xtended)

Πρόκειται για δεδομένα από το Climate Forecast System Reanalysis του NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) των ΗΠΑ και υπάρχουν από το 1979 έως και σήμερα. Έως το 2010 είχαν χωρική ανάλυση 0.5° η οποία μειώθηκε στην συνέχεια σταδιακά σε 0.2°. Το extended set [3] είναι η μετεξέλιξη του αρχικού dataset και θεωρείται τρίτης γενιάς reanalysis set που εμπεριέχει αλληλεπιδράσεις ατμόσφαιρας-εδάφους-ωκεανών-παγετώνων (atmosphere-land-ocean-sea ice coupling). Τα δεδομένα είναι ωριαία και σε ύψος 10m.

MERRA

Σε αντίθεση με τα προηγούμενα, τα δεδομένα αυτά προέρχονται από την NASA (Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications) [4], υπάρχουν για τα έτη 1979 έως σήμερα, έχουν χρονική ανάλυση 1 ώρας, αναφέρονται σε ύψος 50m, έχουν ανάλυση 0,5°x0,6° και εμπεριέχουν θερμοκρασία και ατμοσφαιρική πίεση. Προκύπτουν από τη επεξεργασία δορυφορικών απεικονίσεων σε συνδυασμό με το κλιματικό μοντέλο Goddard Earth Observing System Model version 5 (GEOS-5) της NASA.

EMD ConWx

Πρόκειται για το αποτέλεσμα μιας Ευρωπαϊκής διακρατικής συνεργασίας 34 χωρών, με έδρα το ECMRWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Reading UK) το οποίο παρέχει προβλέψεις για όλες τις μετεωρολογικές υπηρεσίες της Ευρώπης [8]. Τα δεδομένα βασίζονται στο ERA-Interim dataset (global reanalysis data με ατμοσφαιρικό μοντέλο συνεπικουρούμενο από ωκεανογραφικά κυματικά και εδαφικά μοντέλα) και έχουν

διαμορφωθεί σε mesoscale με πυκνό πλέγμα (0,03° ή 3x3km), ωριαίο βήμα για διάφορα ύψη από 10m έως 200m [7].

EMD ERA

Τα αιολικά δεδομένα EMD ERA Global είναι μια παγκόσμια βάση δεδομένων που τηρείται από την EMD A/S και βασίζεται στην βάση δεδομένων ERA Interim του Ευρωπαϊκού Κέντρου για τις μεσοπρόθεσμες προβλέψεις καιρού (ECMWF). Περιέχει δεδομένα ταχύτητας ανέμου, διεύθυνσης ανέμου, θερμοκρασίας, και ατμοσφαιρικής πίεσης σε ύψη 10,25,50,67,100,150 και 200m. Η χωρική ανάλυση τους είναι 0,702° x 0,703° και η χρονική τους διάρκεια είναι από το 1979 ως σήμερα και ανάλυση ανά 6 ώρες.

Συνοπτικά τα έξι χρησιμοποιηθέντα reanalysis datasets παρουσιάζονται στον Πίνακα 1:

Δεδομένα	Ύψος (m) agl	Χωρική ανάλυση	Χρονική Ανάλυση	Χρονική περίοδος (χρησιμοποιηθείσα)	Τύπος
Blended Coastal Seas	10	0,25 deg.	6h	1988-2013	Reanalysis Global dataset
CFSR-E	10	0,5 deg.	1h	1979-2013	Reanalysis Global dataset
ConWx	10,25,50,75, 100,150,200	0,03 deg	1h	1993-2013	Reanalysis Mesoscale dataset
MERRA	50	~ 0,5	1h	1979-2013	Reanalysis Global dataset
NCAR basic	10 & ~42	2,5	6h	1979-2013	Reanalysis Global dataset

3. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΑΠΟ ΙΣΤΟΥΣ

Τα ανεμολογικά δεδομένα με τα οποία συγκρίνονται τα reanalysis δεδομένα, προέρχονται από τους παρακάτω μετεωρολογικούς ιστούς του ΚΑΠΕ, για τους οποίους υπάρχουν δεδομένα πολλών ετών με υψηλή πληρότητα (>85%). Όλοι οι ιστοί συλλέγουν τα δεδομένα σύμφωνα με το διεθνώς ισχύοντα πρότυπα για αιολικό δυναμικό (IEC/ISO 61400-12-1), τα δε ανεμόμετρά τους, σε κάθε αντικατάσταση, επαναβαθμονομούνται και ελέγχεται η διατήρηση των χαρακτηριστικών τους στον χρόνο.

Όνομα ιστού	Ύψος μέτρησης (m) agl	Χρονική ανάλυση	Χρονική περίοδος (χρησιμοποιηθείσα)	Μέση ταχύτητα ανέμου περιόδου (m/s)
Άνδρος	10	10 min	1991-2012	8,8
Λαύριο	100	10 min	2009-2012	7,6
Υμητός	10	10 min	1999-2006	6,0
Δίδυμα	10	10 min	1999-2010	6,9
Κρεμαστή	10	10 min	1999-2010	6,7
Μαρμάρι	10	10 min	1999-2010	9,9
Ρωγίο	10	10 min	1999-2009	6,6

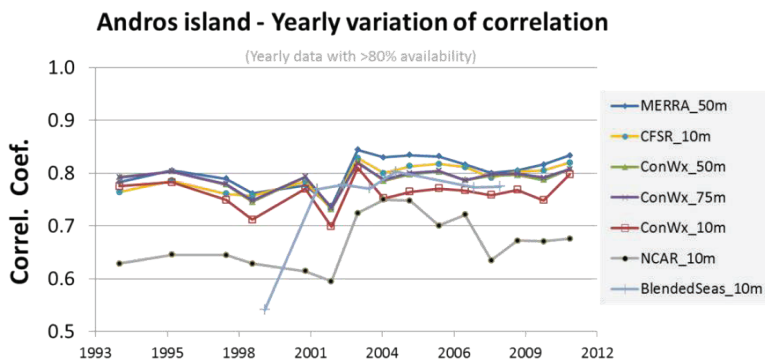
4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΣΥΣΧΕΤΙΣΩΝ

Η βασική μέθοδος συσχέτισης που χρησιμοποιήθηκε είναι η MCP Matrix, όπως υλοποιήθηκε από δύο software (WindRose και WindPRO). Συνοπτικά, τα ταυτόχρονα δεδομένα από τις δύο θέσεις κατηγοριοποιούνται σε Πίνακα (matrix), με κριτήριο την ταχύτητα και την διεύθυνση του ανέμου στην θέση αναφοράς (διαστήματα ταχύτητας: 1 ή 2m/s, τομείς διευθύνσεων: 8 έως 16). Έτσι, για το κοινό χρονικό διάστημα των δύο χρονοσειρών (μακροχρόνια δεδομένα αναφοράς και βραχυχρόνια δεδομένα της θέσης ενδιαφέροντος), υπολογίζονται, για κάθε κελί του Πίνακα, τα βασικά στατιστικά μεγέθη και οι συντελεστές γραμμικής παρεμβολής. Με την χρήση των συντελεστών αυτών, τα μακροχρόνια δεδομένα της θέσης αναφοράς ανάγονται σε μακροχρόνια στην θέση ενδιαφέροντος. Η υλοποίηση της μεθόδου από το WindRose [10], λαμβάνει επιπρόσθετα υπόψη τυχόν χρονική διαφορά των δεδομένων (λόγω απόστασης ή κακού συγχρονισμού των δεδομένων), εξετάζοντας σε ποια χρονική διαφορά μεγιστοποιείται ο συντελεστής συσχέτισης των ταχυτήτων.

Οι άλλες δύο μέθοδοι (Linear regression και Wind index) είναι απλούστερες (και ταχύτερες) υλοποιήσεις MCP, βασίζονται μόνο στην ταχύτητα του ανέμου, άρα δεν λαμβάνουν υπόψη ενδεχόμενη στροφή της ροής μεταξύ των δύο θέσεων, η οποία εμφανίζεται συχνά σε σύνθετες τοπογραφίες. Η Linear regression χρησιμοποιεί τα αποτελέσματα της γραμμικής παρεμβολής του συνόλου των ταχυτήτων, ενώ η Wind index συσχετίζει μηνιαία δεδομένα είτε μέσης ταχύτητας, είτε αναμενόμενης ενεργειακής παραγωγής Α/Γς στις δύο θέσεις.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

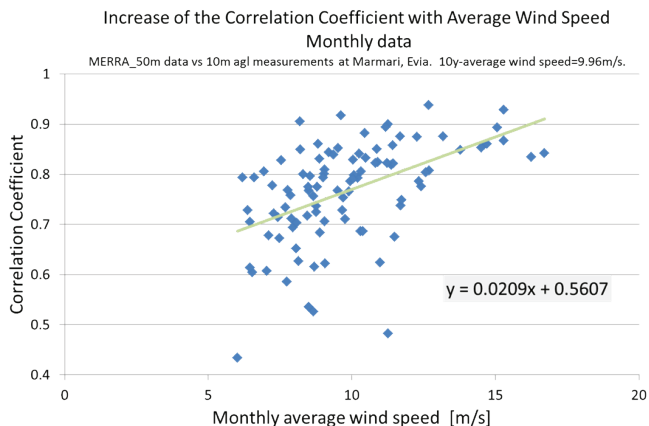
Στο Εικόνα 3 παρουσιάζεται η μεταβολή στο χρόνο, της συσχέτισης ετήσιων δεδομένων για την Άνδρο. Με τον τρόπο αυτό γίνεται φανερό ότι σε όλα τα reanalysis δεδομένα, υπάρχει βελτίωση της συσχέτισής τους με τις μετρήσεις του Ιστού, μετά το 2001. Ο μέσος συντελεστής συσχέτισης είναι περίπου ο ίδιος για τα 6 σετ δεδομένων (~0,80) εκτός από τα NCEP/NCAR όπου συστηματικά κείται κάτω του 0,7.



Εικόνα 3: Μεταβολή του συντελεστή συσχέτισης ανά χρόνο για την Άνδρο (πολλαπλές συσχέτισεις 12μηνιαίας διάρκειας δεδομένων)

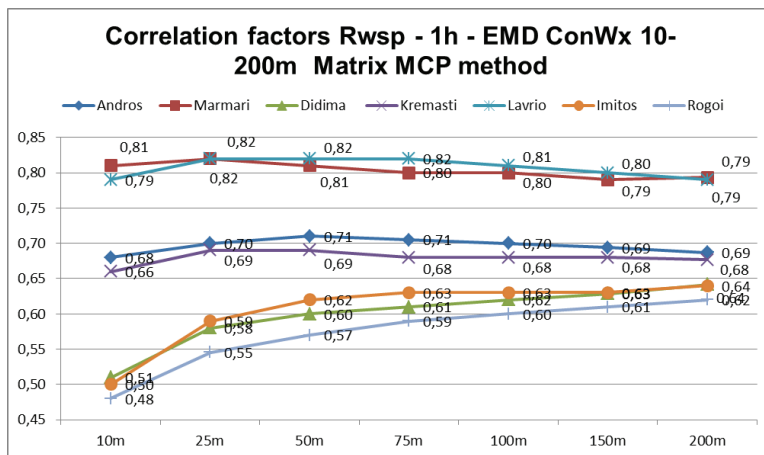
Είναι επίσης ενδιαφέρον, ότι υψηλότεροι συντελεστές συσχέτισης επιτυγχάνονται όσο αυξάνεται η μέση ταχύτητα του ανέμου, διότι προφανώς σε συνθήκες άπνοιας ή χαμηλών ταχυτήτων, η εγγύς τοπογραφία επιδρά στα στοχαστικά χαρακτηριστικά του αέρα. Άρα, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις έντονου ανάγλυφου και χαμηλών ταχυτήτων, πρέπει να εξετάζεται η ύπαρξη εγγύτατου κόμβου με reanalysis δεδομένα, ώστε να επιτευχθεί ικανοποιητική συσχέτιση. Έτσι, στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται για τον ιστό του Μαρμαρίου στην Εύβοια, ένα μέρος με εξαιρετικά υψηλό αιολικό δυναμικό (μ.ο. 10ετίας τα 9,9m/s), οι μηνιαίες συσχέτισεις (MCP Matrix μέθοδος) με τα MERRA δεδομένα, όπου παρόλη την διασπορά, είναι εμφανής η τάση για αυξημένους συντελεστές συσχέτισης σε μήνες με υψηλότερες

ταχύτητες.



Εικόνα 4: Επίδραση της μέσης ταχύτητας στην συσχέτιση.

Στην περίπτωση των reanalysis δεδομένων που διατίθενται σε διαφορετικά ύψη, όπως στα mesoscale ConWx, στις περισσότερες περιπτώσεις η επίδραση του ύψους είναι μικρή, με εξαίρεση ιστούς που βρίσκονται σε περιοχές με εξαιρετικά σύνθετη τοπογραφία (Δίδυμα, Ρωγοί) (Εικόνα 5). Εδώ, εκτός από την εγγύτητα του διαθέσιμου κόμβου στα reanalysis data, ένας άλλος παράγοντας υπεισέρχεται: η επιλογή της θέσης του ιστού. Πολλές φορές η επιδίωξη για υψηλό αιολικό δυναμικό, οδηγεί σε θέσεις με ιδιαιτερότητες, όπως ανάμεσα σε λόφους ή ορεινούς όγκους όπου γίνεται δυνατή η εκμετάλλευση του φαινομένου «καναλιού» (tunneling), κάτι που δεν αναπαρίσταται ικανοποιητικά στα reanalysis δεδομένα.



Εικόνα 5: Μεταβολή του συντελεστή συσχέτισης με το ύψος στο οποίο διατίθενται δεδομένα, για 7 διαφορετικούς ιστούς (mesoscale reanalysis dataset: EMD ConWx).

Στους πίνακες 3,4,5 παρουσιάζονται οι συντελεστές συσχέτισης χρησιμοποιώντας τις τρεις διαφορετικές μεθόδους MCP και τα διαθέσιμα δεδομένα reanalysis από τον 10m ιστό στο Μαρμάρι Ευβοίας (ενδεικτικό παράδειγμα). Η εξαγωγή των συντελεστών συσχέτισης πραγματοποιήθηκε για το σύνολο των ιστών.

Regression MCP method		Πίνακας 3: Συσχέτιση με τη μέθοδο Regression MCP για τον ιστό του Μαρμαρίου.						
No	Source	Height (m)	Period	Time step	R wsp	Rw index monthly	s index monthly	Distance (km)
1	Blended sea winds	10	1987-2013	6h	0.65	0.87	13.9%	11
2	CFSR	10	1984-2013	1h	0.75	0.94	10.1%	13
3	ConWx	10	1993-2013	1h	0.81	0.98	6.2%	2
4	ConWx	25	1993-2013	1h	0.81	0.98	6.4%	2
5	ConWx	50	1993-2013	1h	0.81	0.98	6.6%	2
6	ConWx	75	1993-2013	1h	0.80	0.98	6.6%	2
7	ConWx	100	1993-2013	1h	0.80	0.98	6.7%	2
8	ConWx	150	1993-2013	1h	0.79	0.98	7.0%	2
9	ConWx	200	1993-2013	1h	0.79	0.98	7.1%	2
10	EMD ERA	10	1993-2013	6h	0.69	0.93	10.2%	31
11	EMD ERA	25	1993-2013	6h	0.73	0.95	8.9%	31
12	EMD ERA	50	1993-2013	6h	0.76	0.96	8.3%	31
13	EMD ERA	75	1993-2013	6h	0.77	0.96	8.1%	31
14	EMD ERA	100	1993-2013	6h	0.77	0.97	8.0%	31
15	EMD ERA	150	1993-2013	6h	0.78	0.97	7.9%	31
16	EMD ERA	200	1993-2013	6h	0.78	0.97	8.0%	31
10	MERRA	50	1984-2013	1h	0.73	0.96	8.2%	26
11	NCAR Basic	10	1984-2013	6h	0.55	0.85	12.3%	80
12	NCAR Basic	42	1984-2013	6h	0.58	0.92	10.2%	80

Όπου Rwsr : συντελεστής συσχέτισης (ταχύτητας ανέμου), Rw index : συντελεστής συσχέτισης (ταχύτητας ανέμου) βασισμένος σε μηνιαία δεδομένα, s index είναι η τυπική απόκλιση (σφάλμα) της χρονοσειράς που θα παραχθεί από την συσχέτιση, distance η απόσταση του ιστού από τον πλησιέστερο κόμβο των δεδομένων.

Matrix MCP method		Πίνακας 4: Συσχέτιση με τη μέθοδο Matrix MCP για τον ιστό του Μαρμαρίου.						
No	Source	Height (m)	Period	Time step	R wsp	Rw index monthly	s index monthly	Distance (km)
1	Blended sea winds	10	1987-2013	6h	0.69	0.88	13.7%	11
2	CFSR	10	1984-2013	1h	0.77	0.94	9.9%	13
3	ConWx	10	1993-2013	1h	0.81	0.98	5.7%	2
4	ConWx	25	1993-2013	1h	0.82	0.98	6.0%	2
5	ConWx	50	1993-2013	1h	0.81	0.98	6.2%	2
6	ConWx	75	1993-2013	1h	0.80	0.98	5.9%	2
7	ConWx	100	1993-2013	1h	0.80	0.98	6.1%	2
8	ConWx	150	1993-2013	1h	0.79	0.98	6.3%	2
9	ConWx	200	1993-2013	1h	0.79	0.98	7.1%	2
10	EMD ERA	10	1993-2013	6h	0.75	0.94	9.7%	31
11	EMD ERA	25	1993-2013	6h	0.78	0.95	9.3%	31
12	EMD ERA	50	1993-2013	6h	0.70	0.97	8.2%	31
13	EMD ERA	75	1993-2013	6h	0.80	0.96	8.9%	31
14	EMD ERA	100	1993-2013	6h	0.80	0.96	8.7%	31
15	EMD ERA	150	1993-2013	6h	0.80	0.97	8.7%	31
16	EMD ERA	200	1993-2013	6h	0.80	0.96	8.8%	31
10	MERRA	50	1984-2013	1h	0.77	0.96	8.3%	26
11	NCAR Basic	10	1984-2013	6h	0.57	0.85	13.8%	80
12	NCAR Basic	42	1984-2013	6h	0.62	0.92	10.6%	80

Όπου Rwsr : συντελεστής συσχέτισης (ταχύτητας ανέμου), Rw index : συντελεστής συσχέτισης (ταχύτητας ανέμου) βασισμένος σε μηνιαία δεδομένα, s index είναι η τυπική απόκλιση (σφάλμα) της χρονοσειράς που θα παραχθεί από την συσχέτιση, distance η απόσταση του ιστού από τον πλησιέστερο κόμβο των δεδομένων.

Πίνακας 5: Συσχέτιση με τη μέθοδο Wind Index MCP για τον ιστό του Μαρμαριού.

Wind index MCP method								
No	Source	Height (m)	Period	Time step	Energy level corr. Factor	Rw index monthly	s index monthly	Distance (km)
1	Blended sea winds	10	1987-2013	6h	1.02	0.54	23.6%	11
2	CFSR	10	1984-2013	1h	1.00	0.72	20.0%	13
3	ConWx	10	1993-2013	1h	1.00	0.97	7.6%	2
4	ConWx	25	1993-2013	1h	1.00	0.97	7.4%	2
5	ConWx	50	1993-2013	1h	1.00	0.98	7.4%	2
6	ConWx	75	1993-2013	1h	1.00	0.97	7.4%	2
7	ConWx	100	1993-2013	1h	1.00	0.97	7.5%	2
8	ConWx	150	1993-2013	1h	1.00	0.97	7.8%	2
9	ConWx	200	1993-2013	1h	1.00	0.97	8.4%	2
10	EMD ERA	10	1993-2013	6h	1.01	0.72	19.2%	31
11	EMD ERA	25	1993-2013	6h	1.01	0.75	18.3%	31
12	EMD ERA	50	1993-2013	6h	1.01	0.76	18.0%	31
13	EMD ERA	75	1993-2013	6h	1.01	0.77	18.0%	31
14	EMD ERA	100	1993-2013	6h	1.01	0.77	17.7%	31
15	EMD ERA	150	1993-2013	6h	1.01	0.78	17.7%	31
16	EMD ERA	200	1993-2013	6h	1.01	0.78	17.6%	31
10	MERRA	50	1984-2013	1h	1.00	0.76	17.0%	26
11	NCAR Basic	10	1984-2013	6h	1.00	0.22	31.9%	80
12	NCAR Basic	42	1984-2013	6h	1.03	0.53	22.8%	80

Όπου Rw index : συντελεστής συσχέτισης (ταχύτητας ανέμου) βασισμένος σε μηνιαία δεδομένα, s index είναι η τυπική απόκλιση (σφάλμα) της χρονοσειράς που θα παραχθεί από την συσχέτιση, $distance$ η απόσταση του ιστού από τον πλησιέστερο κόμβο των δεδομένων.

6. ΣΥΝΟΨΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Γενικά τα δεδομένα ConWx, MERRA και ERA οδηγούν στην βελτίωση των συντελεστών συσχέτισης, αλλά υπάρχουν περιορισμοί στην επιλογή της χρήσης των βάσεων δεδομένων Reanalysis αν ο μετρητικός σταθμός (ιστός) είναι σε περιοχές με σύνθετο ανάγλυφο ή κοντά σε ακτές. Ο πιο σημαντικός παράγοντας είναι ότι θα πρέπει ο κόμβος των δεδομένων Reanalysis να αντιπροσωπευτικός του σταθμού μέτρησης.
- Η απόσταση μεταξύ του ανεμολογικού ιστού και του κόμβου της βάσης δεδομένων Reanalysis, η συμφωνία των ανεμολογικών ρόδων και η επιλογή της μεθόδου MCP είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες.
- Καλύτερα αποτελέσματα συσχέτισεων έχουμε σε μέρη με υψηλές ετήσιες ταχύτητες ανέμου.
- Στα δεδομένα ERA και ConWx, ο συντελεστής συσχέτισης βελτιώνεται με την αύξηση του ύψους των χρησιμοποιημένων δεδομένων Reanalysis, ανεξάρτητα με το ύψος του ανεμολογικού ιστού (σε μερικές περιπτώσεις παραμένει σχεδόν ίδιος).
- Τα δεδομένα ConWx γενικότερα παρέχει καλύτερη συσχέτιση και χαμηλότερη τυπική απόκλιση από άλλες βάσεις δεδομένων Reanalysis, όμως υπάρχουν εξαιρέσεις οφειλόμενες στην συνθετότητα του αναγλύφου, την εγγύτητα στη θάλασσα και την εποχικότητα (συνήθως στις μεθόδους linear regression και matrix).
- Στις μεθόδους Line Regression και Matrix οι συντελεστές συσχέτισης των δεδομένων ConWx είναι υψηλότεροι από αυτούς των ERA και των MERRA. Ο τιμές των συντελεστών συσχέτισης σε μεγάλα ύψη συγκλίνουν. Επίσης οι συντελεστές συσχέτισης των δεδομένων ERA (50m) είναι υψηλότερες από αυτές των NCEP/NCAR.
- Η ύπαρξη σύνθετης τοπογραφίας με 10μ ιστούς, επιφέρει μεγάλη επιρροή στις μετρήσεις και δυσχεραίνει την συσχέτιση (μέθοδοι Linear regression και matrix) με τα δεδομένα Reanalysis, αν και τα δεδομένα ConWx και MERRA λαμβάνουν υπόψη την τοπογραφία πολύ χοντρικά.
- Τα δεδομένα NCEP/NCAR δίνουν χαμηλές συσχέτισεις και υψηλές τυπικές αποκλίσεις.

9. Όταν υπάρχουν δεδομένα υψηλής συχνότητας (π.χ. ωριαία) τα σωστότερα αποτελέσματα δίνουν οι μέθοδοι MCP Linear Regression και Matrix, ενώ σε χαμηλής συχνότητας δεδομένα χρησιμοποιείται η μέθοδος Wind Index.

10. Η γραμμική προσαρμογή της μεθόδου Linear Regression θέτει τα δεδομένα σε γραμμή, που σημαίνει ότι «περίεργες» ακραίες τιμές και αποκλίσεις μπορούν να κατασταλούν δίνοντας σε αυτή τη μέθοδο ένα πλεονέκτημα όταν χρησιμοποιούνται δεδομένα αναφοράς χαμηλής ποιότητας (μεγάλης συχνότητας). Αντίθετα με τη μέθοδο Matrix αυτές οι «περίεργες» τιμές θεωρούνται έγκυρα δεδομένα και εμφανίζονται στην συσχέτιση. Αν τα δεδομένα Reanalysis είναι υψηλής ποιότητας (μικρής συχνότητας) η μέθοδος Matrix είναι ανώτερη όλων των υπολοίπων μεθόδων αφού μπορεί να προβλέψει σωστά ακόμη και την πιο «ασυνήθη» σχέση δεδομένων.

11. Ο συντελεστής συσχέτισης της μεθόδου Wind Index είναι εντελώς διαφορετικός από αυτούς των δύο άλλων μεθόδων MCP. Η μέθοδος αυτή γενικεύει τις αιολικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή μετατρέποντας τις χρονοσειρές σε μηνιαίες τιμές. Αυτός είναι ο μοναδικός τρόπος να έχουμε καλύτερη συσχέτιση σε σύνθετες συνθήκες, αλλά προφανώς με χαμηλότερη ποιότητα συσχέτισης.

12. Με τη μέθοδο Wind index τα δεδομένα MERRA και ERA είναι πιο γενικευμένα από τα ConWx λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους κελιού επίλυσης και σε αρκετές περιπτώσεις (πάντα με τη μέθοδο Wind Index) δίνουν υψηλότερους συντελεστές συσχέτισης.

13. Στη μέθοδο Wind index η αποδεκτή τυπική απόκλιση μπορεί να φτάσει μέχρι 15%. Μεγαλύτερες τιμές δείχνουν ότι η συσχέτιση είναι κακή και ότι τα δεδομένα του κόμβου Reanalysis δεν αντιπροσωπεύουν το ίδιο κλιματικό περιβάλλον.

14. Στη μέθοδο Wind Index μπορεί να παρουσιάζεται υψηλή τυπική απόκλιση των μηνιαίων τιμών (με υψηλή συσχέτιση) λόγω της εποχικότητας και συγκεκριμένα αν κάποια εποχή έχει πολύ περισσότερο ενέργεια από τις άλλες.

Συνοψίζοντας, ένας καλός και πρακτικός τρόπος για ασφαλείς συσχετίσεις είναι να χρησιμοποιούνται όσο το δυνατό περισσότερες βάσεις δεδομένων και μέθοδοι συσχέτισης. Να απορρίπτονται αυτές που δίνουν αισθητά λάθος αποτελέσματα, χαμηλές συσχετίσεις, υψηλή τυπική απόκλιση και να επιλέγεται το σετ των reanalysis δεδομένων που προσφέρει υψηλή συσχέτιση και μικρή τυπική απόκλιση. Θα πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη: το περιβάλλον που βρίσκεται ο ανεμολογικός ιστός, η αναφορά των δεδομένων Reanalysis, η απόσταση τους, η συμφωνία των ανεμολογικών ρόδων αλλά και οι κατανομές των ταχυτήτων τους.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Lileo S. et al. “*Long-term correction of wind measurements. State-of-the-art, guidelines and future work*”. Proceedings of the EWEA 2013, Vienna, Austria
- [2] Blended Sea Winds data provided by National Climatic Data Center (NCDC) Satellite Data Services, Asheville, USA, from website at <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/rsad/air-sea/seawinds.html>
- [3] CFSR-E data provided by Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) | NCAR - *Climate Data Guide*, Boulder, USA from website at <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>
- [4] Rienecker MM, Suarez MJ, Gelaro R, Todling R, Bacmeister J, Liu E, Bosilovich MG, Schubert SD, Takacs L, Kim GK, Bloom S, Chen J, Collins D, Conaty A, da Silva A, et al. “*MERRA - NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications*”, Journal of Climate, Vol. 24, No. 14, 3624-3648. doi: 10.1175/JCLI-D-11-00015.1, 2011.
- [5] Robert Kistler et al: “*The NCEP–NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly Means CD-ROM and Documentation*”, Bulletin of the American Meteorological Society, 2001 (available for free at: www.atmos.umd.edu/~ekalnay/Kistleretal.pdf).

- [6] WindPro: software "*User's Manual*" available through EMD International A/S, www.windpro.com, www.emd.dk.
- [7] ConWx website: <http://www.conwx.com> and EMD A/S website: http://emd.dk/files/windpro2.9/EMDConWx_MesoScale_data.pdf
- [8] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts website: <http://www.ecmwf.int>
- [9] Thoegersen et al. Measure-Correlate-Predict methods: Case studies and software implementation, EWEC 2007.
- [10] Foussekis D. "*User's Manual*", WindRose software, <http://windrose.gr>, CRES, 2013.
- [11] D.P. Dee et al., "The ERA Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system", *Wiley Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Volume 137, Issue 656, pages 553–597, April 2011 Part A διαθέσιμο από την ιστοσελίδα <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/qj.828/full>

**ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ
ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΩΝ ΑΕΡΟΤΟΜΩΝ ΤΥΠΟΥ NACA
0012 ΚΑΙ S809 ΣΕ ΧΑΜΗΛΟ ΑΡΙΘΜΟ REYNOLDS ΚΑΙ ΣΕ ΔΙΑΦΟΡΕΣ
ΠΥΚΝΟΤΗΤΕΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗΣ ΒΡΟΧΗΣ, ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥΣ ΣΕ
ΠΤΕΡΥΓΙΑ ΑΝΕΜΟΚΙΝΗΤΗΡΩΝ**

Ε. Δουβή*, Δ. Μάργαρης

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Εργαστήριο
Μηχανικής των Ρευστών και Εφαρμογών Αυτής, Τηλ./Fax: 2610 997202, e-mail:

douvi@mech.upatras.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της συγκεκριμένης ερευνητικής δραστηριότητας είναι η μελέτη της αεροδυναμικής απόδοσης υπό συνθήκες βροχής των αεροτομών τύπου NACA 0012 και S809, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πτερυγίων ανεμοκινήτρων. Έγινε πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς των συγκεκριμένων αεροτομών, αρχικά σε μονοφασική ροή αέρα και στη συνέχεια σε διφασική ροή αέρα – νερού για διάφορες πυκνότητες περιεχόμενης βροχής. Η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της μονοφασικής ροής με τα αντίστοιχα της διφασικής ροής αέρα - νερού είναι αναγκαία, ώστε να μελετηθούν οι επιπτώσεις της διφασικής ροής αέρα – νερού στην αεροδυναμική απόδοση. Η πειραματική ανάλυση αφορά τη διεξαγωγή πειραμάτων, αφού πρώτα τροποποιείται η αεροσήραγγα που διαθέτει ήδη το Εργαστήριο με την προσαρμογή ειδικών ακροφυσίων ψεκασμού νερού. Τα πειράματα μονοφασικής και διφασικής ροής γίνονται για την ίδια ταχύτητα αέρα. Η υπολογιστική ανάλυση γίνεται με το υπολογιστικό πακέτο ANSYS Fluent. Το πλέγμα γύρω από τις αεροτομές είναι τύπου C - mesh δομημένο με 80000 κελιά. Το μοντέλο με το οποίο εξετάστηκε το φαινόμενο της διφασικής ροής, δηλαδή το φαινόμενο της βροχής, είναι το Λαγκραντζιανό ασυνεχές μοντέλο διακριτής διφασικής ροής (Discrete Phase Model) στο οποίο η σωματιδιακή φάση θεωρείται διακριτή και διασκορπισμένη στη συνεχή φάση. Το μοντέλο τύρβης που επιλέχθηκε είναι το Realizable k - ε, μιας και αυτό έδωσε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα σε συνεργασία με το μοντέλο διφασικής ροής Discrete Phase Model (DPM). Τα αποτελέσματα των αεροδυναμικών συντελεστών, δηλαδή του συντελεστή άνωσης και του συντελεστή αντίστασης, του υπολογιστικού κώδικα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα πειραματικά αποτελέσματα για τον έλεγχο της εγκυρότητάς τους. Από τα υπολογιστικά αποτελέσματα προκύπτουν η κατανομή πίεσης και τα διανύσματα της ταχύτητας γύρω από τις αεροτομές για διάφορες γωνίες προσβολής. Υπολογίστηκαν επίσης τα σημεία δημιουργίας ρυακιών νερού, καθώς και το ύψος του φιλμ νερού πάνω στις αεροτομές. Σε συνθήκες διφασικής ροής αέρα νερού προκύπτει μείωση της αεροδυναμικής απόδοσης και για τις δύο αεροτομές. Συγκεκριμένα ο συντελεστής άνωσης υποβαθμίζεται και ο συντελεστής αντίστασης αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας περιεχόμενης βροχής και της γωνίας προσβολής.

Λέξεις Κλειδιά: Διφασική ροή, Αεροδυναμική συμπεριφορά, Αεροτομή, Πειραματική διερεύνηση, Υπολογιστική διερεύνηση.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1974 εμφανίσθηκε το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια αστείρευτη πηγή ενέργειας με αξιοσημείωτο δυναμικό και με δωρεάν πρώτη ύλη στη διάθεση της ανθρωπότητας και προβάλλει σήμερα ως μια από τις πιο κατάλληλες εναλλακτικές πηγές για την παραγωγή ηλεκτρισμού αλλά και για άλλες χρήσεις.

Οι ανεμοκινητήρες είναι εκτεθειμένοι σε διάφορες καιρικές συνθήκες καθώς λειτουργούν σε ανοικτό περιβάλλον. Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η μελέτη της αεροδυναμικής συμπεριφοράς σε συνθήκες βροχοπτώσεων των αεροτομών τύπου NACA 0012 και S809 που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πτερυγίων ανεμοκινητήρων.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει διάφορες μελέτες, κυρίως πειραματικές, σχετικά με τις επιπτώσεις της διφασικής ροής γύρω από αεροτομές και πτέρυγες. Η πρώτη αναλυτική εργασία που αφορά την επίδραση της βροχής στην απόδοση μιας αεροτομής έγινε από τον Rhode το 1941 [1]. Τα επόμενα χρόνια, αναπτύχθηκαν τεχνικές και μεθοδολογίες κλίμακας της επίδρασης της βροχής σε μοντέλα μικρής κλίμακας [2], [3]. Βρέθηκε πως η μείωση της απόδοσης εξαιτίας της δυνατής βροχής είναι αποτέλεσμα της αύξησης της τραχύτητας της επιφάνειας της πτέρυγας από το στρώμα νερού, τις κατανομές του φιλμ νερού και το πάχος του φιλμ σε διαδιάστατα πτερύγια [4], [5], [6]. Η πρόοδος της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (CFD) τα τελευταία χρόνια, συνέβαλε στο να ερευνηθούν σε βάθος οι διφασικές ροές. Η μοντελοποίηση των διφασικών ροών ρευστού σωματιδίου γίνεται με το μοντέλο Lagrange και το μοντέλο Euler, τα οποία επανεξετάστηκαν [7], [8].

Την τελευταία δεκαετία προσομοιώθηκε το φαινόμενο της δυνατής βροχής με τη βοήθεια υπολογιστικού κώδικα, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των κρατήρων που δημιουργούν τα σταγονίδια, την πυκνότητα περιεχόμενης βροχής, την τελική ταχύτητα των σταγονιδίων και τη μεταβολή της πυκνότητας του αέρα [9], [10]. Υπολογίσθηκε επίσης η διάσπαση των σταγονιδίων στο ροϊκό πεδίο αεροτομών, η οποία συμβαίνει σε περιοχές υψηλής πίεσης [11]. Αρκετές εργασίες ακόμα έχουν επικεντρωθεί στην επίδραση της βροχής στο συντελεστή άνωσης και στο συντελεστή αντίστασης μιας αεροτομής [12], [13], [14], [15].

Στην παρούσα εργασία γίνεται αρχικά μελέτη της μονοφασικής ροής αέρα γύρω από τις αεροτομές και στη συνέχεια μελέτη διφασικής ροής αέρα-νερού γύρω από τα ίδια σώματα. Για να μελετηθούν οι επιπτώσεις της διφασικής ροής αέρα-νερού στην αεροδυναμική απόδοση γίνεται σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων της μονοφασικής ροής αέρα με τα αντίστοιχα της διφασικής ροής αέρα-νερού.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Η ανοικτού κυκλώματος αεροσήραγγα του εργαστηρίου στην οποία εκτελέστηκαν τα πειράματα είναι το μοντέλο Plint & Partners TE44 Blower Tunnel. Ο θάλαμος μετρήσεων έχει εσωτερικές διαστάσεις 457 mm x 457 mm. Στις δύο πλευρές του καθώς και στην επάνω πλευρά του υπάρχουν τρία παράθυρα από plexiglass με αποσπώμενα πλαίσια τα οποία διευκολύνουν την πρόσβαση στα μοντέλα και επιτρέπουν την οπτική επαφή. Οι αεροτομές τύπου NACA 0012 και S809 που χρησιμοποιήθηκαν για τα πειράματα έχουν χορδή 15,24 cm και εκπέτασμα 45,72 cm. Ο αριθμός Reynolds των πειραμάτων είναι $Re=1 \times 10^5$ και αντιστοιχεί στην περιοχή χαμηλών αριθμών Reynolds, στην οποία λειτουργούν οι ανεμοκινητήρες.

Τα μοντέλα των αεροτομών τοποθετούνται στο κέντρο του θαλάμου μετρήσεων και συγκρατούνται με τη βοήθεια του αεροδυναμικού ζυγού τριών συσιστωσών AFA3 της εταιρίας TQ Education and Training Ltd, που μετρά την άνωση, την αντίσταση και τη ροπή πρόνευσης. Ο μηχανισμός συγκράτησης των μοντέλων που διαθέτει ο ζυγός είναι βαθμονομημένος στην περιφέρειά του και είναι ελεύθερος να περιστρέφεται κατά 360° . Είναι επίσης δυνατή η σύνδεση

της μονάδας ενδείξεων με ηλεκτρονικό υπολογιστή ο οποίος διαθέτει το ειδικό λογισμικό VDAS (Versat Data Acquisition System) της εταιρίας TQ, το οποίο επιτρέπει την επίδειξη, φωτογράφιση και καταχώρηση σε πίνακες των ενδείξεων της άνωσης, της αντίστασης και της ροπής πρόνευσης έτσι ώστε αυτές να είναι διαθέσιμες για περαιτέρω επεξεργασία.

Για την τροποποίηση της αεροσήραγγας ώστε να είναι δυνατή η προσομοίωση του φυσικού φαινομένου της βροχής εντός αυτής χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι ακροφυσίων, τα οποία τοποθετήθηκαν πριν το θάλαμο μετρήσεων. Οι πυκνότητες περιεχόμενης βροχής που μελετήθηκαν σε αυτή την εργασία είναι $20,548 \text{ g/m}^3$ και $41,096 \text{ g/m}^3$ με διάμετρο σταγονιδίων $1,9 \text{ mm}$ και $37,745 \text{ g/m}^3$ και $75,491 \text{ g/m}^3$ με διάμετρο σταγονιδίων $1,2 \text{ mm}$.

Για συνθήκες έντονης βροχόπτωσης υπάρχει ένας εμπειρικός τύπος [10], τόσο για την πειραματική όσο και για την υπολογιστική διερεύνηση, που συνδέει την πυκνότητα των σωματιδίων LWC (Liquid Water Content) με την ένταση (ρυθμό) βροχόπτωσης R (Rain Rate):

$$\text{LWC} = 0,054 R^{0,84}$$

και για συνθήκες ελαφριάς βροχόπτωσης υπάρχει η αντίστοιχη σχέση

$$\text{LWC} = 0,0889 R^{0,84}$$

Τα αποτελέσματα της διφασικής ροής αέρα - νερού συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της μονοφασικής ροής, ώστε να μελετηθούν οι επιπτώσεις της διφασικής ροής αέρα – νερού στην αεροδυναμική απόδοση.

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

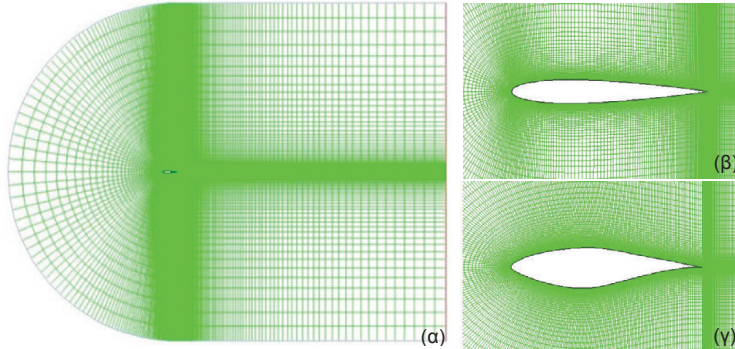
Η υπολογιστική ανάλυση έγινε με το υπολογιστικό πακέτο ANSYS Fluent. 6.3.26 [16]. Η γεωμετρία των αεροτομών NACA 0012 και S809, οι οριακές συνθήκες καθώς και το υπολογιστικό πλέγμα κατασκευάστηκαν με τον προεπεξεργαστή Gambit 2.4.6 [17]. Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε για τις αεροτομές είναι δομημένο πλέγμα τύπου C, όπου η αεροτομή περιβάλλεται από ένα ημικύκλιο και ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο. Το ύψος του πρώτου κελιού πάνω στην επιφάνεια της αεροτομής τέθηκε ίσο με 10^{-5} m , με τιμές του y^+ περίπου στο 0,2, ώστε να μπορεί να επιλυθεί το οριακό στρώμα. Το πλέγμα πυκνώνει ολόένα και περισσότερο στις περιοχές όπου χρειάζεται μεγαλύτερη υπολογιστική ακρίβεια, όπως στην περιοχή δίπλα στην αεροτομή. Η μελέτη ανεξαρτητοποίησης από το πλέγμα έδειξε πως ένα πλέγμα με 80000 κελιά είναι ικανό να δώσει ικανοποιητική λύση, ανεξάρτητη του μεγέθους του πλέγματος (Εικόνα 1).

Η υπολογιστική επίλυση της διφασικής ροής έγινε με το μοντέλο που ονομάζεται μοντέλο διακριτής φάσης (Discrete Face Model, DPM) και αποτελείται από σφαιρικά σωματίδια, τα οποία αντιπροσωπεύουν σταγόνες ή φυσαλίδες και διασκορπίζονται στο συνεχές μέσο. Για την απλοποίηση της λύσης και της μείωσης του υπολογιστικού χρόνου, τα σταγονίδια θεωρούνται σφαιρικά και εισάγονται στην ελάχιστη απόσταση πριν την αεροτομή, όπου η ροή είναι αδιατάρακτη. Η Εικόνα 2 δείχνει ενδεικτικά πως γίνεται η επιλογή αυτής της απόστασης και την επιφάνεια εισαγωγής σωματιδίων για την επίλυση της διφασικής ροής γύρω από αεροτομή. Η μοντελοποίηση της τύρβης έγινε με το μοντέλο τύρβης Realizable $k - \epsilon$, που προτάθηκε από τους Shih et al [18] και είχε στόχο να καλύψει τις ατέλειες των παραδοσιακών $k - \epsilon$ μοντέλων τύρβης, υιοθετώντας έναν καινούριο τύπο για την τυρβώδη συνεκτικότητα. Η επιλογή του συγκεκριμένου μοντέλου τύρβης έγινε καθώς συνεργάζεται καλύτερα με το μοντέλο της διακριτής φάσης.

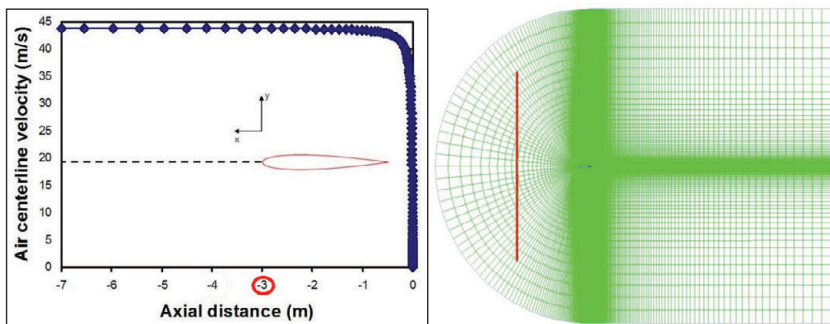
Τα σωματίδια εισάγονται με αρχικές συνθήκες ταχύτητας στο x άξονα ίση με την ταχύτητα του αέρα και στον y άξονα ίση με την ταχύτητα ελεύθερης πτώσης των σωματιδίων. Η ταχύτητα αυτή δίνεται από τον ακόλουθο τύπο του Markowitz [19] συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων:

$$V_T(\text{m/s}) = 9,58 \left\{ 1 - \exp \left(- \frac{d(\text{mm})^{1,147}}{1,77} \right) \right\}$$

όπου V_T είναι η ταχύτητα ελεύθερης πτώσης και d η διάμετρος σε mm.



Εικόνα 1: Δομημένο πλέγμα τύπου C γύρω από τις αεροτομές (α), λεπτομέρεια κοντά στην αεροτομή NACA 0012 (β) και στην αεροτομή S809 (γ)



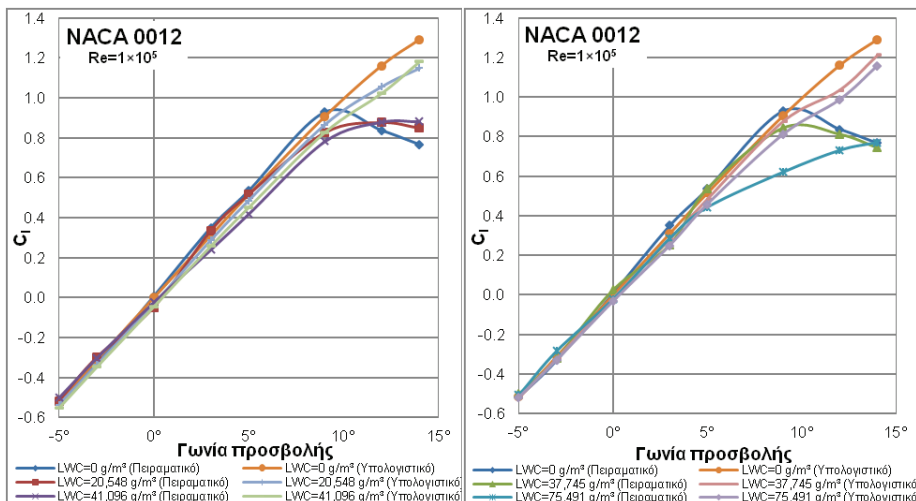
Εικόνα 2: Ταχύτητα της ροής κατά μήκος του κεντρικού άξονα για την επιλογή του σημείου εισαγωγής των σταγονιδίων (αριστερά) και επιφάνεια εισαγωγής σωματιδίων για την επίλυση της διφασικής ροής γύρω από τις αεροτομές (δεξιά)

Τα σταγονίδια διασπώνται κατά την πρόσκρουση τους πάνω στην επιφάνεια της αεροτομής. Για τη διάσπαση των σταγονιδίων χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Taylor Analogy Breakup (TAB) [20]. Το μοντέλο TAB θεωρεί ότι η ταλάντωση του σταγονιδίου είναι ανάλογη με αυτήν ενός συστήματος απόσβεσης μάζας-ελατηρίου υπό την επίδραση εξαναγκασμένης ταλάντωσης.

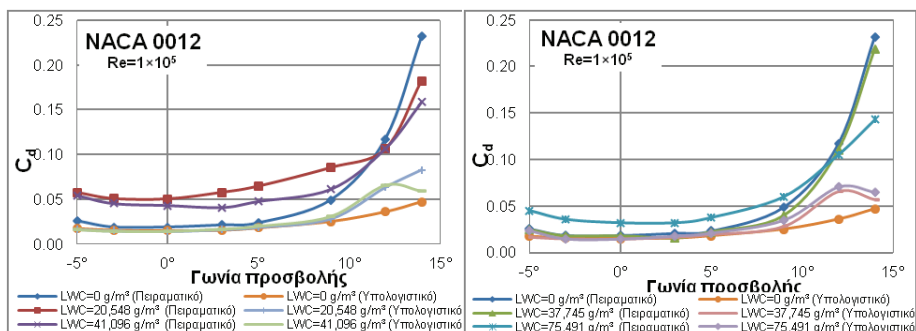
Οι Thomson and Marrochello [21] παρουσίασαν ένα μοντέλο για τον υπολογισμό του σημείου από όπου ξεκινά η δημιουργία ρυακιών νερού στην επιφάνεια της αεροτομής. Η αρχή πάνω στην οποία βασίζεται αυτό το μοντέλο είναι πως τα ρυακία σχηματίζονται στο σημείο όπου η διαμητική τάση της διεπιφάνειας μεταξύ του ρευστού και της υγρής επιφάνειας ισούται με τη διαμητική τάση που προκαλείται από τις αεροδυναμικές δυνάμεις στο ρευστό.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην περίπτωση της μελέτης της διφασικής ροής για τις αεροτομές τύπου NACA 0012 και S809 προσομοιώθηκαν ροές για γωνίες προσβολής 0° , $\pm 3^\circ$, $\pm 5^\circ$, 9° , 12° , 14° και 16° , για αριθμό Reynolds $Re=1 \times 10^5$ και για πυκνότητες περιεχόμενης βροχής (Liquid Water Content) $20,548 \text{ g/m}^3$, $41,096 \text{ g/m}^3$, $37,745 \text{ g/m}^3$ και $75,491 \text{ g/m}^3$.



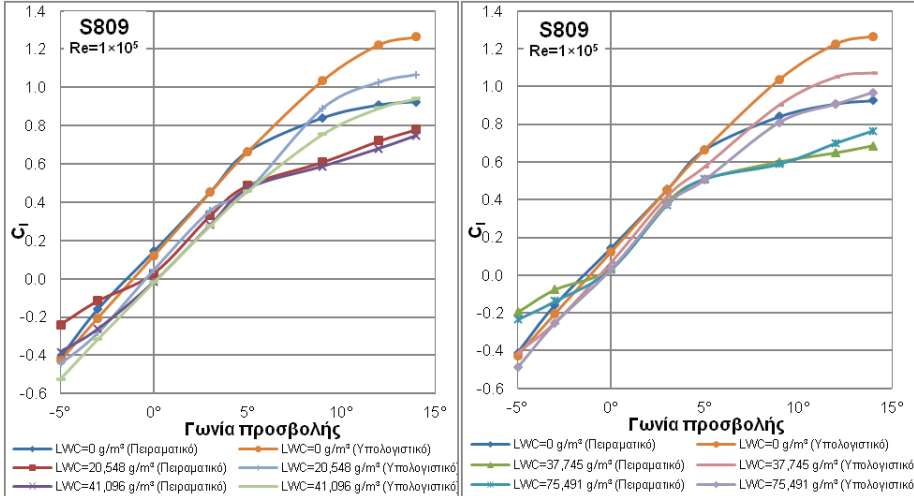
Εικόνα 3: Μεταβολή του συντελεστή άνωσης C_l συναρτήσει της γωνίας προσβολής α της αεροτομής NACA 0012 για διφασική ροή αέρα – νερού με πυκνότητες περιεχόμενης βροχής $20,548 \text{ g/m}^3$, $41,096 \text{ g/m}^3$, $37,745 \text{ g/m}^3$ και $75,491 \text{ g/m}^3$ και αριθμό Reynolds $Re=1 \times 10^5$



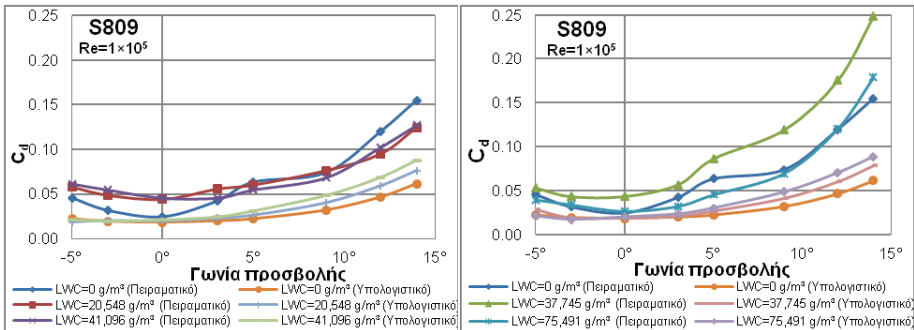
Εικόνα 4: Μεταβολή του συντελεστή αντίστασης C_d συναρτήσει της γωνίας προσβολής α της αεροτομής NACA 0012 για διφασική ροή αέρα – νερού με πυκνότητες περιεχόμενης βροχής $20,548 \text{ g/m}^3$, $41,096 \text{ g/m}^3$, $37,745 \text{ g/m}^3$ και $75,491 \text{ g/m}^3$ και αριθμό Reynolds $Re=1 \times 10^5$

Από τις Εικόνες 3 και 5 προκύπτει πως σε συνθήκες διφασικής ροής ο συντελεστής άνωσης υποβαθμίζεται και για τις δυο αεροτομές. Για πυκνότητες περιεχόμενης βροχής $LWC=20,548 \text{ g/m}^3$ και $LWC=41,096 \text{ g/m}^3$ ο συντελεστής άνωσης υποβαθμίζεται και για τις δυο αεροτομές. Μεγαλύτερη μείωση της απόδοσης με την αύξηση της πυκνότητας περιεχόμενης

βροχής παρουσίασε η αεροτομή S809. Η μείωση του συντελεστή άνωσης εξαιτίας της βροχής αυξήθηκε με τη γωνία προσβολής. Για πυκνότητες περιεχόμενης βροχής $LWC=37,745 \text{ g/m}^3$ και $LWC=75,491 \text{ g/m}^3$ ο συντελεστής άνωσης υποβαθμίστηκε σε μικρότερο βαθμό. Μεγαλύτερη μείωση της απόδοσης με την αύξηση της πυκνότητας περιεχόμενης βροχής παρουσίασε και σε αυτήν την περίπτωση η αεροτομή S809. Τα πειραματικά αποτελέσματα συμφωνούν με τα αντίστοιχα υπολογιστικά μέχρι και τη γωνία απώλειας στήριξης.



Εικόνα 5: Μεταβολή του συντελεστή άνωσης C_l συναρτήσει της γωνίας προσβολής α της αεροτομής S809 για διφασική ροή αέρα – νερού με πυκνότητες περιεχόμενης βροχής $20,548 \text{ g/m}^3$, $41,096 \text{ g/m}^3$, $37,745 \text{ g/m}^3$ και $75,491 \text{ g/m}^3$ και αριθμό Reynolds $Re=1 \times 10^5$

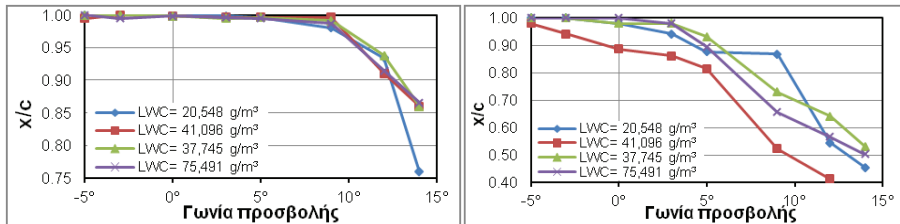


Εικόνα 6: Μεταβολή του συντελεστή αντίστασης C_d συναρτήσει της γωνίας προσβολής α της αεροτομής S809 για διφασική ροή αέρα – νερού με πυκνότητες περιεχόμενης βροχής $20,548 \text{ g/m}^3$, $41,096 \text{ g/m}^3$, $37,745 \text{ g/m}^3$ και $75,491 \text{ g/m}^3$ και αριθμό Reynolds $Re=1 \times 10^5$

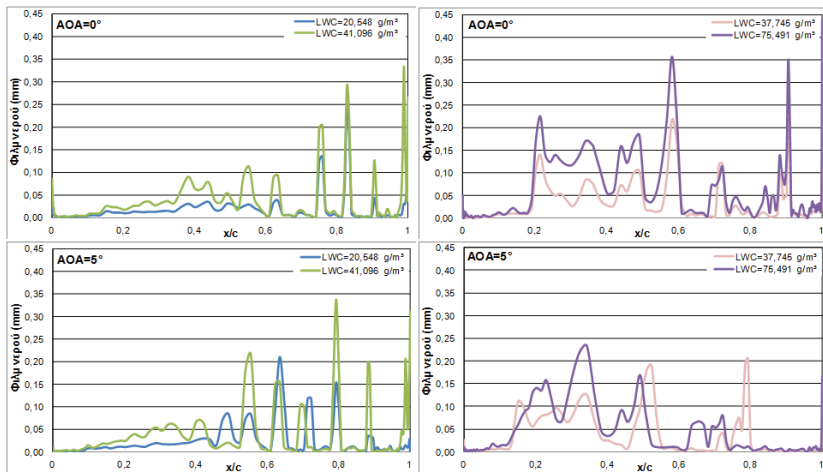
Από τις Εικόνες 4 και 6 προκύπτει όπως ήταν αναμενόμενο πως ο συντελεστής αντίστασης αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας περιεχόμενης βροχής και με την αύξηση της γωνίας προσβολής. Η μίξη του αέρα και των σταγόνων της βροχής οδηγεί σε μεγαλύτερη αντίσταση λόγω επιφανειακής τριβής και άρα σε μεγαλύτερη ολική αντίσταση. Το υπολογιστικό πακέτο δεν

έχει καταφέρει να συλλάβει το ίδιο μέγεθος αύξησης του συντελεστή αντίστασης με αυτό των πειραματικών μετρήσεων, παρόλο που η μορφή και η κλίση της καμπύλης είναι ίδια.

Η Εικόνα 7 παρουσιάζει τα σημεία δημιουργίας ρυακιών νερού στην άνω επιφάνεια των αεροτομών NACA 0012 (αριστερά) και S809 (δεξιά). Για μικρές γωνίες προσβολής το σημείο όπου δημιουργούνται τα ρυακία νερού είναι κοντά στο χείλος εκφυγής και με αύξηση της γωνίας προσβολής αυτό το σημείο μετακινείται προς το χείλος προσβολής των αεροτομών. Στην αεροτομή S809 δημιουργούνται ρυακία νερού νωρίτερα από ότι στην αεροτομή NACA 0012.



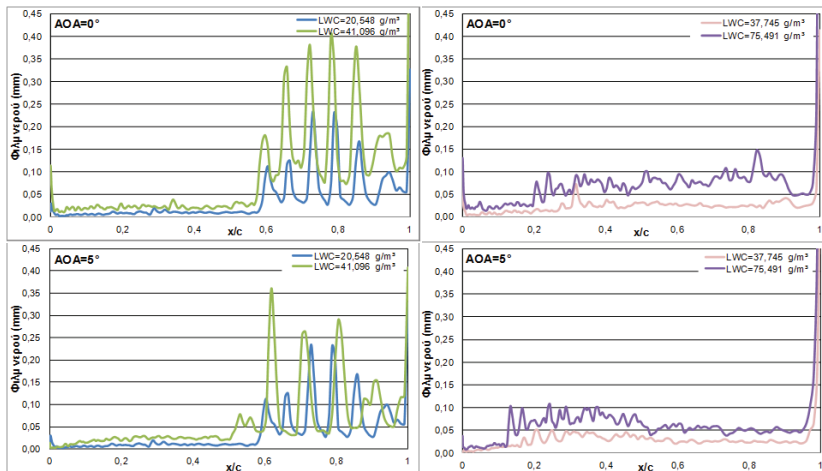
Εικόνα 7: Σημεία δημιουργίας ρυακιών νερού στην άνω επιφάνεια της αεροτομής NACA 0012 (αριστερά) και της αεροτομής S809 (δεξιά) συναρτήσει της γωνίας προσβολής για διάφορες πυκνότητες περιεχόμενης βροχής και αριθμό Reynolds $Re=1 \times 10^5$



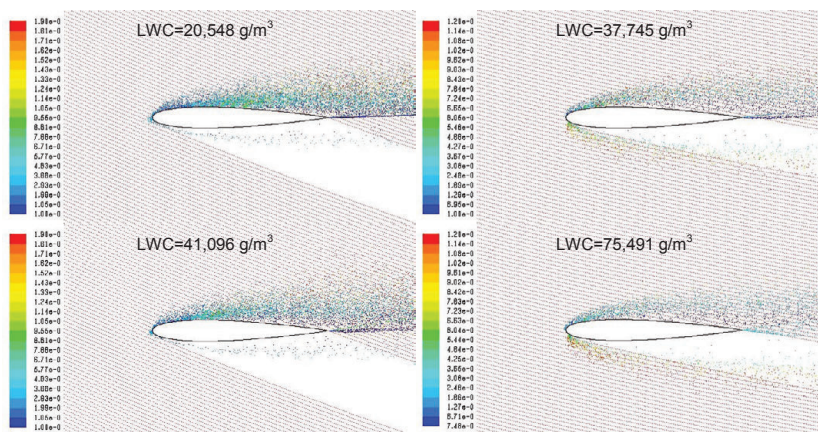
Εικόνα 8: Κατανομή του φιλμ νερού στην άνω επιφάνεια της αεροτομής NACA 0012 για γωνίες προσβολής 0° και 5° για διάφορες πυκνότητες περιεχόμενης βροχής

Από τις Εικόνες 8 και 9 προκύπτει πως το ύψος του φιλμ νερού πάνω στις αεροτομές NACA 0012 και S809 αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας περιεχόμενης βροχής. Το μέγιστο ύψος του φιλμ νερού βρίσκεται στο χείλος εκφυγής για γωνία προσβολής 0° για όλες τις πυκνότητες περιεχόμενης βροχής και για τις δυο αεροτομές. Με αύξηση της γωνίας προσβολής το μέγιστο ύψος του φιλμ νερού παραμένει στο χείλος εκφυγής για την αεροτομή S809, ενώ για την αεροτομή NACA 0012 μετακινείται προς το χείλος προσβολής. Το κυματώδες σχήμα των παραπάνω καμπυλών υποδηλώνει το σχήμα που έχει το φιλμ νερού πάνω στις αεροτομές. Για πυκνότητες περιεχόμενης βροχής $LWC=20,548 \text{ g/m}^3$ και $LWC=41,096 \text{ g/m}^3$ έχει μεγαλύτερο

ύψος το φιλμ νερού πάνω στην αεροτομή S809, ενώ για πυκνότητες περιεχόμενης βροχής $LWC=37,745 \text{ g/m}^3$ και $LWC=75,491 \text{ g/m}^3$ πάνω στην αεροτομή NACA 0012.



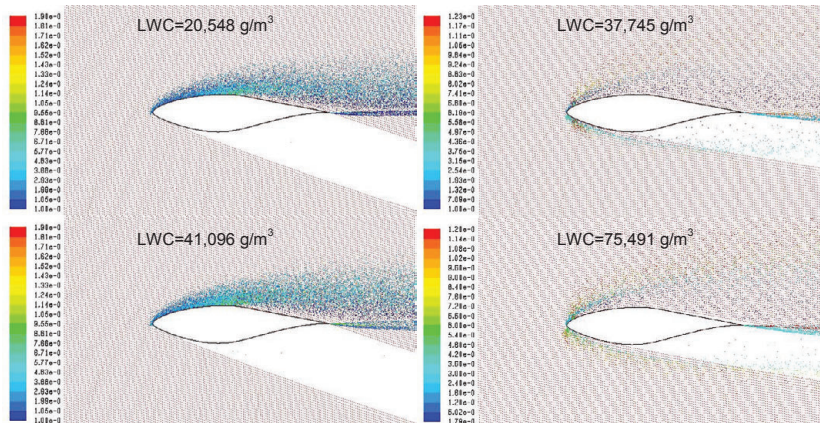
Εικόνα 9: Κατανομή του φιλμ νερού στην άνω επιφάνεια της αεροτομής S809 για γωνίες προσβολής 0° και 5° για διάφορες πυκνότητες περιεχόμενης βροχής



Εικόνα 10: Κατανομή των σταγονιδίων γύρω από την αεροτομή NACA 0012 για διφασική ροή αέρα – νερού για διάφορες πυκνότητες περιεχόμενης βροχής, αριθμό Reynolds $Re=1 \times 10^5$ και γωνία προσβολής 3° . Τα σωματίδια είναι χρωματισμένα ανάλογα με τη διάμετρο τους.

Στις Εικόνες 10 και 11 παρουσιάζεται η κατανομή των σταγονιδίων γύρω από τις αεροτομές NACA 0012 και S809 για διφασική ροή αέρα – νερού για διάφορες πυκνότητες περιεχόμενης βροχής, για γωνία προσβολής 3° . Τα υπολογιστικά αποτελέσματα δείχνουν πως τα σταγονίδια διασπώνται σε περιοχές αυξημένης πίεσης, κοντά στις αεροτομές. Στο χείλος προσβολής της αεροτομής διακρίνεται ένα νέφος σωματιδίων και στο χείλος εκφυγής τα ρυάκια νερού. Για την

αεροτομή S809 καθώς και για σωματίδια μεγαλύτερης διαμέτρου αυτά τα ρυάκια είναι πιο έντονα. Το ποσοστό των σταγονιδίων που διασπώνται εξαρτάται από τη διάμετρο των σταγονιδίων και τη γωνία προσβολής. Παρατηρείται πως διασπώνται περισσότερα σταγονίδια μεγαλύτερης διαμέτρου σε μικρότερες γωνίες προσβολής και μικρότερες πυκνότητες περιεχόμενης βροχής. Διακρίνονται επίσης οι «ζώνες σκίασης» της διφασικής ροής.



Εικόνα 11: Κατανομή των σταγονιδίων γύρω από την αεροτομή S809 για διφασική ροή αέρα – νερού για διάφορες πυκνότητες περιεχόμενης βροχής, αριθμό Reynolds $Re=1 \times 10^5$ και γωνία προσβολής 3° . Τα σωματίδια είναι χρωματισμένα ανάλογα με τη διάμετρο τους.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την συγκεκριμένη εργασία προέκυψε πως η επίπτωση της βροχής είναι πολύπλοκη διαδικασία, κατά την οποία προκύπτει μείωση της αεροδυναμικής απόδοσης. Ο κώδικας CFD μπορεί να προσομοιώσει το φυσικό φαινόμενο της βροχής. Μεγαλύτερη μείωση της απόδοσης με την αύξηση του LWC παρουσίασε η αεροτομή S809. Η μείωση της αεροδυναμικής απόδοσης οφείλεται στη δημιουργία φιλμ νερού πάνω στην αεροτομή και στη διάσπαση των σταγονιδίων. Παρουσιάστηκε μεγαλύτερη υποβάθμιση μέχρι τη γωνία απώλειας στήριξης σε μεγαλύτερες γωνίες προσβολής και μεγαλύτερες τιμές του LWC. Επίσης, στην περίπτωση της διφασικής ροής εμφανίστηκε απώλεια στήριξης σε μεγαλύτερες γωνίες προσβολής. Από τα υπολογιστικά αποτελέσματα προέκυψε πως τα σταγονίδια σπάνε σε περιοχές αυξημένης πίεσης, το ποσοστό των σταγονιδίων που διασπώνται εξαρτάται από το μέγεθος των σταγονιδίων και τη γωνία προσβολής και τα μικρότερα σταγονίδια δεν ακολουθούν αυστηρά τη ροή. Τέλος, το σημείο δημιουργίας ρυακίων νερού κινείται προς το χείλος προσβολής με αύξηση της γωνίας προσβολής. Έγινε εφαρμογή του τύπου του Wilson [22] για τη μελέτη του συντελεστή ισχύος τριπτέρυγου ανεμοκινήτηρα οριζοντίου άξονα με αριθμό ταχυτροφίας $\lambda=6$ σε συνθήκες μονοφασικής ροής αέρα και διφασικής ροής αέρα – νερού. Ο τύπος του Wilson έχει προκύψει από πολλά εμπειρικά και υπολογιστικά δεδομένα και λαμβάνει υπόψη τον αριθμό των πτερυγίων, τον αριθμό ταχυτροφίας και την αεροδυναμική απόδοση της αεροτομής του πτερυγίου, δηλαδή τον λόγο της αεροδυναμικής αντίστασης προς την άνοση για τη γωνία προσβολής σχεδιασμού. Το πτερύγιο με αεροτομή NACA 0012 παρουσιάζει μικρότερη μείωση της απόδοσης του σε συνθήκες διφασικής ροής. Μεγαλύτερη μείωση της απόδοσης παρουσιάστηκε για μεγαλύτερες διαμέτρους σταγονιδίων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Rhode, R., 1941, "Some Effects on Rainfall on Flight of Airplanes and on Instrument Indications," NACA TN 803.
- [2] Bilanin, A.J., 1985, "Scaling Laws for Testing of High Lift Airfoils Under Heavy Rainfall," AIAA 23rd Aerospace Science Meeting, Reno, NV, U.S.A.
- [3] Dunham, R.E., Bezos, G.M., Gentry, G.L., Melson, E.M., 1985, "Two-dimensional wind tunnel tests of a transport-type airfoil in a water spray," AIAA 23rd Aerospace Sciences Meeting, Reno, NV, U.S.A..
- [4] Hastings E.C., Manuel G.S., 1985, "Scale – Model Tests of Airfoils in Simulated Heavy Rain," J. Aircraft, 22(6), pp 536-540.
- [5] Hansman J., Barsotti M., 1985, "Surface Wetting Effects on a Laminar Flow Airfoil in Simulated Heavy Rain,," J. Aircraft, 22(12), pp 1049-1053.
- [6] Thompson B.E., Jang J., Dion J.L., 1995, "Wing Performance in Moderate Rain," J. Aircraft, 32(5), pp 1034-1039.
- [7] Decker R.A., Valentine J.R., 1995, "A Lagrangian-Eulerian Scheme for Flow around an Airfoil in Rain," Int. J. Multiphase Flow, 21(4), pp. 639-648.
- [8] Durst F., Milojevic D., Schonung, B., 1984, "Eulerian and Lagrangian predictions of particulate two-phase flows: a numerical study," Appl. Math. Modelling, 8, pp. 101-115.
- [9] Wan T., Wu, S.W., 2004, "Aerodynamic Analysis under Influence of Heavy Rain," 24th International Congress of the Aeronautical Sciences, Yokohama, Japan.
- [10] Wan, T., Wu S.W., 2009, "Aerodynamic Analysis Under the Influence of Heavy Rain," J. Aeronautics, Astronautics and Aviation, 41(3), pp. 173-180.
- [11] Tan J., Papadakis M., Sampath M.K., 2005, "Computational Study of Large Droplet Breakup in the Vicinity of an Airfoil," Office of Aviation Research, Washington.
- [12] Razavi S.E., Nozari N., 2009, "On the Rotational Behavior of the Euler Equations at High Angles of Attack," International Review of Mechanical Engineering, 3(6), pp. 702-708.
- [13] Zhang R.M., Cao Y.H., 2010, "Study of Aerodynamics Characteristics of an Airfoil in Rain," J. Aerospace Power, 25(9), pp. 2064-2069.
- [14] Ismail M., Yihua C., Ming Z., 2012, "Airfoils Aerodynamic Efficiency Study in Heavy Rain via Two Phase Flow Approach," World Academy of Science, Engineering and Technology, 67, pp. 1053-1060.
- [15] Wan T., Pan S.P., 2010, "Aerodynamic Efficiency Study under the Influence of Heavy Rain via Two-Phase Flow Approach," 27th International Congress of the Aeronautical Sciences, Nice, France.
- [16] Bezos G.M., Dunham R.E., Gentry G.L., Melson W.E., 1992, "Wind Tunnel Aerodynamic Characteristics of a Transport Type Airfoil in a Simulated Heavy Rain Environment," NASA Technical Paper No. 3184.
- [17] Fluent Inc., 2006, "FLUENT 6.3 User's Guide."
- [18] Fluent Inc., 2007, "GAMBIT 2.4 User's Guide."
- [19] Shih T.H., Liou W.W., Shabbir A., Zhu J., 1995, "A new $k - \epsilon$ eddy – viscosity model for high Reynolds number turbulent flows – model development and validation," Computers Fluids, 24, pp. 227-238.

- [20] Taylor G., 1963, "The Shape and Acceleration of a Drop in a High Speed Air Stream," In the Scientific Papers of G. I. Taylor, ed., G. K. Batchelo.
- [21] Thompson B.E., Marrochello M.R., 1999, "Rivulet Formation in Surface-Water Flow on an Airfoil in Rain," AIAA Journal, 37(1), pp. 45-49.
- [22] Wilson R.E., Lissaman P.B.S., Walker S.N., 1976, "Aerodynamic performance of wind turbines," Oregon State University, Corvallis, USA.

ΝΑΡΚΟΠΕΔΙΑ ΚΑΙ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ – ΕΞΕΤΑΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΩΝ ΔΥΤ. ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ & ΗΠΕΙΡΟΥ

Κ. Χ. Γκαράκης^{1*}, Κ. Λουκίδης², Ζ.Κ. Σπένδος³

^{1*}Ενεργειακός Μηχανικός, MSc – Εμπειρογνώμων ΕΣΥΔ

Γ. Κοτζιά 23 - Τ.Κ. 15126 Μαρούσι, email: kgarakis@otenet.gr

²ΕΝ.ΤΕ.ΚΑ Α.Ε.

³Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Τ.Ε

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις περιφέρειες Ηπείρου και Δυτικής Μακεδονίας, έχουν προσδιοριστεί περίπου 1.100 ευρύτερες περιοχές που περιέχουν είτε παλαιά ναρκοπέδια, είτε ύποπτους χώρους. Η καταγραφή και οριοθέτηση των επικίνδυνων χώρων είναι ελλιπής και ανακριβής, βασισμένη κυρίως σε προφορικές πληροφορίες πολιτών ή μετά από πρόκληση ατυχημάτων. Οι καταγεγραμμένες πληροφορίες για επικίνδυνους ή ύποπτους χώρους βρίσκονται διασκορπισμένες σε διάφορους Φορείς (Ελληνικός Στρατός, Δασαρχεία, Νομαρχίες, ΟΤΑ κ.λπ.). Οι περιοχές στις οποίες εντοπίζονται τέτοιοι χώροι είναι ως επί το πλείστον ορεινές, δασωμένες και δύσβατες, και κατά συνέπεια είναι δύσκολη η χαρτογράφηση τους είτε με συμβατικά μέσα είτε μέσω τεχνολογίας. Μία πρώτη προσπάθεια συγκέντρωσης της παραπάνω πληροφορίας έγινε μέσω του δικτυακού τόπου αποναρκοθέτησης παλαιών ναρκοπεδίων & ύποπτων χώρων στις περιφέρειες Δυτ. Μακεδονίας & Ηπείρου (<https://mines.pdm.gr>) στον οποίο παρέχεται ενημερωτικό υλικό (συντεταγμένες, χάρτες, έκταση, αριθμός και είδος ναρκών κτ) για τους χώρους που έχουν επισημανθεί ως ναρκοπέδια αλλά και ύποπτους χώρους.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το υλικό του προαναφερθέντος δικτυακού τόπου αποτυπωμένο σε επίπεδο δορυφορικών χαρτών Google Earth και συγκρίνεται με τα γήπεδα εγκατάστασης των υπό ανάπτυξη αιολικών πάρκων όπως αυτά εμφανίζονται στον ιστότοπο του Γεωπληροφοριακού Χάρτη της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ) (www.rae.gr/geo).

Από την παραπάνω σύγκριση προκύπτει ότι πλήθος αδειοδοτημένων γηπέδων εγκατάστασης αιολικών πάρκων περιλαμβάνουν εντός τους ναρκοπέδια ή ύποπτες περιοχές για νάρκες. Η ερευνητική ομάδα προβαίνει σε καταγραφή και αποτύπωση αυτών των περιοχών (ύποπτος ή βεβαιωμένος χώρος, είδος ναρκών και άλλες διαθέσιμες πληροφορίες) ώστε να μπορούν να πληροφορηθούν οι ενδιαφερόμενοι.

Τέλος, οι συγγραφείς παραθέτουν τις προτάσεις τους για τον έλεγχο της ύπαρξης ναρκοπεδίων – περιοχών με κατάλοιπα πολέμου, στις περιοχές ανάπτυξης των αιολικών πάρκων κατά την φάση αδειοδότησης των έργων αλλά και της μέτρησης του αιολικού δυναμικού μέσω της εγκατάστασης συστημάτων μέτρησης αιολικού δυναμικού.

Λέξεις Κλειδιά: αιολικά πάρκα, ναρκοπέδια, αδειοδότηση, κατάλοιπα πολέμου.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών πάρκων (Α/Π) είναι σήμερα ίση με 1,9 GW ενώ υπάρχει έντονο επενδυτικό ενδιαφέρον για περαιτέρω ανάπτυξη σε όλη τη χώρα. Ένας παράγοντας που δεν πιθανά δεν εξετάζεται κατά τον σχεδιασμό - αδειοδότηση Α/Π στην Ελλάδα είναι η ύπαρξη ξεχασμένων υπόπτων χώρων με κατάλοιπα πολέμου (θαμμένα πυρομαχικά, οβίδες, χειροβομβίδες, νάρκες κα).

Ένας τεράστιος αριθμός θαμμένων πυρομαχικών (νάρκες, χειροβομβίδες, ρουκέτες, βλήματα κλπ) έχουν διασπαρθεί στην Βόρεια Ελλάδα και ιδιαίτερα στη βορειοδυτική (Δυτ. Μακεδονία – Ήπειρος) κατά τη διάρκεια των πολεμικών επιχειρήσεων που έλαβαν μέρος εκεί στο πρόσφατο παρελθόν (Γερμανοϊταλική-Βουλγαρική εισβολή, Εθνική αντίσταση, εμφύλιος). Στις περιοχές αυτές συγκαταλέγονται τα ορεινά συγκροτήματα: Γράμμου, Βισοίου, Βόρα, Πιερίων, Πίνδου, περιοχές ενδιαφέροντος στις οποίες σχεδιάζεται η υλοποίηση Α/Π.

Οι καταγεγραμμένες πληροφορίες για επικίνδυνους ή ύποπτους χώρους βρίσκονται διασκορπισμένες σε διάφορους Φορείς (Ελληνικός Στρατός, Δασαρχεία, Νομαρχίες, ΟΤΑ κ.λπ.) σε ποικίλες μορφές. Οι περιοχές στις οποίες εντοπίζονται τέτοιοι χώροι είναι ως επί το πλείστον ορεινές, δασωμένες και δύσβατες, και κατά συνέπεια η χαρτογράφηση τους είναι δύσκολη είτε με συμβατικά μέσα είτε με τεχνολογία [1].

Μία πρώτη προσπάθεια συγκέντρωσης της παραπάνω πληροφορίας έγινε μέσω του δικτυακού τόπου αποναρκοθέτησης παλαιών ναρκοπεδίων & ύποπτων χώρων στις περιφέρειες Δυτ. Μακεδονίας & Ηπείρου (<https://mines.pdm.gr>) στον οποίο παρέχεται ενημερωτικό υλικό (συντεταγμένες, χάρτες, έκταση, αριθμό και είδος ναρκών κα) για τους χώρους που έχουν επισημανθεί ως ναρκοπέδια αλλά και ύποπτους χώρους

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται το υλικό του προαναφερθέντος δικτυακού τόπου αποτυπωμένο σε επίπεδο δορυφορικών χαρτών Google Earth και συγκρίνεται με τα γήπεδα εγκατάστασης των υπό ανάπτυξη αιολικών πάρκων όπως αυτά εμφανίζονται στον ιστότοπο του Γεωπληροφοριακού Χάρτη της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ) [2].

Η ερευνητική ομάδα έχει εντοπίσει πλήθος αδειοδοτημένων γηπέδων εγκατάστασης αιολικών πάρκων που περιλαμβάνουν εντός τους ναρκοπέδια ή ύποπτες περιοχές για νάρκες και προβαίνει σε καταγραφή και αποτύπωση αυτών των περιοχών (ύποπτος ή βεβαιωμένος χώρος, είδος ναρκών και άλλες διαθέσιμες πληροφορίες) ώστε να μπορούν να πληροφορηθούν οι ενδιαφερόμενοι .

Συμπερασματικά, οι συγγραφείς παραθέτουν τις προτάσεις τους για τον έλεγχο της ύπαρξης ναρκοπεδίων – περιοχών με κατάλοιπα πολέμου, στις περιοχές ανάπτυξης των αιολικών πάρκων κατά την φάση αδειοδότησης των έργων αλλά και της μέτρησης του αιολικού δυναμικού μέσω της εγκατάστασης συστημάτων μέτρησης αιολικού δυναμικού (ΣΜΑΔ).

Η διερεύνηση αυτή είναι εξαιρετικά σημαντική για τις εταιρείες που αναπτύσσουν Α/Π όσον αφορά την ασφάλεια του προσωπικού που εμπλέκεται, από το στάδιο ανάπτυξης έως και την κατασκευή καθώς και του κόστους που θα επωμιστούν για τον έλεγχο και την πιθανή αποναρκοθέτηση της περιοχής.

2. Η ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Η ύπαρξη ανά την Ελλάδα καταλοίπων πολέμου κυρίως από τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο και τον εμφύλιο αποτελεί σημαντική απειλή για τους πολίτες και την εξασφάλιση ασφαλούς περιβάλλοντος. Σύμφωνα με στοιχεία της 8¹⁵ Μεραρχίας στα Ιωάννινα, στην Περιφέρεια Ηπείρου τα τελευταία 60 έτη έχουν σκοτωθεί 57 πολίτες εκ των οποίων 3 παιδιά και έχουν τραυματιστεί 12 [3].

Παλαιά ναρκοπέδια αλλά και άσκαστα πυρομαχικά έχουν εντοπιστεί σε κεντρικά σημεία μέσα σε πόλεις, σε οδικούς άξονες, σε χιονοδρομικά κέντρα αλλά και σε χώρους αναψυχής και άθλησης (δάση, αλσύλλια). Πρόσθετα υπάρχουν ύποπτοι χώροι – παλαιά ναρκοπέδια σε ορεινές τοποθεσίες που αποτέλεσαν θέατρο άγριων πολεμικών επιχειρήσεων. Οι χώροι

αυτοί είναι μια διαρκή απειλή για τους κατοίκους των περιοχών αυτών, τουριστών, βοσκών, αγροτών, κυνηγών, περιπατητών αλλά και εμπόδιο στην υλοποίηση έργων (δρόμοι, κτίρια, έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αεροδρόμια, τεχνικά έργα κτ).



Εικόνες 1,2 : Φωτογραφίες από χώρο παλαιού ναρκοπεδίου. Φαίνονται τα πασαλάκια σήμανσης του [3].



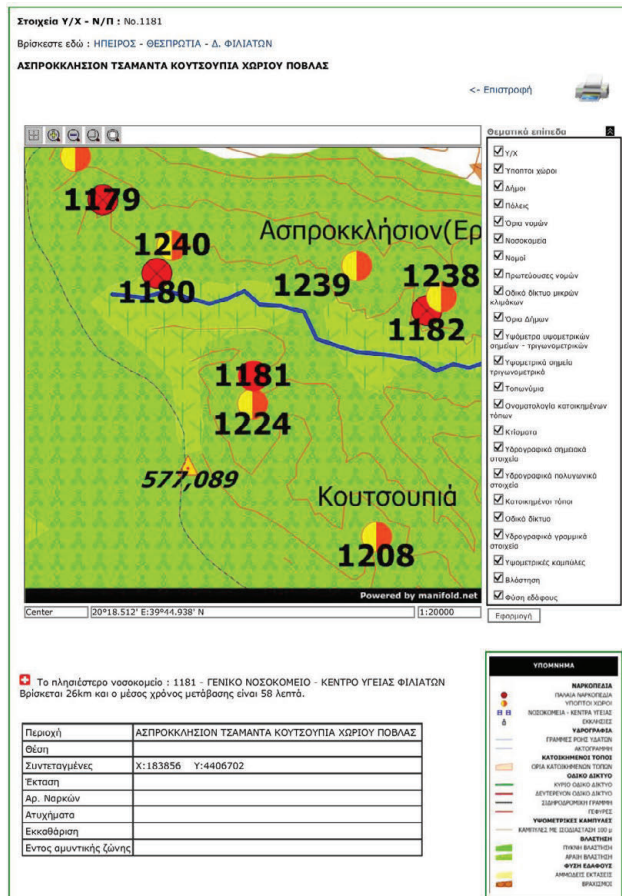
Εικόνα 3,4 (από αριστερά) : Κύθνος - Αντιαρματική νάρκη, γερμανικής προέλευσης [5], Πετρούπολη - βλήμα όλμου [6], όλα του Β' Παγκοσμίου Πολέμου.

Η ύπαρξη υπόπτων χώρων και παλαιών ναρκοπεδίων θέτει περιορισμούς στην προσβασιμότητα των κατοίκων, στην αξιοποίηση και την ανάπτυξη των εκτάσεων αυτών αλλά και της περιβαλλοντικής τους προστασίας. Ενώ επίσης θα πρέπει να τονιστεί ότι δυσχεραίνεται και η πρόσβαση των σωστικών μέσων σε περίπτωση φυσικών καταστροφών (π.χ πυρκαγιές).

Η χώρα μας έχει κυρώσει σειρά αποφάσεων της ΕΕ (πχ 96/588 ΚΕΠΠΑ, 98/627 ΚΕΠΠΑ, 98/628 ΚΕΠΠΑ) σχετικών με την άρση ναρκοπεδίων, καθώς και τη συνθήκη ΟΗΕ της Ottawa για την εξουδετέρωση ναρκών κατά προσωπικού [1].

Αναφορικά με τις πηγές πληροφόρησης για τους ύποπτους χώρους – παλαιά ναρκοπεδία, σήμερα υπάρχει μόνο ο δικτυακός τόπος της Περιφέρειας Δυτικής Μακεδονίας (<https://mines.pdm.gr>), ο οποίος κατασκευάστηκε ως αποτέλεσμα σύμβασης της Περιφέρειας και ιδιωτικής εταιρείας. Σκοπός ήταν η αποναρκοθέτηση 300.000 τετραγωνικών μέτρων στην περιοχή Γράμμου-Βίτσι σε ένα πρόγραμμα αξίας 4,47 εκατ. Ευρώ [7].

Επιπλέον, προβλεπόταν η κατασκευή πληροφοριακού συστήματος που θα ήταν ικανό να υποστηρίξει ηλεκτρονικά τις διαδικασίες διαχείρισης και παρακολούθησης ναρκοπεδίων και υπόπτων χώρων και τη λήψη αποφάσεων καθ' όλο τον κύκλο αποναρκοθέτησης και εκκαθάρισής τους (από τις αρχικές υποψίες και ενδείξεις, τον εντοπισμό, την καταγραφή και την λήψη απόφασης, οργάνωση εκτέλεση επίβλεψη ως και την ολοκλήρωση και απόδοσή τους). Συνάμα, θα είχε στόχο να διευκολύνει - τυποποιήσει την ανατροφοδότηση του συστήματος με νέες πληροφορίες για τη δυναμική ενημέρωσή του, την επικοινωνία και ανταλλαγή εγγράφων και δεδομένων μεταξύ όλων των εμπλεκομένων φορέων και να συμβάλλει στην αποτελεσματική αντιμετώπιση του θέματος [1].



Εικόνα 5 : Μια τυχαία θέση ύποπτης περιοχής – παλαιού ναρκοπεδίου από την ιστοσελίδα της Περιφέρειας Δυτικής Μακεδονίας [1].

Παρόλα αυτά, το έργο δεν ολοποιήθηκε εξ' ολοκλήρου και η υπόθεση εκκρεμεί σήμερα στη Δικαιοσύνη, ενώ το έργο απεντάχθηκε από το Γ' ΚΠΣ αφού όπως διαπιστώθηκε το έργο δεν ήταν λειτουργικό και βιώσιμο σε σχέση με το αντικείμενο και τους στόχους του αλλά και δεν ικανοποιούσε τους σκοπούς του προγράμματος [8].

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι δεν υπάρχει νομικό πλαίσιο για την πιστοποίηση ασφαλούς αποτελέσματος – εκκαθάρισης και απόδοσης χώρων ελεύθερων από κατάλοιπα πολέμου πέρα από το Τάγμα Εξουδετέρωσης Ναρκών Ξηράς του Ελληνικού Στρατού.

Το Τάγμα Εξουδετέρωσης Ναρκών Ξηράς (ΤΕΝΞ) είναι ο μοναδικός φορέας με την απαιτούμενη τεχνογνωσία, υλικοτεχνική υποδομή και αρμοδιότητα για την ανάσυρση, πλήρη εξουδετέρωση πυρομαχικών και απόδοση χώρων «καθαρούς» από τέτοια υλικά με πρακτικό εκκαθάρισης. Η μονάδα αυτή εργάζεται καθημερινά στον έλεγχο και την εκκαθάριση ύποπτων χώρων μετά και από αιτήματα δημόσιων φορέων και ιδιωτών. Μέχρι σήμερα έχουν εκκαθαριστεί 153.610 στρέμματα και έχουν αρθεί 420.000 νάρκες και 855.000 πυρομαχικά πάσης φύσεως [9]. Τα τελευταία χρόνια έχουν εντατικοποιηθεί οι εργασίες ελέγχου και αποναρκοθέτησης ύποπτων χώρων και παλαιών ναρκοπεδίων και υπάρχει σημαντική μείωση αυτών των χώρων.

Οι εργασίες του ΤΕΝΞ πραγματοποιούνται μέσω σύμβασης, αφού πρώτα υπάρξει έλεγχος της περιοχής για τον χρόνο που θα απαιτηθεί. Το κόστος των εργασιών είναι ανάλογο της μορφολογίας του εδάφους, του χρόνου εκκαθάρισης και της πρόσβασης με ένα μέσο εκτιμώμενο κόστος περίπου 9.500 ευρώ τα 10 στρέμματα (οι τιμές που ορίζονται από πάγια διαταγή) [10].



Εικόνες 6,7 (από αριστερά): Φωτογραφίες από εργασίες του ΤΕΝΞ [9], [6].

Τα πιο πρόσφατα στοιχεία για την σημερινή κατάσταση των ύποπτων χώρων – παλαιών ναρκοπεδίων διαθέτουν οι Στρατιωτικοί Σχηματισμοί των δύο Περιφερειών (8^η και 9^η Ταξιαρχία).

Λόγω της έλλειψης επικαιροποίησης του προαναφερθέντος δικτυακού τόπου της Περιφέρειας Δυτικής Μακεδονίας από το τέλος του 2007, η ερευνητική ομάδα προσπάθησε να λάβει στοιχεία των ύποπτων χώρων – παλαιών ναρκοπεδίων από το ΓΕΣ. Μετά από προσπάθειες δύο και πλέον μηνών δεν κατέστη δυνατό η παραλαβή των στοιχείων που είχαν ζητηθεί.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε είχε σαν στόχο τον εντοπισμό αδειοδοτημένων γηπέδων εγκατάστασης Α/Π που περιλαμβάνουν εντός τους ύποπτους χώρους για κατάλοιπα πολέμου – παλαιά ναρκοπέδια σε επίπεδο δορυφορικών χαρτών Google Earth.

Η πρώτη πηγή δεδομένων είναι τα γήπεδα εγκατάστασης των Α/Π όπως αυτά δίνονται από τον ιστότοπο του Γεωπληροφοριακού Χάρτη της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ) [2]. Τα πολύγωνα αυτά μαζί με την πληροφορία που παρέχουν για το κάθε έργο εξάχθηκαν σε αρχείο τύπου kmz.

Η δεύτερη πηγή δεδομένων είναι ο δικτυακός τόπος αποναρκοθέτησης παλαιών ναρκοπεδίων & ύποπτων χώρων στις περιφέρειες Δυτ. Μακεδονίας & Ηπείρου [1] ο οποίος παρέχει ενημερωτικό υλικό για τους χώρους που έχουν επισημανθεί ως ναρκοπέδια αλλά και ύποπτους χώρους (συντεταγμένες, χάρτες, έκταση, αριθμό και είδος ναρκών κα) όπου είναι

διαθέσιμα αυτά τα στοιχεία. Τα δεδομένα αυτά έχουν μετατραπεί σε αρχείο τύπου kmz από την ιστοσελίδα – OFFroader.gr (ηλεκτρονικό περιοδικό για όλες τις υπαίθριες δραστηριότητες) [4].

Με την αντιπαραβολή των δύο αρχείων τύπου kmz στο Google Earth εντοπίστηκαν 15 γήπεδα εγκατάστασης που έχουν εντός τους ύποπτους χώρους – παλιά ναρκοπέδια, στις Περιφέρειες Δυτικής Μακεδονίας και Ηπείρου.

Δυστυχώς μέχρι σήμερα δεν έχουν ληφθεί επικαιροποιημένα στοιχεία από το ΓΕΣ ώστε να υπάρχει μία σαφής εικόνα για τους ύποπτους χώρους, αφού όπως προαναφέρθηκε υπάρχει συνεχής έλεγχος και αποναρκοθέτηση περιοχών από το ΤΕΝΞ.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στις εικόνες 8,9 παρουσιάζεται ένα γήπεδο εγκατάστασης Α/Π στο οποίο εντός του υπάρχει ύποπτος χώρος-παλιό ναρκοπέδιο (φαίνονται τα πασαλάκια σήμανσης) καθώς και ο μετεωρολογικός σταθμός μέτρησης του αιολικού δυναμικού.

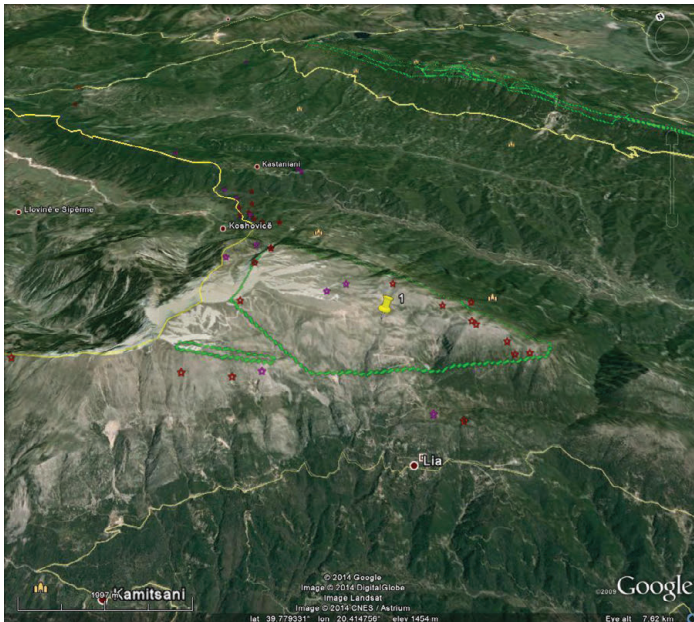


Εικόνα 8 : Χώρος γηπέδου εγκατάστασης Α/Π. Δεξιά διακρίνεται πασαλάκι σήμανσης ναρκοπεδίου.

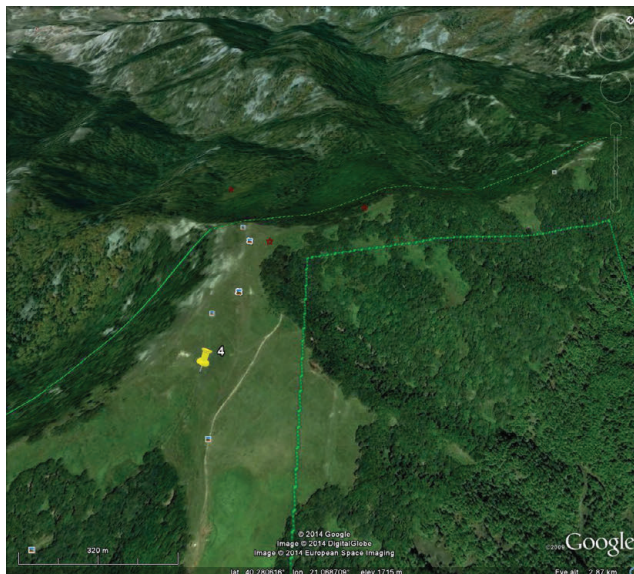


Εικόνα 9 : Χώρος γηπέδου εγκατάστασης Α/Π. Στο βάθος διακρίνεται ΣΜΑΔ (βελάκι).

Στις εικόνες 10 και 11 παρουσιάζονται δύο γήπεδα εγκατάστασης αιολικών πάρκων στις Περιφέρειες Δ. Μακεδονίας και Ηπείρου στα οποία εντοπίστηκαν ύποπτοι χώροι - παλιά ναρκοπέδια.



Εικόνα 10 : Χώρος γηπέδου εγκατάστασης Α/Π με ύποππους χώρους – παλιά ναρκοπέδια.



Εικόνα 11 : Χώρος γηπέδου εγκατάστασης Α/Π με ύποππους χώρους – παλιά ναρκοπέδια.
Στους πίνακες 1 και 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εργασίας.

Πίνακας 1 : Οι θέσεις των έργων και η κατηγορία του χώρου που εντοπίστηκε.

A/A	Θέση	Δήμος	Περιφερειακή Ενότητα	Περιφέρεια	Κατηγορία Χώρου
1	Τσαμάντας	Παγωνίου-Φιλιατών	Θεσπρωτίας-Ιωαννίνων	Ηπείρου	11 ύποπτοι χώροι - 2 ναρκοπέδια κατά προσωπικού
2	Οχυρό	Κόνιτσας	Ιωαννίνων	Ηπείρου	4 ναρκοπέδια κατά προσωπικού
3	Τρικλάριον Όρος	Καστοριάς-Νεοστίου-Πρεσπών	Καστοριάς - Φλώρινας	Δ. Μακεδονίας	1 ναρκοπέδιο κατά προσωπικού
4	Παλαιοκρίμνη	Βοίου - Νεστίριου	Καστοριάς-Κοζάνης	Δ. Μακεδονίας	2 ναρκοπέδια κατά προσωπικού
5	Πετροβούνι	Φλώρινας	Φλώρινας	Δ. Μακεδονίας	4 ύποπτοι χώροι
6	Παυλίνη - Ανήλιο	Φλώρινας	Φλώρινας	Δ. Μακεδονίας	5 ύποπτοι χώροι
7	Αγνάντι	Καστοριάς-Φλώρινας	Καστοριάς-Φλώρινας	Δ. Μακεδονίας	2 ύποπτοι χώροι
8	Ξωφλημένη	Καστοριάς-Φλώρινας	Καστοριάς-Φλώρινας	Δ. Μακεδονίας	1 ύποπτος χώρος
9	Περικοπή	Φλώρινας	Φλώρινας	Δ. Μακεδονίας	1 ύποπτος χώρος & 1 ναρκοπέδιο κατά προσωπικού
10	Καζάνι	Καστοριάς	Καστοριάς	Δ. Μακεδονίας	2 ναρκοπέδια κατά προσωπικού
11	Κώστωλα	Καστοριάς	Καστοριάς	Δ. Μακεδονίας	1 ύποπτος χώρος
12	Ανεμοδαρμένη	Καστοριάς-Πρεσπών	Καστοριάς-Φλώρινας	Δ. Μακεδονίας	1 ύποπτος χώρος
13	Μαγούλα	Εορδαίας	Κοζάνης	Δ. Μακεδονίας	1 ναρκοπέδιο κατά προσωπικού
14	Βράχος-Πετεϊνός	Εορδαίας-Κοζάνης	Κοζάνης	Δ. Μακεδονίας	1 ύποπτος χώρος
15	Οξιά - Πύργος - Ασύρματος	Καστοριάς	Καστοριάς	Δ. Μακεδονίας	1 ύποπτος χώρος

Πίνακας 2 : Η ισχύς του κάθε έργου, η αδειοδοτική του κατάσταση στη ΠΑΕ και η κατηγορία του χώρου που εντοπίστηκε.

A/A	Θέση	Ισχύς (MW)	Κατάσταση στη ΠΑΕ	Κατηγορία Χώρου
1	Τσαμάντας	48	Άδεια Παραγωγής	11 ύποπτοι χώροι - 2 ναρκοπέδια κατά προσωπικού
2	Οχυρό	50	Σε αξιολόγηση	4 ναρκοπέδια κατά προσωπικού
3	Τρικλάριον Όρος	163.8	Άδεια Παραγωγής	1 ναρκοπέδιο κατά προσωπικού
4	Παλαιοκρίμνη	38	Άδεια Παραγωγής	2 ναρκοπέδια κατά προσωπικού
5	Πετροβούνι	22	Άδεια Παραγωγής	4 ύποπτοι χώροι
6	Παυλίνη - Ανήλιο	36	Άδεια Παραγωγής	5 ύποπτοι χώροι
7	Αγνάντι	22	Άδεια Παραγωγής	2 ύποπτοι χώροι
8	Ξωφλημένη	26	Άδεια Παραγωγής	1 ύποπτος χώρος
9	Περικοπή	15	Άδεια Παραγωγής	1 ύποπτος χώρος & 1 ναρκοπέδιο κατά προσωπικού
10	Καζάνι	32	Σε αξιολόγηση	2 ναρκοπέδια κατά προσωπικού
11	Κώστωλα	22	Άδεια Παραγωγής	1 ύποπτος χώρος
12	Ανεμοδαρμένη	16	Άδεια Παραγωγής	1 ύποπτος χώρος
13	Μαγούλα	28	Άδεια Παραγωγής	1 ναρκοπέδιο κατά προσωπικού
14	Βράχος-Πετεϊνός	28	Άδεια Παραγωγής	1 ύποπτος χώρος
15	Οξιά - Πύργος - Ασύρματος	16.2	Άδεια Παραγωγής	1 ύποπτος χώρος

Συγκεντρωτικά πρόκειται για 15 υπό αδειοδότηση Α/Π στις δύο Περιφέρειες με συνολική ονομαστική ισχύ 563 MW εκ των οποίων τα 481 MW διαθέτουν Άδεια Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας.

Οι επωνυμίες των εταιρειών δεν κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν.

Ενημερωθήκαμε [9], ότι μια εταιρεία που αναπτύσσει αιολικό πάρκο σε αυτές τις περιοχές ζήτησε από το ΤΕΝΕ τον έλεγχο του γηπέδου εγκατάστασης της, το προηγούμενο χρονικό διάστημα.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Εντοπίστηκαν 15 γήπεδα εγκατάστασης αδειοδοτημένων γηπέδων εγκατάστασης Α/Π που περιλαμβάνουν εντός τους ναρκοπέδια ή ύποπτες περιοχές για νάρκες. Η ερευνητική ομάδα στηριζόμενη αποκλειστικά στον δικτυακό χώρο της Περιφέρειας Δυτ. Μακεδονίας παράθεσε τα στοιχεία των έργων καθώς και την αδειοδοτική κατάσταση που βρίσκονται αλλά και το είδος της ύποπτης περιοχής, βεβαιωμένου χώρου, είδους ναρκών).

Η ακρίβεια και η αξιοπιστία των στοιχείων που έχουν χρησιμοποιηθεί δεν μπορεί να ελεγχθεί

από την ερευνητική ομάδα και εναπόκειται στις πηγές τους.

Οι περιοχές που εντοπίστηκαν αποτελούν εμπόδια στην υλοποίηση των Α/Π και θα πρέπει οι εταιρείες που σχεδιάζουν αυτά τα έργα να προβαίνουν σε έλεγχο των περιοχών και την πιθανή αποναρκοθέτηση τους ή πιθανόν την περισυλλογή/εξουδετέρωση άσκατων πυρομαχικών, μέσω του ΤΕΝΞ.

Οι ύπιοπτοι χώροι – παλιά ναρκοπέδια σε χώρους που αναπτύσσονται Α/Π αποτελούν θανάσιμο κίνδυνο για τους μηχανικούς-τεχνικούς που επισκέπτονται την περιοχή του έργου αλλά και τα συνεργεία εγκατάστασης και συντήρησης των ΣΜΑΔ.

Για την εγκατάσταση ΣΜΑΔ σήμερα δεν απαιτείται κάποια άδεια από το ΓΕΕΘΑ, (μόνο από Διεύθυνση Δασών της Περιφερειακής Ενότητας του έργου και την Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας) ενώ για τα αιολικά πάρκα γνωμοδοτεί για την εγγύτητα από στρατιωτικές εγκαταστάσεις – πεδία βολής – χώρων ανάπτυξης στρατιωτικών επιχειρήσεων, την επίδραση τους στις επικοινωνίες των Ενόπλων Δυνάμεων, την ασφάλεια ναυσιπλοΐας και την σήμανση των ανεμογεννητριών [11].

Επίσης, ενημερωθήκαμε ότι το ΤΕΝΞ δεν ερωτάται από το ΓΕΣ για τις γνωμοδοτήσεις σε Α/Π. Θα πρέπει η εταιρεία που αναπτύσσει το έργο να απευθυνθεί απευθείας στο ΤΕΝΞ [10].

Οι συγγραφείς προτείνουν να αναβαθμιστεί και να επικαιροποιηθεί η υπάρχουσα ιστοσελίδα της Περιφέρειας Δυτικής Μακεδονίας, έτσι ώστε να παρουσιάζεται η σημερινή κατάσταση των υπόπτων περιοχών – παλαιών ναρκοπεδίων βασισμένη στην βάση δεδομένων που τηρεί το ΓΕΣ και οι κατά τόπους Στρατιωτικοί Σχηματισμοί. Θετικό θα ήταν η ιστοσελίδα αυτή να αποτελεί τμήμα της ιστοσελίδας του ΓΕΕΘΑ.

Η ιστοσελίδα θα πρέπει να ανανεώνεται τακτικά ώστε να παρέχει σε κάθε ενδιαφερόμενο ακριβή και αξιόπιστη πληροφορία (ακριβής καταγραφή και οριοθέτηση αυτών των χώρων). Επιπλέον, σε αυτή την ιστοσελίδα θα παρέχονται πληροφορίες για την πορεία των ελέγχων – αποναρκοθετήσεων υπόπτων χώρων – παλαιών ναρκοπεδίων. Μέσω αυτής της ιστοσελίδας θα είναι δυνατό να ενημερώνονται και οι εταιρείες ανάπτυξης αιολικών πάρκων για την πιθανή ύπαρξη τέτοιων χώρων στα γήπεδα εγκατάστασης αλλά και τα συνεργεία/εταιρείες εγκατάστασης και συντήρησης ΣΜΑΔ. Αν υπάρχει τέτοιος χώρος στο γήπεδο εγκατάστασης τους ή κοντά σε συνοδά έργα του Α/Π (οδοποιία, γραμμή ηλεκτρικής διασύνδεσης, θέση υποσταθμού), θα ζητείται η συνδρομή του ΤΕΝΞ.

Θεωρούμε ότι με αυτό τον τρόπο θα διασφαλιστεί η ασφάλεια των πολιτών αλλά και η αξιοποίηση και προστασία του περιβάλλοντος. Όσον αφορά τα Α/Π, θα διασφαλιστεί η ασφάλεια του προσωπικού που εμπλέκεται από το στάδιο ανάπτυξης έως και την κατασκευή, ενώ θα γνωρίζει ο επενδυτής και το κόστος που θα επωμιστεί για τον έλεγχο και την πιθανή αποναρκοθέτηση της περιοχής ενδιαφέροντος.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς ευχαριστούν τον Ανχη (ΜΧ) Κουρκουλάκο Δημήτριο, Διοικητή του ΤΕΝΞ για τις χρήσιμες πληροφορίες του και το ενδιαφέρον που έδειξε για την εργασία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δικτυακός τόπος αποναρκοθέτησης παλαιών ναρκοπεδίων & υπόπτων χώρων στις περιφέρειες Δυτ.Μακεδονίας & Ηπείρου : <https://mines.pdm.gr>.
- [2] Ιστοσελίδα ΡΑΕ – Γεωπληροφοριακος Χάρτης της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ): www.rae.gr/geo
- [3] Παρουσία του ΤΕΝΞ στην Ήπειρο – Συνέντευξη Διοικητή του ΤΕΝΞ – Ioannina TV – 6/7/2014 :<https://www.youtube.com/watch?v=t-ep66qayYM>

- [4] Ηλεκτρονικό Περιοδικό OFFRoader :
<http://www.offroader.gr/x/index.php/specials-gr/134-special/1098-2011-02-03-12-40-05>
- [5] Ιστοσελίδα Defencenet - Άρθρο «Όλο τον Αύγουστο το ΤΕΝΕ εξουδετέρωσε νάρκες και βλήματα πυροβολικού»: <http://www.defencenet.gr>
- [6] Ιστοσελίδα OnAlert : <http://www.onalert.gr/stories/vlima-olmou-stin-petroupoli-tenx>
- [7] Ιστοσελίδα Μ. Δαμανάκη:
http://damanaki.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=417:2009-04-30-09-50-56&catid=34:c-parliament-questions&Itemid=74
- [8] Ιστοσελίδα Oladeka Blogspot: <http://oladeka.blogspot.gr/2014/02/45.html>
- [9] Ιστοσελίδα ΓΕΣ :
http://www.army.gr/default.php?pname=monada_ekkatharishs_narkopediwn_DM&la=1
- [10] Συζήτηση με τον Ανχη (ΜΧ) Κουρκουλάκο Δημήτριο, Διοικητή του ΤΕΝΕ, Μενίδι, 7/2014.
- [11] Ιστοσελίδα ΓΕΕΘΑ : http://www.geetha.mil.gr/index.asp?a_id=3424

ΑΦΑΛΑΤΩΣΗ - ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΑΠΕ

Ε. Τζέν

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών & Εξοικονόμησης Ενέργειας, ΚΑΠΕ
Τμήμα Αιολικής Ενέργειας
email: etzen@cres.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μετατροπή θαλασσινού ή υφάλμυρου νερού σε καθαρό νερό αποτελεί υποσχόμενη εναλλακτική λύση για την αντιμετώπιση της ανεπάρκειας του νερού που προκαλείται από την κακή διαχείριση, την αύξηση του πληθυσμού, την αύξηση των αρδευτικών αναγκών και των αναγκών της βιομηχανίας και του τουρισμού. Η παραγωγή καθαρού νερού, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες αφαλάτωσης με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), θεωρείται ότι είναι βιώσιμη λύση στο πρόβλημα της λειψυδρίας σε απομακρυσμένες περιοχές που χαρακτηρίζονται από έλλειψη πόσιμου νερού και ηλεκτρικού δικτύου. Ο συνδυασμός των τεχνολογιών αφαλάτωσης- ΑΠΕ κατηγοριοποιείται κυρίως στις τεχνολογίες αφαλάτωσης με τη μέθοδο της απόσταξης με κύρια πηγή λειτουργίας τους τη θερμική ενέργεια που παράγεται από ΑΠΕ, και τις τεχνολογίες μεμβρανών και απόσταξης που λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια ή μηχανική ενέργεια που παράγεται από ΑΠΕ. Η επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού τεχνολογιών εξαρτάται κυρίως από χαρακτηριστικά της περιοχής εγκατάστασης. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την τελική απόφαση παρουσιάζονται στη παρούσα εργασία.

Εφαρμογές των παραπάνω τεχνολογιών μικρής σχετικά κλίμακας έχουν εγκατασταθεί σε όλο τον κόσμο. Μερικές από αυτές τις εφαρμογές εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

Η εργασία επικεντρώνεται στην εξέλιξη της τεχνολογίας των τεχνολογιών αφαλάτωσης με ΑΠΕ, στις τρέχουσες εφαρμογές τους, στα διδάγματα, στο κόστος και στην αγορά τους σε διεθνές επίπεδο.

Λέξεις Κλειδιά: αφαλάτωση θαλασσινού, υφάλμυρου νερού, μέθοδοι εξάτμισης, μέθοδοι μεμβρανών, ΑΠΕ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση μονάδων αφαλάτωσης για την παραγωγή καθαρού νερού (πόσιμου ή αποσταγμένου) από υφάλμυρο ή θαλασσινό νερό είναι ίσως η πιο αξιόπιστη λύση στην ουσιαστική αντιμετώπιση της λειψυδρίας. Οι πιο εμπορικές μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα χωρίζονται κυρίως σε δύο κατηγορίες, στις μεθόδους εξάτμισης και στις μεθόδους μεμβρανών. Πιο συγκεκριμένα, οι μέθοδοι της εξάτμισης είναι οι εξής:

- Πολυβάθμια Εξάτμιση (Multiple Effect Distillation-MED)
- Πολυβάθμια Εκτόνωση (Multi-Stage Flash Distillation – MSF)
- Εξάτμιση με Επανασυμπύεση Ατμών (Vapor Compression – VC (TC ή MVC))

Αντίστοιχα, οι μέθοδοι μεμβρανών είναι οι εξής:

- Αντίστροφη Όσμωση (Reverse Osmosis – RO)
- Ηλεκτροδιάλυση (Electrodialysis – ED ή Electrodialysis Reversal - EDR)

Μέθοδοι όπως η Αντίστροφη Όσμωση (RO) και η Πολυβάθμια Εκτόνωση (MSF) έχουν σημειώσει σημαντικό αριθμό εφαρμογών σε παγκόσμιο επίπεδο.

Οι τεχνολογίες της αφαλάτωσης, παρά τις τελευταίες εξελίξεις ιδιαίτερα στη τεχνολογία της Αντίστροφης Όσμωσης, χαρακτηρίζονται ως ενεργοβόρες. Ο συνδυασμός των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) με τη τεχνολογία αφαλάτωσης είναι τεχνικά εφικτός και μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές με έλλειψη ηλεκτρικού δικτύου με την ανάπτυξη αυτόνομων συστημάτων ή σε μεγάλα συστήματα με την χρήση των ΑΠΕ μέσω δικτύου.

Στα Ελληνικά νησιά σήμερα έχουν εγκατασταθεί και λειτουργούν μονάδες Αντίστροφης όσμωσης για δημόσια χρήση συνολικής δυναμικότητας άνω των 45000 m³/d για την κάλυψη των αναγκών σε νερό. Μόνο δύο από αυτές, συνολικής δυναμικότητας περίπου 4000 m³/d καλύπτουν τις ενεργειακές τους καταναλώσεις από συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ).

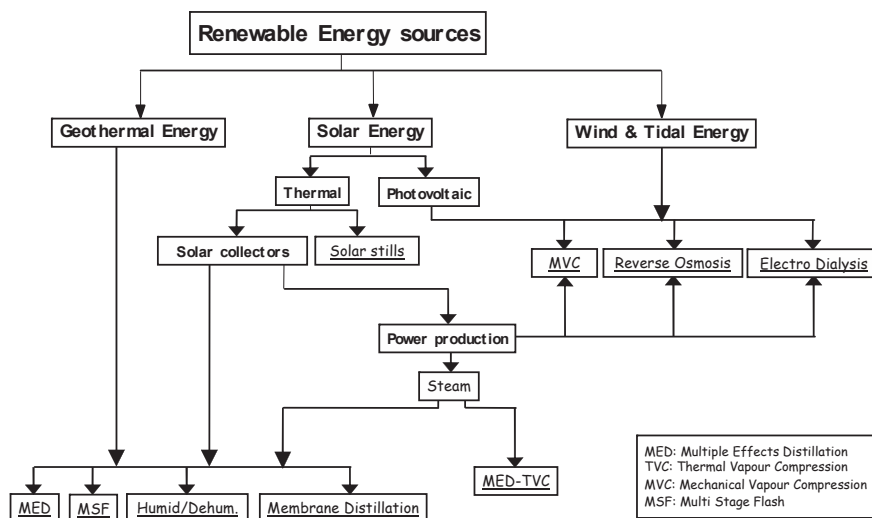
2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΑΠΕ

Ο συνδυασμός των τεχνολογιών αφαλάτωσης με ΑΠΕ, τις δύο τελευταίες δεκαετίες, έχει βρει αρκετές εφαρμογές παγκοσμίως, οι περισσότερες από τις οποίες είναι πιλοτικές και μικρού μεγέθους. Περίπου 150 εφαρμογές συστημάτων αφαλάτωσης με ΑΠΕ, κυρίως αυτόνομα συστήματα, έχουν καταγραφεί παγκοσμίως για την αφαλάτωση θαλασσινού και υφάλμυρου νερού. Οι περισσότερες από αυτές είναι προσαρμοσμένες (custom designed) σε συγκεκριμένες περιοχές και κάνουν χρήση κυρίως ηλιακής και αιολικής ενέργειας για την παραγωγή πόσιμου νερού. Η μέχρι σήμερα έρευνα και λειτουργία πιλοτικών συστημάτων έχει αποδείξει ότι υπάρχουν τεχνολογίες αρκετά υποσχόμενες όσον αφορά την αξιοπιστία και τη δυνατότητα κάλυψης μιας περιοχής με νερό καλής ποιότητας σε κόστος συγκρίσιμο ή χαμηλότερο με άλλες μη συμβατικές πηγές νερού (μεταφορά νερού με δεξαμενόπλοια, λιμνοδεξαμενές, κ.λ.π.).

Το πόσο εφικτός ή «υποσχόμενος» είναι ένας συνδυασμός αφαλάτωσης με ΑΠΕ αφορά παραμέτρους όπως το δυναμικό των ΑΠΕ (αιολικό δυναμικό, ηλιακό δυναμικό, κλπ), τη ποιότητα του νερού τροφοδοσίας (υφάλμυρο ή θαλασσινό), την ενεργειακή κατανάλωση της μονάδας αφαλάτωσης, το μέγεθος του συστήματος, κλπ. Οι πιθανοί συνδυασμοί τεχνολογιών αφαλάτωσης με ΑΠΕ παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται κατανομή του συνδυασμού των τεχνολογιών σε ποσοστό του συνολικού αριθμού των εγκατεστημένων αυτόνομων συστημάτων αφαλάτωσης με ΑΠΕ μέχρι σήμερα. Όπως φαίνεται, ο συνδυασμός των φωτοβολταϊκών συστημάτων με μονάδες Αντίστροφης Όσμωσης (RO) για την αφαλάτωση θαλασσινού και υφάλμυρου νερού είναι ο πλέον εφαρμοσμένος και διαδεδομένος. Αυτό οφείλεται κυρίως στο μεγάλο εύρος μεγεθών των μονάδων Αντίστροφης Όσμωσης (δυναμικότητα παραγόμενου νερού από μερικά λίτρα μέχρι χιλιάδες κυβικά νερού), στην απόδοση και στην αξιοπιστία της τεχνολογίας σε όλα τα μεγέθη των μονάδων, στην ευκολία λειτουργίας των μονάδων αυτών από μη έμπειρους τεχνικούς, στο μικρό χρόνο κατασκευής και εγκατάστασης που απαιτείται, όπως και στη σχετικά χαμηλή κατανάλωση ενέργειας σε σχέση με άλλες μεθόδους αφαλάτωσης ιδιαίτερα με τη χρήση συστημάτων ανάκτησης ενέργειας. Οι ενεργειακές καταναλώσεις σε μικρής κλίμακας μονάδες RO (<100m³/d) θαλασσινού νερού ανέρχονται στις 6-7 kWh/m³ ενώ σε μεγάλες δυναμικότητες παραγόμενου νερού οι ενεργειακές καταναλώσεις μπορούν να μειωθούν στις 3-4 kWh/m³. Σε μονάδες RO για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού οι ενεργειακές καταναλώσεις είναι σχεδόν κατά το ήμισυ μικρότερες.

Όσον αφορά τη χρήση φωτοβολταϊκών (φ/β) συστημάτων, η τεχνολογία σε μικρές εφαρμογές χαρακτηρίζεται πιο αποδοτική, οικονομικά βιώσιμη, με σχεδόν μηδενικό κόστος συντήρησης και πιθανόν πιο αξιόπιστη λύση όσον αφορά τη σταθερότητα της πηγής της, τον ήλιο. Η τεχνολογία των μικρών ανεμογεννητριών της τάξης των 10-50kW ιδιαίτερα την περασμένη δεκαετία δεν αποτέλεσε οικονομικά βιώσιμη λύση εφόσον το αρχικό κόστος τους ήταν υψηλό και η απόδοσή τους όχι ιδιαίτερα ικανοποιητική.

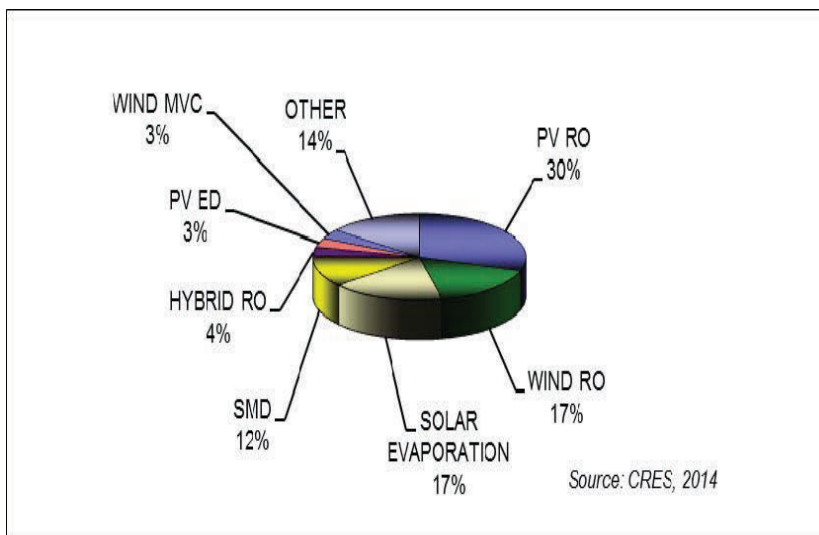


Εικόνα 1: Πιθανοί συνδυασμοί τεχνολογιών αφαλάτωσης με ΑΠΕ [1].

Επίσης, ένας σημαντικός αριθμός εφαρμογών αφορά το συνδυασμό ηλιακών θερμικών συστημάτων με μεθόδους εξάτμισης κυρίως με τη μέθοδο της Πολλαπλής Εξάτμισης Ατμών (MED) [2]. Μικρός αριθμός εφαρμογών αφορά το συνδυασμό των υπόλοιπων τεχνολογιών:

αιολική ενέργεια με Μηχανική Εξάτμιση Ατμών (MVC), φωτοβολταϊκά με Ηλεκτροδιάλυση (ED), ηλιακά θερμικά με Εξάτμιση Πολλαπλών Σταδίων (MSF) και γεωθερμία με την τεχνολογία της Πολλαπλής Εξάτμισης Ατμών (MED) [3], [4]. Οι βασικότεροι λόγοι που οι παραπάνω τεχνολογίες δεν έχουν τόσες εφαρμογές συγκριτικά με την μέθοδο της Αντίστροφης Όσμωσης, είναι ότι θερμικές μέθοδοι αφαλάτωσης χαρακτηρίζονται από υψηλές ενεργειακές καταναλώσεις και είναι πιο αποδοτικές σε μεγάλα μεγέθη. Με βάση τα δεδομένα από τις υπάρχουσες εφαρμογές, για τις μικρές μονάδες MED η ειδική κατανάλωση θερμικής ενέργειας είναι περίπου 60 έως 75 kWh_{th}/m³, ενώ η ειδική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία των απαιτούμενων αντλιών κυμαίνεται από 2 έως 5 kWh/m³. Η μέθοδος MVC χαρακτηρίζεται και αυτή ως ενεργοβόρα εφόσον οι ενεργειακές της καταναλώσεις ανέρχονται στις 15 kWh/m³.

Επίσης η μέθοδος της Ηλεκτροδιάλυσης (ED), εξαιτίας της ενεργειακής της εξάρτησης από την αγωγιμότητα του νερού τροφοδοσίας, θεωρείται οικονομικά βιώσιμη για την αφαλάτωση υφάλμυρου νερού χαμηλής αγωγιμότητας [3], [5].



Εικόνα 2: Κατανομή των εγκατεστημένων αυτόνομων συστημάτων αφαλάτωσης με ΑΠΕ παγκοσμίως (σε ποσοστό του συνολικού αριθμού εγκατεστημένων μονάδων).

Τέλος, τα τελευταία χρόνια έχει σημειωθεί σημαντική έρευνα στην ανάπτυξη και εφαρμογή της Ηλιακής απόσταξης με μεμβράνες (Solar Membrane Distillation, SMD), [6,7]. Η μέθοδος βρίσκεται σε ερευνητικό/πειραματικό στάδιο με σημαντικό όμως αριθμό εφαρμογών κυρίως μέσω Ευρωπαϊκών Προγραμμάτων.

3. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΔΙΔΑΓΜΑΤΑ

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται μερικές από τις πιο πρόσφατες εφαρμογές μονάδων αφαλάτωσης με ΑΠΕ για την αφαλάτωση υφάλμυρου και θαλασσινού νερού, [4], [6], [8].

Πίνακας 1: Ενδεικτικές εφαρμογές μονάδων αφαλάτωσης με ΑΠΕ					
Περιοχή	Υπεύθυνος Οργανισμός	Τεχνολογία	Δυναμικότητα παρ. νερού	Σύστημα παροχής ισχύος	Έτος εγκατάστασης
Keratea, Greece	CRES	PV/Wind-SWRO	3 m ³ /d	4kWp PV, 900W WT	2004
Aqaba, Jordan	Fraunhofer ISE	Solar MD	1 m ³ /d	12m ² PV 72 m ² Solar thermal	2005
Aqaba, Jordan	NERC	PV- BWRO	30 m ³ /d	16.8 kWp	2005
Aqaba, Jordan	Fraunhofer ISE	Solar MD	1 m ³ /d	12m ² PV 72 m ² Solar thermal	2005
Milos, Greece	ITA	Wind SWRO	3600m ³ /d	850 kW grid connected	2007
Tasekra, Morocco	ITC	PV BWRO	24 m ³ /d	4kWp	2008
Jordan Valley, Jordan	NERC	PV-BWRO	20 m ³ /d	10.4 kWp	2010
Cyprus,	Fraunhofer ISE	PV BWRO	5m ³ /d	7,65 kWp	2011
Gran Canaria, Spain	Fraunhofer ISE	Solar MD	3,5 m ³ /d	180 m ² Solar thermal	2011

SW: Seawater

BW: Brackish water

Σημαντικό παράγοντα στη σχεδίαση των αυτόνομων συστημάτων αφαλάτωσης με ΑΠΕ αποτελεί η χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Η απαίτηση των τεχνολογιών αφαλάτωσης για σταθερή ισχύ και συνεχή λειτουργία, προϋποθέτει ιδιαίτερο σχεδιασμό και τη χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας που θα εξασφαλίζουν την παροχή σταθερής ισχύος στην μονάδα αφαλάτωσης αλλά και την δυνατότητα μικρής αυτονομίας σε περίπτωση που οι ΑΠΕ δεν ικανοποιούν τις ενεργειακές απαιτήσεις της μονάδας. Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας στα αυτόνομα συστήματα Αντίστροφης Όσμωσης είναι η συσσωρευτές μολύβδου οξέος.

Από τη μέχρι σήμερα εμπειρία δεν έχουν παρουσιαστεί τεχνικά προβλήματα που να αφορούν τον συνδυασμό των δύο τεχνολογιών. Τα πιο συνήθη προβλήματα αφορούν την αντικατάσταση μεμβρανών ιδιαίτερα στην τεχνολογία της Απόσταξης Μεμβρανών (MD), ηλεκτρονικού εξοπλισμού ή αντλιών.

Η εμπειρία που έχει αποκτηθεί από τις υπάρχουσες εφαρμογές είναι σημαντική. Με την πρόοδο της τεχνολογίας των ΑΠΕ, τη νέα γενιά μετατροπών ισχύος, συσσωρευτών και μικρών ανεμογεννητριών αλλά και με την χρήση πιο αποδοτικών μεμβρανών (RO), αντλιών και συστημάτων ανάκτησης ενέργειας, δίνεται η ευκαιρία ανάπτυξης και βελτιστοποίησης μεγαλύτερων συστημάτων ικανών να καλύψουν βασικές ανάγκες νερού σε απομακρυσμένες περιοχές, νησιά, κλπ. Το επόμενο βήμα είναι η σχεδίαση και ανάπτυξη μεγαλύτερων σε δυναμικότητα και ισχύ αυτόνομων συστημάτων με λειτουργία σε πραγματικές συνθήκες εκτός των εργαστηρίων και της εποπτείας των επιστημόνων/ερευνητών.

Η επιτυχία θα επιτευχθεί με την ανάπτυξη αξιόπιστων συστημάτων, διαθέσιμων στην αγορά, τα οποία θα έχουν την ικανότητα να παρέχουν επαρκή ποιότητα και ποσότητα πόσιμου νερού σε λογικό κόστος.



4. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΑΠΕ

Το κόστος του παραγόμενου νερού ανά μονάδα κυβικού από τα συστήματα αφαλάτωσης με ΑΠΕ εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα του δυναμικού ΑΠΕ στην περιοχή εγκατάστασης, η αγωγιμότητα του νερού τροφοδοσίας, το μέγεθος του συστήματος (σχέση οικονομίας κλίμακας), ο σχεδιασμός της μονάδας, κλπ. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται ενδεικτικά κόστη από τις υπάρχουσες πιλοτικές εφαρμογές.

Πίνακας 2: Ενδεικτικά κόστη πιλοτικών εφαρμογών αφαλάτωσης με ΑΠΕ [9]				
Περιοχή Εγκατάστασης	Τύπος Νερού Τροφοδοσίας	Μέγεθος μονάδας αφαλάτωσης RO	Ονομαστική Ισχύς συστήματος ΑΠΕ	Κόστος Νερού, €/κ.μ.
Aqaba, Jordan (2010)	υφάλμυρο	2.5 m ³ /h	~13 kWp Φ/Β	2.5
Pozo Izquierdo, ITC (2003)	θαλασσινό	0.8 m ³ /h	15 kW Α/Γ,	3-5
Nevada, Colorado, ITN (2003)	υφάλμυρο	0.062 m ³ /h	540 Wp Φ/Β	3
Pozo Izquierdo, ITC (1998)	θαλασσινό	0.4 m ³ /h	4.8 kWp Φ/Β	9
Maagan, Israel (1999)	υφάλμυρο	0.125 m ³ /h	600 W Α/Γ, 3.5 kWp Φ/Β	7.5
Lampedusa, Italy (1996)	θαλασσινό	5,0 m ³ /h	100 kWp Φ/Β	~6.5

Σημειώνεται ότι καμία από τις μονάδες αφαλάτωσης θαλασσινού νερού του παραπάνω πίνακα δεν περιλαμβάνει σύστημα ανάκτησης ενέργειας, με αποτέλεσμα να σημειώνονται υψηλές ενεργειακές καταναλώσεις και συνεπώς υψηλό κόστος νερού.

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, το κόστος του παραγόμενου νερού από τα συστήματα RO (BWRO και SWRO), έχει σημειώσει σημαντική μείωση κυρίως λόγω της διαθεσιμότητας πιο αποδοτικού και λιγότερο ακριβού εξοπλισμού. Για παράδειγμα, σύμφωνα με μελέτες που έγιναν από το Instituto Tecnológico de Canarias (ITC, Spain), το κόστος του παραγόμενου νερού από μικρές μονάδες φωτοβολταϊκών SWRO υπολογίζεται μεταξύ 3 έως 5 €/m³, ενώ για μονάδες φωτοβολταϊκών BWRO εκτιμάται σε 2 έως 4,5 €/m³, [1].

Επίσης, σύμφωνα με το Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT, Spain), το κόστος του παραγόμενου νερού, από μονάδες MED σε συνδυασμό με θερμικούς ηλιακούς συλλέκτες, κυμαίνεται στα 3€/m³ με 7 €/m³, για δυναμικότητες μονάδων άνω των 50 m³/d.

Τα κόστη που αναφέρονται για μικρά συστήματα (0.1 m³ έως 10 m³/d) μονάδων Ηλιακής Απόσταξης με μεμβράνες, SMD είναι αρκετά υψηλά και ανέρχονται στα 12 με 15 €/m³, ανεξάρτητα από την ποιότητα του νερού τροφοδοσίας.

Συγκριτικά, η πώληση του νερού από την ΕΥΔΑΠ για την Ενίσχυση Δικτύων Δήμων και Κοινοτήτων-Υδροδότηση νήσων, ανεξάρτητα από τη μηνιαία κατανάλωση, ανέρχεται στα 0,4880 €/m³ (2013). Το κόστος για την μεταφορά πόσιμο νερού με υδροφόρα πλωτά μέσα στα Ελληνικά νησιά, σύμφωνα με τις τελευταίες αναθέσεις (2013-2014) ανέρχεται περίπου

στα 2,04 €/m³ (πλέον 23% ΦΠΑ) για τα νησιά του Σαρωνικού ενώ η μεταφορά νερού στα άνυδρα νησιά των Νομών Κυκλάδων και Δωδεκανήσου ανέρχεται στα 11 €/m³ (πλέον 23% ΦΠΑ) με δαπάνες της Γενικής Γραμματείας Αιγαίου και Πολιτικής.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν αντίστοιχες αναφορές για κόστη που ανέρχονται στα 2€/m³ για τη μεταφορά νερού με πλοία στη Μαγιόρκα και στα 5€/m³ σε απομακρυσμένες περιοχές της Δυτικής Αυστραλίας. Σύμφωνα με την ίδια βιβλιογραφία η τιμή του εμφιαλωμένου νερού στην περιοχή Coite Bedreras στην Βραζιλία ανέρχεται στα 2.55 €/l (2550 €/m³).

5. Η ΑΓΟΡΑ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΜΕ ΑΠΕ

Η αγορά τεχνολογιών αφαλάτωσης με ΑΠΕ είναι μια αργά αναπτυσσόμενη αγορά και αυτό οφείλεται κυρίως στο κατά κανόνα «υψηλό κόστος» του παραγόμενου νερού. Τα μικρά αυτόνομα συστήματα αφαλάτωσης δεν κατάφεραν μέχρι σήμερα να αποσπάσουν το ενδιαφέρον μεγάλων αγορών πιθανόν γιατί τα συστήματα αυτά αφορούν κυρίως απομονωμένες και πολλές φορές φτωχές περιοχές. Μεγάλες εταιρίες στο χώρο επιδίωξαν την στροφή σε μεγαλύτερα πακέτα εφαρμογών διαθέτοντας στη αγορά μεγαλύτερης κλίμακας συστήματα τα οποία όμως είχαν αρκετά πολύπλοκη λειτουργία όσον αφορά τη διαχείριση και την αποθήκευση της ενέργειας. Παρόλα αυτά, σύμφωνα με τις τελευταίες τεχνολογικές εξελίξεις αναμένεται η αγορά να επιχειρήσει εκ νέου την προώθηση πακέτων συστημάτων πιο απλών στη λειτουργία και σε πιο λειτουργικές δυναμικότητες παραγόμενου νερού.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο συνδυασμός των ΑΠΕ με τις τεχνολογίες αφαλάτωσης είναι τεχνικά εφικτός. Η ανάγκη λειτουργίας των τεχνολογιών αφαλάτωσης υπό σταθερή ισχύ απαιτεί ιδιαίτερο σχεδιασμό και χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Ο παράγοντας της αποθήκευσης ενέργειας, το υψηλό κόστος των φ/β και των μικρών ανεμογεννητριών, η έλλειψη έξυπνων συστημάτων και μεθόδων διαχείρισης της ενέργειας κράτησαν πίσω για αρκετά χρόνια την ανάπτυξη και την εξέλιξη των συστημάτων αυτών. Η μέχρι σήμερα λειτουργία των πιλοτικών εφαρμογών έχει προσφέρει σημαντικά και έχει να επιδείξει πολλές επιτυχημένες εφαρμογές. Ο σωστός σχεδιασμός των δύο συστημάτων, η ανάπτυξη αυτοματισμών και συστημάτων ελέγχου, η ορθή επιλογή τεχνολογιών και συνδυασμού τους και η κατάλληλη επιλογή υλικών και εξοπλισμού, αποτελούν ορισμένες από τις βασικές παραμέτρους για την σχεδίαση και λειτουργία ενός επιτυχημένου συστήματος. Η μελέτη και εφαρμογή μεγαλύτερων σε δυναμικότητα και ισχύ μονάδων με τη χρήση νεότερων και εξελιγμένων τεχνολογιών αποτελεί το επόμενο βήμα για το πάντρεμα των δύο τεχνολογιών και τη λύση της λειψυδρίας σε απομονωμένες και απομακρυσμένες περιοχές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Cipollina A., Tzen E., Subiela V., Papapetrou M., Koschikowski J, Schwantes R., Wieghaus M., Zaragoza G, 2014, Renewable energy desalination: performance analysis and operating data of existing RES desalination plants, Desalination and Water Treatment, (under publication).
- [2] Tzen E., Zaragoza G., and Alarcón Padilla D-C, 2012, Solar Desalination. In: Sayigh A, (ed.) Comprehensive Renewable Energy, Vol 3, pp. 529–565. Oxford: Elsevier.
- [3] Subiela V., J.A. de la Fuente, Piernavieja G, Penate B., 2009, Canary Islands Institute

- of Technology (ITC), experiences in desalination with renewable energies (1996-2008), *Desalination and Water Treatment* 7, pp.220–235.
- [4] Tzen E., 2008, *Renewable Energy Sources for Seawater Desalination - Present Status & Future Prospects*, NOVA Science Publishers Inc., NY, ISBN 978-1-60456-567-6, pp.213-245.
- [5] Micale G., Cipollina A., Rizzuti L., 2009, *Seawater desalination for fresh water production*, in: A. Cipollina, G. Micale, L. Rizzuti (Eds.), *Seawater Desalination*, Springer, ISBN 978-3-642-01149-8.
- [6] Koschikowski J., Wieghaus M., Rommel M., 2009, *Membrane Distillation for Solar Desalination in Seawater Desalination* A. Cipollina, G. Micale, L. Rizzuti (Eds.), Springer, ISBN 978-3-642-01149-8.
- [7] Koschikowski, J., Wieghaus, M., Rommel, M., 2003, *Solar thermal-driven desalination plants based on membrane distillation*. *Desalination* 156.
- [8] Papapetrou M, Epp Ch, Tzen E., 2007, “Autonomous Desalination Units Based on Renewable Energy Systems - A Review of Representative Installations Worldwide”, *NATO ARW on Solar Desalination for the 21st Century*”, Springer Netherlands, ISBN 978-1-4020-5506-5.
- [9] *Autonomous Desalination Units Using RES*, 2005, *Co-ordination Action for Autonomous Desalination Units Based on Renewable Energy Systems*, ADU RES Report, CRES, INCO Programme, MPC-1-50 90 93.

ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΞΗΣ ΜΕ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ: ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ

Π. Μπούτικος, Essam Sh. Mohamed, Ε. Μαθιουλάκης, Β. Μπελεσιώτης

Εργαστήριο Ηλιακών & άλλων Ενεργειακών Συστημάτων - ΕΚΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»
15310 Αγία Παρασκευή Αττικής, e-mail: boutikos@ipta.demokritos.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η επεξεργασία ενός αποτελεσματικού σεναρίου θεωρητικής και πειραματικής διερεύνησης των δυνατοτήτων θερμοδραυλικής βελτιστοποίησης της διεργασίας αφαλάτωσης με χρήση της τεχνολογίας απόσταξης με μεμβράνες (Membrane Distillation, MD). Στα πλαίσια αυτά επιχειρείται η κριτική αξιολόγηση της έως τώρα εμπειρίας προηγούμενων εγκαταστάσεων και διερευνάται η ανάπτυξη κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου, το οποίο θα μπορεί να αξιοποιηθεί για τη μελέτη της επίδρασης των σημαντικότερων παραμέτρων που επηρεάζουν την ποιότητα και την ποσότητα του παραγόμενου αφαλατωμένου νερού. Το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη των θερμικών ροών σε περιπτώσεις διασύνδεσης με θερμικό ηλιακό σύστημα και για την αξιοποίηση της ανακτώμενης θερμότητας συμπύκνωσης, με τελικό στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας και την ενεργειακή βελτιστοποίηση της διεργασίας.

Η έρευνα για βελτιστοποίηση της διεργασίας MD έχει επικεντρωθεί στη μελέτη των διάφορων διαμορφώσεων της διεργασίας, καθώς και στη σύνθεση νέων μεμβρανών με επιθυμητές χαρακτηριστικές ιδιότητες (πορώδες, μέγεθος πόρων, πάχος μεμβράνης). Για το σκοπό αυτό έχουν υλοποιηθεί αρκετές πειραματικές δράσεις σε εργαστηριακή κλίμακα για τη διερεύνηση, τόσο της απόδοσης της μεμβράνης, όσο και της επίδρασης των λειτουργικών παραμέτρων της εγκατάστασης (ροή τροφοδοσίας, θερμοκρασία θερμού και ψυχρού ρεύματος). Έχουν επιπλέον υλοποιηθεί λίγες πιλοτικές μονάδες MD με σκοπό τη μελέτη της ενεργειακής και οικονομικής απόδοσης της μεθόδου σε πραγματική κλίμακα. Στο επίπεδο της προσομοίωσης της διεργασίας, καταγράφονται ορισμένες προσπάθειες ανάπτυξης και επικύρωσης κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων, με εμφανή την ανάγκη περαιτέρω τεκμηρίωσης και γενίκευσής τους στην προσομοίωση ολοκληρωμένων εγκαταστάσεων αφαλάτωσης με MD.

Λέξεις Κλειδιά:

Ηλιακή Αφαλάτωση, Απόσταξη με μεμβράνες, πειραματική διερεύνηση, μοντελοποίηση

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η απόσταξη με μεμβράνες είναι μια θερμική διεργασία διαχωρισμού με μεμβράνη, κατά την οποία μόρια ατμού νερού μεταφέρονται από ένα θερμό υδατικό διάλυμα, διαμέσου μιας μικροπορώδους υδρόφοβης μεμβράνης, εξαιτίας της διαφοράς πίεσης ατμών που δημιουργείται λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας διαμέσου της μεμβράνης. Η διεργασία MD αποτελεί μια ελκυστική εναλλακτική λύση στις συμβατικές τεχνικές αφαλάτωσης, λόγω της παραγωγής υψηλής καθαρότητας αποστάγματος και της δυνατότητας λειτουργίας σε χαμηλές θερμοκρασίες. Σε σχέση με άλλες τεχνολογίες μεμβρανών (nanofiltration, reverse osmosis), η MD λειτουργεί σε σχετικά χαμηλές πιέσεις και είναι αποδοτικότερη για νερά με μεγάλο φορτίο σωματιδίων και πολύ μεγάλη περιεκτικότητα σε άλατα. Επιπλέον, η δυνατότητα αξιοποίησης θερμικής ηλιακής ενέργειας ή και ακόμα απορριπτόμενης θερμότητας από άλλες διεργασίες, καθιστά την MD σαν μια ενεργειακά και οικονομικά αποδοτική και φιλική προς το περιβάλλον διεργασία.

Παρά το ότι η τεχνολογία της MD είναι γνωστή εδώ και αρκετές δεκαετίες, η αξιοποίησή της στην πράξη παρέμεινε μέχρι πρόσφατα πολύ περιορισμένη. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ωστόσο μια αναγέννηση του ερευνητικού ενδιαφέροντος για εφαρμογές της στην αφαλάτωση, κυρίως λόγω των εξελίξεων στον τομέα των υλικών και ειδικότερα των μεμβρανών. Η διερεύνηση που παρουσιάζεται στην συνέχεια γίνεται στα πλαίσια μιας ευρύτερης ερευνητικής δράσης με σκοπό την επεξεργασία τεχνολογικά αξιόπιστων και οικονομικά βιώσιμων λύσεων αφαλάτωσης με MD. Ειδικότερος στόχος είναι η σχεδίαση μιας πιλοτικής μονάδας με δυνατότητα ενσωμάτωσης καινοτόμων μεμβρανών και σχεδιαστικών λύσεων ενεργειακής βελτιστοποίησης, με κριτήριο τη βελτίωση του ποσοστού ανάκτησης νερού, του λόγου απολαβής (Gained Output Ratio - GOR) και του λόγου επίδοσης (Performance Ratio - PR).

Η αποτελεσματική όμως σχεδίαση μιας εγκατάστασης αφαλάτωσης προϋποθέτει, πέρα από την αξιοποίηση της εμπειρίας από προηγούμενες εγκαταστάσεις, και τη χρήση κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου της διεργασίας, το οποίο θα επιτρέπει την παραμετρική διερεύνηση της επίδρασης των διαφόρων λειτουργικών παραμέτρων της εγκατάστασης σε διάφορες συνθήκες χρήσης. Ένα τέτοιο μοντέλο βασίζεται στην ταυτόχρονη επίλυση των ισοζυγίων μάζας και θερμότητας, λαμβάνοντας επίσης υπόψη τα φαινόμενα πόλωσης συγκέντρωσης και θερμοκρασίας.

2. ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΑΠΟ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την παραγωγικότητα ενός συστήματος MD είναι η θερμοκρασία και παροχή του διαλύματος τροφοδοσίας και του νερού ψύξης, η συγκέντρωση αλάτων και, για συστήματα Air Gap (AGMD), το διάκενο αέρα. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι [1]:

- Θερμοκρασία του υδατικού διαλύματος τροφοδοσίας: Αύξηση της θερμοκρασίας στο θερμό ρεύμα της τροφοδοσίας από 50 °C σε 70 °C, αυξάνει τη ροή διαμέσου των μεμβρανών κατά 300%.
- Πάχος του διακένου αέρα: Μείωση του διακένου αέρα από 5 mm στο 1 mm αυξάνει τη ροή διαμέσου των μεμβρανών κατά 230%.
- Ροή στο θερμό ρεύμα της τροφοδοσίας: Αύξηση της ροής του διαλύματος τροφοδοσίας κατά 300% συντελεί στην αύξηση της ροής διαμέσου των μεμβρανών κατά 30%.
- Θερμοκρασία του νερού στο ψυχρό ρεύμα: η ροή διαμέσου της μεμβράνης αυξάνεται κατά 100% με τη μείωση της θερμοκρασίας στο ψυχρό ρεύμα από 30 °C σε 10 °C.
- Συγκέντρωση αλάτων στο υδατικό διάλυμα της τροφοδοσίας: αύξηση της συγκέντρωσης κατά 500% μειώνει τη ροή διαμέσου των μεμβρανών κατά 15%.
- Ροή του νερού στο ψυχρό ρεύμα: αμελητέα επίδραση στη ροή διαμέσου της μεμβράνης.

Η μείωση της παροχής διαμέσου της μεμβράνης (permeate flux) οφείλεται κυρίως στην υψηλή αντίσταση μεταφοράς θερμότητας, στα φαινόμενα πόλωσης θερμοκρασίας και συγκέντρωσης, καθώς και στη ρυπαντική επίστρωση, παράγοντες που εμποδίζουν την περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου AGMD [2]. Για να επιλυθούν τέτοια προβλήματα έχουν προταθεί διάφορες

μέθοδοι, όπως π.χ. η μαγνητική ανάδευση και η διέγερση μέσω υπερήχων για τη μείωση της πόλωσης θερμοκρασίας. Έτσι, η αύξηση του ρυθμού ανάδευσης από 50 rpm έως 300 rpm είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της ροής διαμέσου της μεμβράνης κατά 55% (για θερμοκρασία υδατικού διαλύματος τροφοδοσίας 50°C και συγκέντρωση διαλύματος 2 mol/l), ενώ η διέγερση με υπέρηχους είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της παραγωγικότητας έως 25% σε σχέση με σύστημα χωρίς διέγερση [3, 4].

Αλλα εργαστηριακά πειράματα που αφορούν τη βελτίωση της ροής διαμέσου διαφόρων εμπορικών μεμβρανών, έχουν πραγματοποιηθεί από τους Cath et al. [5]. Στόχος των πειραμάτων αυτών ήταν να εξεταστούν διάφορες τεχνικές βελτίωσης της παραγωγικότητας των μεμβρανών στη διάταξη απευθείας επαφής (Direct Contact MD, DCMD). Μελετήθηκαν τέσσερις εμπορικές μεμβράνες διαφόρων χαρακτηριστικών (Πίνακας 1), όπου εξετάστηκε η επίδραση διαφόρων παραμέτρων, όπως η πίεση της τροφοδοσίας, υποπίεση και η αλατότητα του υδατικού διαλύματος τροφοδοσίας. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι: 1) η μεμβράνη με μεγάλη διάμετρο πόρων είχε τη μεγαλύτερη ροή διαμέσου της μεμβράνης, αλλά ταυτόχρονα το χαμηλότερο ποσοστό απόρριψης αλάτων, λόγω ταχύτερης διαβροχής (flooding) των πόρων, 2) δεν υπάρχει επίδραση της θετικής πίεσης στην παραγωγικότητα των μεμβρανών, 3) υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ του ρυθμού εφαρμογής υποπίεσης και της αύξησης της ροής διαμέσου των μεμβρανών, εξαιτίας της μείωσης της πόλωσης θερμοκρασίας και 4) δεν παρατηρήθηκε σχέση μεταξύ της ροής διαμέσου των μεμβρανών και της αλατότητας του υδατικού διαλύματος τροφοδοσίας.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά μεμβρανών

Εμπορικό όνομα	Υλικό μεμβράνης	Διάμετρος πόρων (μm)	Πορώδες (%)	Πάχος μεμβράνης (μm)	Πάχος ενεργής επιφάνειας (μm)
PS22	PP ¹	0.22	70	150	150
TS22	PTFE ²	0.22	70	175	5-10
TS45	PTFE	0.45	70	175	5-10
TS1.0	PTFE	1.0	70	175	5-10

Οι Tian et al. [2] ανέπτυξαν έναν καινοτόμο σύστημα AGMD, το οποίο περιλαμβάνει στόμιο για δημιουργία τυρβώδους ροής στο ρεύμα τροφοδοσίας. Επιπλέον, το σύστημα διαθέτει καινούριο σχεδιασμό στην πλευρά του ψυχρού νερού. Συγκεκριμένα, υπάρχει μερική επαφή μεταξύ μεμβράνης και ψυχρής επιφάνειας. Αυτός ο σχεδιασμός είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της ροής διαμέσου των μεμβρανών κατά 230% σε σχέση με άλλα συστήματα AGMD (κυρίως λόγω τη μείωση της πόλωσης θερμοκρασίας).

Από τους Manawi et al. αναπτύχθηκε και μελετήθηκε ένα εργαστηριακό πιλοτικό σύστημα DCMD [6]. Στόχος της μελέτης ήταν η ανάπτυξη και επικύρωση ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης και πρόβλεψης. Διερευνήθηκαν παράμετροι όπως οι θερμοκρασίες του νερού τροφοδοσίας και αποστάγματος, η κατεύθυνση ροής στις δύο πλευρές της μεμβράνης και η χρήση δικτύου διαχωρισμού (spacer) μεταξύ της μεμβράνης και του νερού τροφοδοσίας για μείωση της πόλωσης θερμοκρασίας. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν αύξηση στη ροή διαμέσου των μεμβρανών με αύξησης της θερμοκρασίας του νερού τροφοδοσίας καθώς και με τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δυο πλευρών της μεμβράνης. Αν και η αύξηση της ροής του υδατικού διαλύματος στην τροφοδοσία αυξάνει τη ροή διαμέσου των μεμβρανών, η επίδραση της ήταν μικρότερη σε σχέση με αυτήν της θερμοκρασίας. Στην ίδια μελέτη αποδείχθηκε ότι η κατά αντιρροή λειτουργία του συστήματος, ήταν πιο αποδοτική για τη μεταφορά θερμότητας και μάζας και η χρήση δικτύου διαχωρισμού στην πλευρά του νερού

¹ Polypropylene

² Polytetrafluoroethylene

τροφοδοσίας οδήγησε στην αύξηση της ροής διαμέσου της μεμβράνης καθώς και στη μείωση του συντελεστή πόλωσης θερμοκρασίας (Temperature Polarization Factor -TPF), λόγω δημιουργίας τυρβώδους ροής.

3. ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ

Οι βασικές από τις – σχετικά λίγες – μελέτες συστημάτων πραγματικής κλίμακας, που αναφέρονται στη συνέχεια είχαν βασικό σκοπό τη μελέτη των ενεργειακών τους αποδόσεων και της οικονομική τους ανταποδοτικότητα. Έτσι, οι Winter et al [7] μελέτησαν ένα σύστημα MD σε διάταξη σπειροειδή (spiral wound) και επιφάνεια μεμβρανών 5 -14 m². Σκοπός ήταν η μελέτη των διαφόρων παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία εξατμιστή και συμπυκνωτή, η ροή και η αλατότητα του υδατικού διαλύματος τροφοδοσίας. Η παραγωγή του φρέσκου νερού κυμάνθηκε μεταξύ 10 - 25 kg/h και η αντίστοιχη ειδική κατανάλωση ενέργειας από 130 έως 207 kWh/m³. Στην σπειροειδή διάταξη μεμβρανών η ροή του νερού τροφοδοσίας είχε μεγάλη επίδραση στη λειτουργία της μεμβράνης. Επίσης για κάθε αύξηση στη αλατότητα του νερού τροφοδοσίας κατά 10 g/kg, η παραγωγή του φρέσκου νερού αυξάνονταν κατά 1 kg/h, ενώ η χρήση μεμβρανών μεγαλύτερης επιφάνειας έδειξε σημαντική μείωση στην ειδική κατανάλωση ενέργειας. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του παραγόμενου νερού ήταν 3.5 μS/cm και σε πειράματα μεμβρανών δύο σταδίων, έφτασε τα 0.19 μS/cm.

Οι Zhao et al. [8] μελέτησαν ένα πολυβάθμιο σύστημα με χρήση κενού (Vacuum-multi effect-membrane-distillation ή V-MEMD). Μελέτησαν τις παραμέτρους λειτουργίας του συστήματος και παρατήρησαν ότι οι θερμοκρασίες του εξατμιστή και του συμπυκνωτή είχαν τη μεγαλύτερη επίδραση στην ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος. Ο αριθμός των βαθμίδων αυξάνει επίσης το λόγο απολαβής GOR από 1.84, για σύστημα δύο βαθμίδων, σε 2.79, για σύστημα με τέσσερις βαθμίδες.

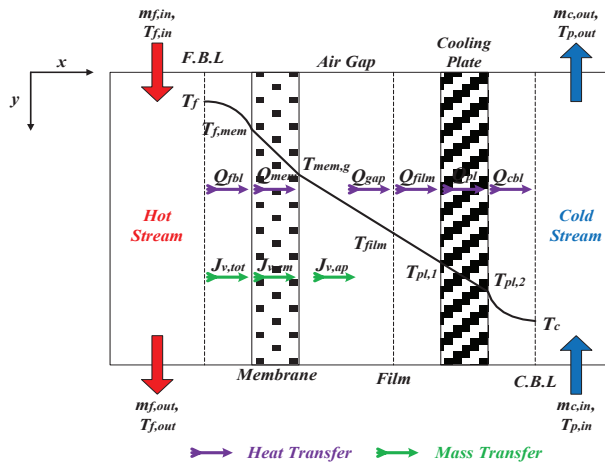
Οι Chafidz et al. [9] εγκατέστησαν και μελέτησαν ένα πολυβάθμιο σύστημα MD με χρήση κενού, τροφοδοτούμενο με θερμική ενέργεια από πεδίο ηλιακών συλλεκτών και με ηλεκτρική ενέργεια από φωτοβολταϊκά πλαίσια και συσσωρευτές. Η μονάδα διαθέτει επίσης αντλία θερμότητας για την προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν διπλασιασμό της ροής του παραγόμενου νερού με χρήση της αντλίας για προθέρμανση του νερού τροφοδοσίας. Επίσης η διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία είχε μεγάλη επίδραση στην παραγωγή του φρέσκου νερού. Πιο συγκεκριμένα, η παραγωγή του φρέσκου νερού ήταν 6.53 l/h όταν η μέση ηλιακή ακτινοβολία ήταν 465 W/m², και 67.8 l/h όταν η μέση ηλιακή ακτινοβολία ήταν 601 W/m². Η ροή του νερού τροφοδοσίας ρυθμίστηκε σε τρία στάδια, 69 l/h, 96.6 l/h και 134.4 l/h, ενώ η αντίστοιχη ροή παραγόμενου νερού βρέθηκε ίση με 5.98 l/h, 4.46 l/h και 4.51 l/h αντίστοιχα. Η αύξηση του παραγόμενου νερού λόγω μείωσης της ροής του νερού τροφοδοσίας, οφείλεται στην αύξηση του χρόνου παραμονής του νερού και την αύξηση της παραγωγής του ατμού. Με βάση τα πειραματικά δεδομένα, η μέση τιμή της απόδοσης της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε θερμική βρέθηκε ίση με 30%, με μέγιστη τιμή το 50%. Η σχετικά χαμηλή αυτή απόδοση οφείλεται στον μη βέλτιστο προσανατολισμό των συλλεκτών στην οροφή της πειραματικής εγκατάστασης.

4. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Για τη θερμοδυναμική βελτιστοποίηση εγκαταστάσεων MD, αναπτύχθηκε μονοδιάστατο μαθηματικό μοντέλο για σύστημα απόσταξης με μεμβράνη με διάκενο αέρος (AGMD), με επίπεδη φύλλο (flat-sheet) μεμβράνης, που χρησιμοποιείται τυπικά σε εμπορικές πιλοτικές μονάδες αφαλάτωσης νερού. Το σύστημα (Σχήμα 1) χωρίζεται σε διαφορετικές ζώνες, όπου ταυτόχρονη ανταλλαγή μάζας και θερμότητας λαμβάνει χώρα κατά μήκος των ορίων των ζωνών αυτών. Όπως απεικονίζεται στο σχήμα, οι ζώνες, από αριστερά προς τα δεξιά, είναι: i) το θερμό ρεύμα τροφοδοσίας, ii) το οριακό στρώμα στο θερμό ρεύμα τροφοδοσίας, iii) η μικροπορώδη υδρόφοβη μεμβράνη, iv) η περιοχή του διάκενου αέρα, v) το υμένιο συμπύκνωσης που σχηματίζεται στην ψυχόμενη πλάκα, vi) η ψυχόμενη πλάκα, vii) Το οριακό στρώμα στο ψυχρό ρεύμα και viii) Το ψυχρό ρεύμα.

Το σύστημα απόσταξης αντιμετωπίστηκε σαν δυο όγκοι ελέγχου, ο ένας το θερμό ρεύμα τροφοδοσίας και ο άλλος το ψυχρό ρεύμα. Ο θερμός και ο ψυχρός όγκος ελέγχου σχετίζονται μεταξύ τους μέσω ταυτόχρονης μεταφοράς μάζας και θερμότητας.

Για την απλούστευση των υπολογισμών στο μαθηματικό μοντέλο θεωρήθηκε ότι: i) το σύστημα λειτουργεί σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης, ii) δεν υπάρχει απώλεια θερμότητας προς το περιβάλλον, iii) Το θερμό ρεύμα τροφοδοσίας και το ψυχρό ρεύμα ρέουν μόνο προς την x-διεύθυνση, iv) δεν υπάρχουν επιδράσεις μάζας και θερμότητας κατά την z-διεύθυνση, v) τα οριακά στρώματα στο θερμό και ψυχρό ρεύμα είναι πλήρως υδροδυναμικά και θερμικά ανεπτυγμένα, vi) υπάρχει γραμμική κατανομή θερμοκρασίας κατά μήκος της μεμβράνης, vii) δια μέσου των πόρων της μεμβράνης μεταφέρονται μόνο υδατμοί νερού, viii) η πόλωση της συγκέντρωσης επηρεάζει τη διεργασία και ix) οι φυσικοχημικές ιδιότητες (πυκνότητα, ιξώδες, κ.α.) του ρευστού είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας μόνο.



Εικόνα 1: Σχηματική απεικόνιση των ροών μεταφοράς μάζας και θερμότητας.

Τα ισοζύγια μάζας για το θερμό και ψυχρό ρεύμα τροφοδοσίας διαμορφώνονται ως εξής:

$$\text{Θερμό διάλυμα τροφοδοσίας: } m_{f,in} = m_{f,out} + J_{v,tot}dA \quad (1)$$

$$\text{Ισοζύγιο αλατιού: } m_{f,in}x_{f,in}^{salt} = m_{f,out}x_{f,out}^{salt} \quad (2)$$

$$\text{Ψυχρό ρεύμα τροφοδοσίας: } m_{c,in} = m_{c,out} - J_{v,tot}dA \quad (3)$$

όπου $m_{f,in}$, $m_{f,out}$, $m_{c,in}$, $m_{c,out}$ είναι οι ρυθμοί ροή μάζας στην είσοδο και έξοδο τους θερμού και ψυχρού ρεύματος (kg/sec), $J_{v,tot}$ είναι η ροή μάζας των ατμών νερού που διαπερνούν την μεμβράνη (kg/(m².s)), A είναι η επιφάνεια της μεμβράνης area (m²) και $x_{f,in}^{salt}$, $x_{f,out}^{salt}$ είναι τα μοριακά κλάσματα του αλατιού στην είσοδο και έξοδο του ρεύματος τροφοδοσίας. Τα ισοζύγια ενέργειας για το θερμό και ψυχρό ρεύμα τροφοδοσίας γράφονται ως:

$$\text{Θερμό διάλυμα τροφοδοσίας: } Q_f dA = m_{f,in}C_{p,in}T_{f,in} - m_{f,out}C_{p,out}T_{f,out} \quad (4)$$

$$\text{Ψυχρό ρεύμα τροφοδοσίας: } Q_c dA = m_{c,out}C_{p,out}T_{c,out} - m_{c,in}C_{p,in}T_{c,in} \quad (5)$$

όπου Q_f, Q_c είναι η θερμική ροή στο θερμό και ψυχρό ρεύμα τροφοδοσίας ($J/(m^2 \cdot s)$) αντίστοιχα, C_p είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα ($J/(kg \cdot K)$) και $T_{f,in}, T_{f,out}, T_{c,in}, T_{c,out}$ είναι οι θερμοκρασίες στην είσοδο και έξοδο του θερμού και ψυχρού ρεύματος τροφοδοσίας (K) αντίστοιχα.

4.1. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΜΑΖΑΣ

Στη διεργασία AGMD η μεταφορά μάζας λαμβάνει χώρα στο οριακό στρώμα του θερμού ρεύματος τροφοδοσίας, κατά μήκος της μεμβράνης και δια μέσου του διάκενου αέρα.

Εφαρμόζοντας ισοζύγιο μάζας κατά μήκος του οριακού στρώματος με βάση τη θεωρία του υμενίου λαμβάνεται μια σχέση μεταξύ της ολικής ροής μάζας των υδρατμών που διαπερνούν την μεμβράνη, $J_{v,tot}$, του συντελεστή μεταφοράς μάζας της διαλυμένης ουσίας, $k_{f,s}$ και του μοριακού της κλάσματος:

$$x_{f,mem}^{salt} = x_f^{salt} \exp\left(\frac{J_{v,tot}}{\rho_f k_{f,s}}\right) \quad (6)$$

όπου ρ_f είναι η πυκνότητα του ρευστού τροφοδοσίας (kg/m^3) και $x_{f,mem}^{salt}, x_f^{salt}$ είναι τα μοριακά κλάσματα της διαλυμένης ουσίας στη διεπιφάνεια τροφοδοσίας - μεμβράνης και στο θερμό διάλυμα τροφοδοσίας.

Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας της διαλυμένης ουσίας μπορεί να εκτιμηθεί από τον αριθμό Sherwood (Sh) μέσω μιας αδιάστατης εμπειρικής συσχέτισης για μεταφορά μάζας. Η συσχέτιση Sh που χρησιμοποιείται εδώ είναι:

$$\text{Για στρωτή ροή: } Sh = 1.86 \left(Re Sc \frac{dh}{L} \right)^{1/3} \quad (7)$$

$$\text{Για τυρβώδη ροή: } Sh = 0.023 Re^{0.8} Sc^n, n = 0.4 \text{ (θέρμανση) και } n = 0.3 \text{ (ψύξη)} \quad (8)$$

όπου τα Sh, Re, Sc είναι οι αδιάστατοι αριθμοί Sherwood, Reynolds and Schmidt αντίστοιχα.

Η μεταφορά μάζας δια μέσου της μεμβράνης περιγράφεται συνήθως από το νόμο του Darcy, σύμφωνα με τον οποίο η ροή μάζας του διαπερνώντος υδρατμού είναι ανάλογη της διαφοράς της μερικής πίεσης του υδρατμού κατά μήκος της μεμβράνης:

$$J_{v,mem} = C_{mem} \Delta P_i = C_{mem} (P_{f,mem} - P_{mem,g}) \quad (9)$$

όπου C_{mem} είναι ο συντελεστής μεταφοράς μάζας της μεμβράνης, $P_{f,mem}, P_{mem,g}$ είναι οι μερικές πιέσεις του υδρατμού στις διεπιφάνειες τροφοδοσίας - μεμβράνης και μεμβράνης - διάκενου αέρα (Pa) αντίστοιχα. Στην περίπτωση που υπάρχουν στην τροφοδοσία διαλυμένα είδη αλατιού η ελάττωση της μερικής πίεσης μπορεί να περιγραφεί από το νόμο του Raoult:

$$P_{f,mem} = (1 - x_{f,mem}^{salt}) P_v^{sat}(T_{f,mem}) \quad (10)$$

όπου $x_{f,mem}^{salt}$ και $P_v^{sat}(T_{f,mem})$ είναι το μοριακό κλάσμα του αλατιού και η πίεση ατμών κορεσμού του νερού στη διεπιφάνεια τροφοδοσίας - μεμβράνης (Pa).

Ο συντελεστής μεταφοράς μάζας της μεμβράνης είναι κυρίως συνάρτηση των δομικών ιδιοτήτων της μεμβράνης (πορώδες, μέγεθος πόρων, δαιδαλώδες, πάχος μεμβράνης), των φυσικοχημικών ιδιοτήτων του υδρατμού που διαπερνάει τη μεμβράνη καθώς και των συνθηκών λειτουργίας (θερμοκρασία και πίεση). Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από το είδος του μηχανισμού μεταφοράς μάζας που κυριαρχεί μέσα στους πόρους της μεμβράνης, ο οποίος σχετίζεται με τις συγκρούσεις των διαχεόμενων μορίων μεταξύ τους ή με το τοίχος των πόρων.

Η ιδιότητα που καθορίζει το μηχανισμό που διέπει τη μεμβράνη είναι ο αριθμός Knudsen (Kn) που ορίζεται ως:

$$Kn = \lambda / d_p \quad (11)$$

όπου λ και d_p είναι το μέσο ελεύθερο μονοπάτι που διανύει το μεταφερόμενο μόριο και το μέγεθος των πόρων. Η παράμετρος λ δίνεται ως:

$$\lambda_i = \frac{k_B T_m}{\sqrt{2\pi} P_m \sigma_i^2} \quad (12)$$

όπου k_B είναι η σταθερά του Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K), T_m, P_m είναι η μέση θερμοκρασία και πίεση στη μεμβράνη αντίστοιχα και σ_i είναι η διάμετρος σύγκρουσης του μορίου (2.641 \AA για τον υδρατμό).

Καθώς το μέγεθος πόρων των μεμβρανών που χρησιμοποιούνται στη διεργασία MD κυμαίνεται από 0.2 ως 1 μm [1] και η μέση ελεύθερη διαδρομή των μορίων του υδρατμού είναι 0.49 μm στους 70 °C, ο αριθμός Knudsen έχει εύρος $0.01 < Kn < 10$. Στην περιοχή αυτή τιμών του αριθμού Kn ο μηχανισμός που ελέγχει τη μεταφορά μάζας μέσα στη μεμβράνη είναι συνδυασμός της διάχυσης Knudsen – μοριακής διάχυσης και ο συντελεστής μεταφοράς μάζας της μεμβράνης ορίζεται ως:

$$C_{mem}^{Kn-vis-mol} = \left\{ \left(\frac{2}{3} \frac{\varepsilon r_p}{\tau \delta_m} \left(\frac{8M_i}{\pi RT_m} \right)^{1/2} \right)^{-1} + \left(\frac{\varepsilon}{\tau \delta_m} \frac{M_i}{RT_m} \frac{P_{tot} D_{w-air}}{P_{air}} \right)^{-1} \right\}^{-1} \quad (13)$$

όπου $\varepsilon, r_p, \tau, \delta_m$ είναι το πορώδες, η ακτίνα των πόρων, το δαιδαλώδες και το πάχος της μεμβράνης αντίστοιχα, M_i είναι το μοριακό βάρος του νερού (kg/mol), R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων, T_m είναι η μέση θερμοκρασία στην μεμβράνη, P_{tot}, P_{air} είναι η συνολική πίεση και η πίεση του αέρα αντίστοιχα μέσα στους πόρους της μεμβράνης και D_{w-air} είναι ο συντελεστής διάχυσης του νερού μέσα στον αέρα.

Στην περιοχή ανάμεσα στη μεμβράνη και στην επιφάνεια συμπύκνωσης στη πλευρά του ψυχρού ρεύματος θεωρείται ότι υπάρχει ένα στάσιμο υμένιο αέρα, εξαιτίας της χαμηλής διαλυτότητας του αέρα στο νερό. Σε αυτή την περίπτωση η μεταφορά μάζας περιγράφεται από τη διάχυση Stefan, η οποία παρουσιάζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$J_{v,airgap} = C_{gap} \Delta P_i = \frac{P_{tot} D_{w-air}}{R T P_{lm} \delta_{gap}} (P_{mem,g} - P_{film}) \quad (14)$$

όπου $P_{mem,g}, P_{film}$ είναι οι πιέσεις ατμών στη διεπιφάνεια μεμβράνης – διάκενου αέρα και στην επιφάνεια του υμενίου συμπύκνωσης και P_{lm} είναι η μέση λογαριθμική πίεση του αέρα στην περιοχή του διάκενου αέρα.

Η ολική ροή μάζας του διαπερνώντος υδρατμού μέσα από τη μεμβράνη και το διάκενο αέρα ορίζεται ως:

$$J_{v,tot} = (C_{mem}^{-1} + C_{gap}^{-1})(P_{f,mem} - P_{film}) \quad (15)$$

4.2. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Στη διαμόρφωση AGMD μεταφορά θερμότητας έχουμε: i) στο οριακό στρώμα του θερμού ρεύματος τροφοδοσίας, ii) δια μέσου της μεμβράνης, iii) στη περιοχή του διάκενου αέρα, iv) στο υμένιο συμπύκνωσης, v) στη ψυχόμενη πλάκα και vi) στο οριακό στρώμα του ψυχρού ρεύματος.

Η μεταφορά θερμότητας στο οριακό στρώμα του ρεύματος τροφοδοσίας είναι συνήθως το ρυθμό-περιοριστικό βήμα για μεμβράνες με υψηλή διαπερατότητα, εξαιτίας του γεγονότος ότι

χρειάζεται μεγάλη ποσότητα θερμότητας για την εξάτμιση του υγρού διαλύματος τροφοδοσίας στην επιφάνεια της μεμβράνης. Η μεταφερόμενη θερμότητα από το θερμό ρεύμα τροφοδοσίας δια μέσου του οριακού στρώματος στην επιφάνεια της μεμβράνης δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$Q_{fbl} = h_f(T_f - T_{f,mem}) \quad (16)$$

όπου $T_f, T_{f,mem}$ είναι οι θερμοκρασίες στο ρεύμα τροφοδοσίας και στη διεπιφάνεια τροφοδοσίας – μεμβράνης και h_f είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας.

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας του οριακού στρώματος μπορεί να υπολογιστεί μέσω υπάρχουσών εμπειρικών συσχετίσεων του αριθμού Nusselt. Οι συσχετίσεις μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την εργασία είναι:

$$\text{Για στρωτή ροή: } Nu = 1.86 \left(RePr \frac{d_h}{L} \right)^{1/3} \quad (17)$$

$$\text{Για τυρβώδη ροή: } Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n, n = 0.4 \text{ (θέρμανση) and } n = 0.3 \text{ (ψύξη)} \quad (18)$$

όπου Nu, Re, Pr είναι αντίστοιχα οι αδιάστατοι αριθμοί Nusselt, Reynolds and Prandlt.

Η θερμική ροή κατά μήκος της μεμβράνης (Q_{mem}) μπορεί να περιγραφεί μέσω της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή και λόγω της μεταφοράς μάζας των μορίων του υδρατμού δια μέσου των πόρων της μεμβράνης (sensible heat) και μέσω της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης :

$$Q_{mem} = \frac{k_m}{\delta_m} (T_{f,mem} - T_{mem,g}) + J_{v,mem} C_{p,v} (T_{f,mem} - T_{mem,g}) + J_{v,tot} \Delta H_v \quad (19)$$

όπου k_m είναι η θερμική αγωγιμότητα της μεμβράνης, ΔH_v είναι η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης και $T_{f,mem}, T_{mem,g}$ είναι οι θερμοκρασίες στις διεπιφάνειες τροφοδοσίας – μεμβράνης και μεμβράνης – διάκενου αέρα αντίστοιχα.

Η μεταφορά θερμότητας από την ψυχρή επιφάνεια της μεμβράνης διαμέσου του διάκενου αέρος στην επιφάνεια συμπύκνωσης επηρεάζεται από την αγωγή ή φυσική συναγωγή, τη μεταφορά μάζας των μορίων του υδρατμού καθώς και από τη λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης. Η θερμική ροή δια μέσου του διάκενου αέρα μπορεί να γραφεί ως:

$$Q_{gap} = \frac{k_{air}}{\delta_{gap}} (T_{mem,g} - T_{film}) + J_{v,airgap} C_{p,v} (T_{mem,g} - T_{film}) + J_{v,tot} \Delta H_v \{T_{gap}\} \quad (20)$$

όπου k_{air} είναι η θερμική αγωγιμότητα του αέρα, δ_{gap} είναι το πάχος του διάκενου αέρος και $T_{mem,g}, T_{film}$ είναι αντίστοιχα οι θερμοκρασίες στη διεπιφάνεια μεμβράνης – διάκενου αέρα και στην επιφάνεια του συμπυκνωμένου υμενίου.

Καθώς οι υδρατμοί συμπυκνώνονται πάνω στην ψυχόμενη πλάκα ένα υμένιο συμπύκνωσης σχηματίζεται στην κορυφή της πλάκας και ρέει προς τα κάτω υπό την επίδραση της βαρύτητας. Η μεταφερόμενη θερμότητα δια μέσου του υμενίου αυτού είναι:

$$Q_{film} = q_{cond} = \frac{k_f}{\delta_f} (T_{film} - T_{pl,1}) \quad (21)$$

όπου k_f, δ_f είναι η θερμική αγωγιμότητα και το πάχος του υμενίου συμπύκνωσης και $T_{film}, T_{pl,1}$ είναι οι θερμοκρασίες στις επιφάνειες του υμενίου και της ψυχόμενης πλάκας.

Η θερμότητα μέσω της ψυχόμενης πλάκας μεταδίδεται με αγωγή, η οποία εκφράζεται ως:

$$Q_{pl} = \frac{k_{pl}}{\delta_{pl}} (T_{pl,1} - T_{pl,2}) \quad (22)$$

όπου k_{pl} , δ_{pl} , $T_{pl,1}$ και $T_{pl,2}$ είναι η θερμική αγωγιμότητα, το πάχος και οι θερμοκρασίες στις 2 πλευρές της ψυχόμενης πλάκας αντίστοιχα.

Στο οριακό στρώμα του ψυχρού ρεύματος η θερμότητα μεταφέρεται με συναγωγή, με τη θερμική ροή να ορίζεται ως:

$$Q_{cbl} = h_c (T_{pl,2} - T_c) \quad (23)$$

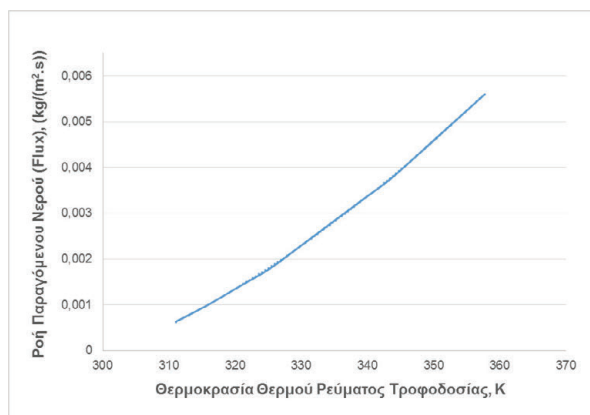
όπου h_c είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο οριακό στρώμα του ψυχρού ρεύματος και $T_{pl,2}$, T_c είναι οι θερμοκρασίες στην επιφάνεια της ψυχόμενης πλάκας και του ψυχρού ρεύματος.

Σύμφωνα με το ενεργειακό ισοζύγιο, σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης, το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται μέσα από κάθε μια από τις έξι περιοχές είναι εξίσου το ίδιο:

$$Q_{fbl} = Q_{mem} = Q_{gap} = Q_{film} = Q_{pl} = Q_c \quad (24)$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις μεταφοράς θερμότητας, Εξ. (16) και (19) – (24), προκύπτει μια σειρά εξισώσεων για τις θερμοκρασίες $T_{f,mem}$, $T_{mem,g}$, T_{film} , $T_{pl,1}$ και $T_{pl,2}$. Για την επίλυση των εξισώσεων αυτών αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι στο Matlab version 8.2.0 (R2013b), οι οποίοι επιλύθηκαν με βάση την επαναληπτική μέθοδο (iteration method). Δόθηκαν υποθετικές αρχικές τιμές στις θερμοκρασίες εξόδου του θερμού και ψυχρού ρεύματος, στις θερμοκρασίες στις δυο πλευρές της μεμβράνης ($T_{f,mem}$, $T_{mem,g}$) και στη θερμοκρασία στην επιφάνεια του υμενίου συμπίκνωσης (T_{film}) για τη θεωρητική πρόβλεψη της ροής του παραγόμενου νερού (water flux production).

Ως παράδειγμα παραμετρικής διερεύνησης, στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η θεωρητική πρόβλεψη της επίδρασης της θερμοκρασίας του θερμού υδατικού διαλύματος της τροφοδοσίας στη ροή του παραγόμενου νερού. Παρατηρείται ότι αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε εκθετική αύξηση της ροής. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί με την εξίσωση της πίεσης ατμών νερού, η οποία δείχνει την εκθετική εξάρτηση της κινητήριας δύναμης (πίεση ατμών νερού) από τη θερμοκρασία του θερμού ρεύματος τροφοδοσίας.



Σχήμα 2: Επίδραση της θερμοκρασίας θερμού ρεύματος τροφοδοσίας στη ροή του παραγόμενου νερού (water flux production).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι παράμετροι που επηρεάζουν τη λειτουργία των μονάδων αφαλάτωσης MD είναι κυρίως η πόλωση θερμοκρασίας, η ροή και η θερμοκρασία του υδατικού διαλύματος στην τροφοδοσία, καθώς και η θερμοκρασία του νερού στο ψυχρό ρεύμα. Κατά συνέπεια, μία ερευνητική εγκατάσταση οφείλει να εξασφαλίζει την ελεγχόμενη μεταβολή τους σε ένα εύρος επιθυμητών συνθηκών. Παράλληλα, η ανάπτυξη και η επικύρωση κατάλληλου μοντέλου προσομοίωσης της διεργασίας μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στην παραμετρική διερεύνηση των επιδόσεων ενός συστήματος, σε εργαστηριακή ή πραγματική κλίμακα, καθώς και στην αξιολόγηση διαφορετικών σχεδιαστικών λύσεων ή διαφορετικών τύπων μεμβρανών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιείται στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου με τίτλο «Αφαλάτωση με ηλιακά υποβοηθούμενη απόσταση με μεμβράνες: βελτιστοποίηση υλικών και διεργασίας – SolMeD» που χρηματοδοτείται από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (ΕΚΤ) και τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας, Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» - Εθνικό Στρατηγικό Πλαίσιο Αναφοράς ΕΣΠΑ 2007 – 2013, Δράση ΑΡΙΣΤΕΙΑ II.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]Alklaibi, A.M. and N. Lior, *Membrane-distillation desalination: Status and potential*. Desalination, 2005. **171**(2): p. 111-131.
- [2] Tian, R., H. Gao, X.H. Yang, S.Y. Yan, and S. Li, *A new enhancement technique on air gap membrane distillation*. Desalination, 2014. **332**(1): p. 52-59.
- [3] Godino, P., L. Peña, and J.I. Mengual, *Membrane distillation: theory and experiments*. Journal of Membrane Science, 1996. **121**(1): p. 83-93.
- [4] Zhu, C., G.L. Liu, C.S. Cheung, C.W. Leung, and Z.C. Zhu, *Ultrasonic stimulation on enhancement of air gap membrane distillation*. Journal of Membrane Science, 1999. **161**(1–2): p. 85-93.
- [5] Cath, T.Y., V.D. Adams, and A.E. Childress, *Experimental study of desalination using direct contact membrane distillation: a new approach to flux enhancement*. Journal of Membrane Science, 2004. **228**(1): p. 5-16.
- [6] Manawi, Y.M., M. Khraisheh, A.K. Fard, F. Benyahia, and S. Adham, *Effect of operational parameters on distillate flux in direct contact membrane distillation (DCMD): Comparison between experimental and model predicted performance*. Desalination, 2014. **336**(0): p. 110-120.
- [7] Winter, D., J. Koschikowski, and M. Wieghaus, *Desalination using membrane distillation: Experimental studies on full scale spiral wound modules*. Journal of Membrane Science, 2011. **375**(1–2): p. 104-112.
- [8] Zhao, K., et al., *Experimental study of the memsys vacuum-multi-effect-membrane-distillation (V-MEMD) module*. Desalination, 2013. **323**(0): p. 150-160.
- [9] Chafidz, A., S. Al-Zahrani, M.N. Al-Otaibi, C.F. Hoong, T.F. Lai, and M. Prabu, *Portable and integrated solar-driven desalination system using membrane distillation for arid remote areas in Saudi Arabia*. Desalination, 2014. **345**(0): p. 36-49.

ΑΜΕΣΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ (ΧΩΡΙΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΕΣ) ΚΑΙΝΟΤΟΜΟ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΦΑΛΑΤΩΣΗΣ ΝΕΡΟΥ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ ΟΣΜΩΣΗΣ

Χ.-Σ. Καραβάς^{1*}, Ε. Δημητρίου¹, Γ. Κυριακαράκος¹, Essam Sh. Mohamed¹, Δ.
Πυρομάλης², Α. Ντούνης², Κ. Αρβανίτης¹, Γ. Παπαδάκης¹

¹Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό
Πανεπιστήμιο, 118 55 Αθήνα

²Τμήμα Μηχανικών Αυτοματισμού Τ.Ε., Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα
Πειραιά, *e-mail: ckarav@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή παρουσιάζει ένα καινοτόμο σύστημα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης για θαλασσινό νερό ικανό να καλύπτει τις ανάγκες οικισμών σε πόσιμο νερό, διασφαλίζοντας χαμηλό κόστος και ελάχιστη περιβαλλοντική επίπτωση. Το σύστημα τροφοδοτείται από Φ/Β και μία ανεμογεννήτρια και η παραγωγική του ικανότητα σε πόσιμο νερό είναι 2,5 - 5m³ ημερησίως, ικανή να καλύπτει τις ανάγκες 25 έως 50 ατόμων με μέση κατανάλωση νερού 100 - 300 lt/μέρα. Χαρακτηριστικό του συστήματος είναι η μη χρήση μπαταριών οξέος μολύβδου. Η μονάδα αφαλάτωσης είναι εξοπλισμένη με ένα υποσύστημα ανάκτησης ενέργειας και έχει την ικανότητα να λειτουργεί και σε μερικό φορτίο. Στα χαρακτηριστικά του συστήματος περιλαμβάνονται δύο κύριες καινοτομίες. Η πρώτη συσχετίζεται με δύο υποσυστήματα προσωρινής αποθήκευσης και η δεύτερη με ένα εξελιγμένο ευφυές σύστημα διαχείρισης ενέργειας βασισμένο στην υπολογιστική νοημοσύνη, που επιτρέπει στη μονάδα να λειτουργεί σε μερικό φορτίο και να επιτυγχάνει συνολικά μεγαλύτερη απόδοση. Αυτό το σύστημα διαχείρισης ενέργειας περιλαμβάνει επίσης εξελιγμένους αλγόριθμους βασισμένους στη θεωρία των γκριζων συστημάτων για τη πρόβλεψη της παραγόμενης ενέργειας από τα Φ/Β και την ανεμογεννήτρια. Η σχεδίαση αυτού του συστήματος βοηθάει στη μείωση του κόστους αφαλάτωσης θαλασσινού νερού κάτω από 5€/m³ για μονάδες με ονομαστική παραγωγή πόσιμου νερού έως 5 m³ ημερησίως.

Λέξεις Κλειδιά: αφαλάτωση, υβριδικό σύστημα, υπολογιστική νοημοσύνη

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα σπουδαιότερα αγαθά για την επιβίωση και ανάπτυξη των ανθρώπων είναι το πόσιμο νερό. Στην αυγή του 21ου αιώνα υπάρχουν ακόμη πολλές περιοχές ανά τον κόσμο οι οποίες δεν διαθέτουν πρόσβαση σε πόσιμο νερό. Εκτιμάται ότι περισσότεροι από ένα δισεκατομμύριο άνθρωποι δεν έχουν πρόσβαση σε πόσιμο νερό. Στις αναπτυσσόμενες χώρες, το πόσιμο νερό είναι διαθέσιμο αλλά συνήθως σε υψηλά κόστη διότι το κόστος μεταφοράς προστίθεται στη τιμή του. Η αφαλάτωση αναδεικνύεται ως μια λύση στην έλλειψη πόσιμου νερού. Το θαλασσινό νερό μπορεί να μετατραπεί σε επιτραπέζιο νερό υψηλής ποιότητας. Όταν οι διαδικασίες αφαλάτωσης συνδυάζονται με τεχνολογίες ανανεώσιμης ενέργειας τότε τα συστήματα γίνονται φιλικά προς το περιβάλλον και μπορούν να βοηθήσουν την ανάπτυξη αυτών των περιοχών, οι οποίες μπορεί να ανήκουν είτε σε ανεπτυγμένες είτε σε αναπτυσσόμενες χώρες [1-3]. Η παραγωγή ενέργειας αυτών των συστημάτων βασίζεται εξολοκλήρου στα Φ/Β πάνελ και στην ανεμογεννήτρια συγκεκριμένη μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στο παρελθόν και είναι εξασφαλισμένο ότι το σύστημα μπορεί να αναπτυχθεί στις περισσότερες περιοχές του κόσμου [4]. Η παραδοσιακή προσέγγιση όσον αφορά τα υβριδικά συστήματα περιλαμβάνει μία συστοιχία μπαταριών έτσι ώστε να επιτρέπει ροή σταθερής ισχύος από το σύστημα παραγωγής ενέργειας προς τα φορτία. Οι μπαταρίες όμως παρουσιάζουν ειδικά μειονεκτήματα και υψηλό κόστος, μικρή διάρκεια ζωής, μεγάλη απώλεια ενέργειας κατά τη διάρκεια του χρόνου και μπορούν να παρουσιάσουν περιβαλλοντικούς κινδύνους λόγω των βαρέων μετάλλων που περιέχουν [5, 6]. Μονάδες αφαλάτωσης με αντίστροφη όσμωση (ΑΟ) έχουν χρησιμοποιηθεί παγκοσμίως για τη παραγωγή πόσιμου νερού σε περιοχές οι οποίες είτε είναι πλησίον της θάλασσας είτε διαθέτουν πηγές με υφάλμυρο νερό. Ο συνδυασμός υβριδικών συστημάτων για τη παραγωγή της απαιτούμενης ενέργειας και μονάδων ΑΟ οδηγεί σε συστήματα τα οποία έχουν χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και απαιτούν μειωμένη συντήρηση [2, 7]. Συστήματα ανάκτησης ενέργειας έχουν χρησιμοποιηθεί και αποδείχτηκε ότι παρουσιάζουν σημαντικά οφέλη από την άποψη της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας [8]. Η λειτουργία μονάδων αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης σε μερικό φορτίο έχει αποδειχθεί ότι έχει υψηλότερες αποδόσεις [3, 9]. Το προτεινόμενο σύστημα δεν περιλαμβάνει μια συστοιχία μπαταριών για την αποθήκευση της ενέργειας, αλλά έχει αναπτυχθεί ένα καινοτόμο σύστημα αποθήκευσης που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με προηγμένους αλγόριθμους ελέγχου. Ο PID έλεγχος έχει βρεθεί ότι είναι ανεπαρκής για τη ρύθμιση λειτουργίας τέτοιων ενεργειακών συστημάτων, εκτός αν συνδυάζεται με έναν ελλεκτική αυτορρύθμισης (συνεχής ρύθμιση των κερδών του) [10]. Η ασαφής λογική έχει αποδειχθεί ότι ανταποκρίνεται με επιτυχία στον έλεγχο ενεργειακών συστημάτων [11]. Το κύριο μειονέκτημά της είναι η σχετικά δύσκολη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της, λόγω του μεγάλου της αριθμού. Μία μέθοδος συνδυασμού των ειδικών γράφων Petri-Nets (PN) και των Ασαφών Γνωστικών Χαρτών (FCM) έχει αναπτυχθεί προκειμένου να υπερκαλύψει αυτό το πρόβλημα και έχει εφαρμοστεί στα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επιτυχώς [9]. Αλγόριθμοι πρόγνωσης βασισμένους στη θεωρία των γκριζών συστημάτων έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την πρόγνωση της ηλιακής ακτινοβολίας όταν απουσιάζουν ιστορικά δεδομένα [12]. Η βοήθεια του προτεινόμενης εργασίας είναι να αναπτυχθεί ένα σύστημα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης που θα τροφοδοτείται με ανανεώσιμη ενέργεια και θα παρουσιάζει χαμηλή ειδική κατανάλωση ενέργειας. Διάφορες προσαρμογές έχουν εφαρμοστεί στο εργαστήριο για να ερευνηθεί η συμπεριφορά του. Όλα τα συστήματα χρησιμοποιούν ένα υποσύνολο ανάκτησης ενέργειας προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η ωφέλιμη ενέργεια. Η καρδιά του συστήματος είναι το προηγμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας χρησιμοποιώντας αλγόριθμους υπολογιστικής νοημοσύνης.

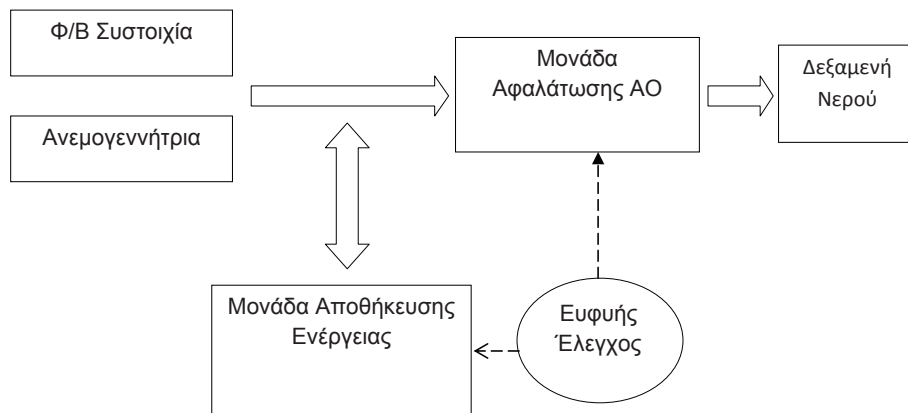
2. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το προτεινόμενο σύστημα είναι ένα καινοτόμο σύστημα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης για θαλασσινό νερό και παρουσιάζεται στην Εικόνα 1. Περιλαμβάνει μονάδες παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας, μία Ανεμογεννήτρια και ένα Φ/Β σταθμό και ένα σύστημα

αποθήκευσης ενέργειας το οποίο αποτελείται από υβριδικούς υπερπυκνωτές και δοχεία διαστολής. Ο έλεγχος της ενέργειας του συστήματος επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός ρυθμιστή ο οποίος εμπεριέχει προηγμένους αλγόριθμους ελέγχου.

Τα μέρη του συστήματος είναι (Εικόνα 1):

1. Ένας τυπικός Φ/Β σταθμός με πάνελ μονοκρυσταλλικού πυριτίου.
2. Μία τυπική Ανεμογεννήτρια Συνεχούς Ρεύματος.
3. Ένα σύστημα βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης ενέργειας.
4. Μία μονάδα αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης με ανάκτηση ενέργειας.
5. Μία δεξαμενή αποθήκευσης πόσιμου νερού.



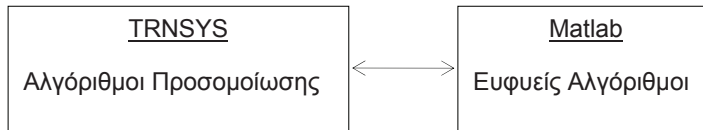
Εικόνα 1: Σχηματική παρουσίαση του συστήματος αφαλάτωσης

3. ΜΟΝΑΔΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Μία ελάχιστη ροή ισχύος προς τη μονάδα αφαλάτωσης είναι αναγκαία σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της ημέρας, ώστε να διασφαλίζεται η ύπαρξη μιας ελάχιστης ποσότητας πόσιμου νερού στη δεξαμενή, ικανή να καλύψει τουλάχιστον τη μέση κατανάλωση. Η συνεχής αλλαγή του καιρού και η μη παραγωγή ενέργειας από τον Φ/Β σταθμό κατά τη διάρκεια της νύχτας οδηγούν στη χρήση κατάλληλων μονάδων αποθήκευσης ενέργειας ικανών να τροφοδοτούν το σύστημα για μικρές χρονικές περιόδους (περίπου τριάντα λεπτά έως μία ώρα). Το όφελος των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας σε αυτά τα συστήματα είναι σημαντικό. Όταν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παράγουν περισσότερη ενέργεια απ' όση χρειάζεται το σύστημα, οι μονάδες αυτές αποθηκεύουν τη περίσσεια ενέργειας και τη χρησιμοποιούν όταν είναι αναγκαία. Συγκεκριμένα, οι μεμβράνες της μονάδας αφαλάτωσης αντίστροφης όσμωσης λαμβάνουν το εισερχόμενο θαλασσινό νερό υπό πίεση μέσω μιας αντλίας. Όταν η ηλιακή ενέργεια μειώνεται ή δεν παράγεται επαρκή ενέργεια από την ανεμογεννήτρια, η προσφερόμενη ισχύς στο σύστημα μειώνεται και κατά συνέπεια η αντλία δεν μπορεί να διασφαλίσει την απαιτούμενη πίεση στο εισερχόμενο θαλασσινό νερό. Σαν αποτέλεσμα, το παραγόμενο νερό έχει υψηλότερη ηλεκτρική αγωγιμότητα από τα επιτρεπόμενα όρια και αποβάλλεται. Οι μονάδες αποθήκευσης ενέργειας μπορούν στις περιπτώσεις αυτές να συμπληρώσουν τη παραγόμενη ανανεώσιμη ενέργεια προκειμένου να διασφαλιστεί η παραγωγή νερού αποδεκτής αλατότητας. Μία από τις δύο σπουδαίες καινοτομίες του συστήματος αυτού, είναι η μη χρήση μπαταριών. Η δεύτερη είναι το προηγμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας.

4. ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Δύο πακέτα λογισμικού, τα προγράμματα TRNSYS και MATLAB, χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να σχεδιαστεί το σύστημα και να γίνει η προσομοίωσή του. Το TRNSYS είναι ένα δυναμικό σύστημα προσομοίωσης το οποίο δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να εισάγει υπορουτίνες, γραμμένες στη γλώσσα FORTRAN. Η MATLAB είναι μία υψηλού επιπέδου γλώσσα και ένα διαδραστικό περιβάλλον για αριθμητικούς υπολογισμούς και προγραμματισμό. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας που περιλαμβάνει αλγόριθμους υπολογιστικής νοημοσύνης (συνδυασμός Petri Nets, Fuzzy Cognitive Maps και αλγόριθμοι πρόγνωσης βασισμένοι στη θεωρία γκριζών συστημάτων) σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε με το Matlab. Όλα τα στοιχεία του συστήματος αφαλάτωσης μαζί με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας θα προσομοιωθούν στο TRNSYS (Εικόνα 2).



Εικόνα 2: Δομή λογισμικού

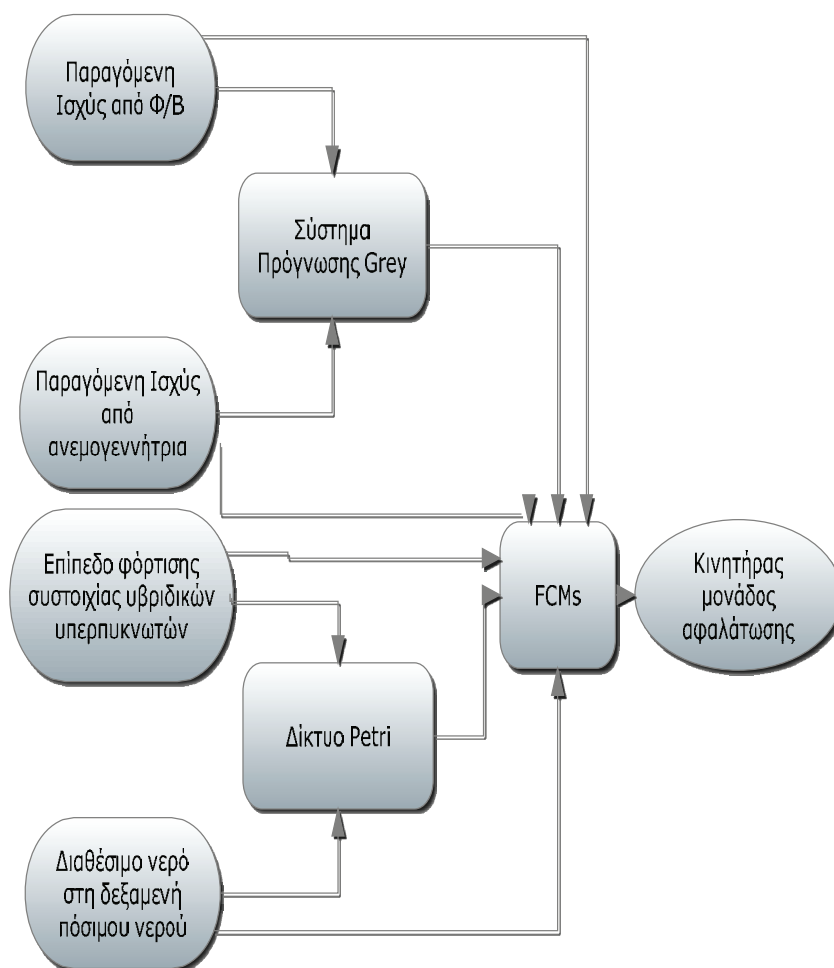
5. ΠΡΟΗΓΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ανάπτυξη της μονάδας ελέγχου και εποπτικής διαχείρισης της ενέργειας βασίστηκε σε αλγόριθμους υπολογιστικής νοημοσύνης. Η ανάπτυξη του έξυπνου ελέγχου στηρίχτηκε στη συνδυασμένη προσέγγιση Petri Nets (PNs) και Fuzzy Cognitive Maps (FCMs). Αυτή η σοδιασμένη προσέγγιση έχει ήδη αποδειχτεί ότι έχει τη δυνατότητα να συμπληρώνει την αδυναμία του ενός με τα πλεονεκτήματα του άλλου. Επίσης αλγόριθμοι πρόγνωσης βασισμένοι στη θεωρία γκριζών συστημάτων σχεδιάστηκαν για τη πρόβλεψη της παραγόμενης ενέργειας των Φ/Β πινέλων και της ανεμογεννήτριας. Τα PN χρησιμοποιούνται για να αποφασίζεται ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος και τα FCMs χρησιμοποιούνται για να ορίσουν τη κατάσταση λειτουργίας της μονάδος αφαλάτωσης.

Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας λαμβάνει αρχικά τέσσερα εισερχόμενα σήματα (inputs):

- Τη παραγόμενη ενέργεια από τα Φ/Β
- Τη παραγόμενη ενέργεια από την ανεμογεννήτρια
- Την κατάσταση φόρτισης της μονάδας αποθήκευσης ενέργειας και
- Τη ποσότητα νερού που έχει αποθηκευτεί στη δεξαμενή πόσιμου νερού.

Στη συνέχεια προβλέπει την ενέργεια που αναμένεται να παραχθεί το αμέσως επόμενο χρονικό διάστημα από τα Φ/Β και τη ανεμογεννήτρια. Κατόπιν, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας αποφασίζει για το σημείο λειτουργίας της μονάδος αφαλάτωσης. Το σύστημα διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου της μονάδας αφαλάτωσης παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3: Σχηματική παράσταση του συστήματος διαχείρισης ενέργειας

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Το αντικείμενο της παρούσης εργασίας είναι να αναπτυχθεί μια μονάδα αφαλάτωσης θαλασσινού νερού με χαμηλή ειδική κατανάλωση ενέργειας, ικανή να παράγει 2,5 - 5m³ πόσιμο νερό ημερησίως. Αποφασίστηκε να μη χρησιμοποιηθεί μια συμβατική μονάδα αποθήκευσης ενέργειας αλλά μια καινοτόμα μονάδα βραχυπρόθεσμης αποθήκευσης, η οποία σχεδιάστηκε και πρόκειται να υλοποιηθεί. Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η απόδοση του συστήματος και να εξασφαλιστεί η βέλτιστη λειτουργία της μονάδας αφαλάτωσης, ένα προηγμένο σύστημα διαχείρισης ενέργειας και ελέγχου σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε. Το σύστημα αυτό, βασίζεται στο συνδυασμό Petri Nets και Fuzzy Cognitive Maps. Επίσης, αλγόριθμοι πρόγνωσης βασισμένους στη θεωρία γκριζων συστημάτων σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν με σκοπό τη πρόβλεψη της παραγόμενης ενέργειας από τα Φ/Β και την ανεμογεννήτρια.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος ΑΡΙΣΤΕΙΑ – Smart Desalination – 529, συγχρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση και την Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας (ΓΓΕΤ).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Manolakos, D., et al., *Technical and economic comparison between PV-RO system and RO-Solar Rankine system. Case study: Thirasia island*. Desalination, 2008. **221**(1–3): p. 37-46.
- [2] Mohamed, E.S. and G. Papadakis, *Design, simulation and economic analysis of a stand-alone reverse osmosis desalination unit powered by wind turbines and photovoltaics*. Desalination, 2004. **164**(1): p. 87-97.
- [3] Mohamed, E.S., et al., *A direct coupled photovoltaic seawater reverse osmosis desalination system toward battery based systems — a technical and economical experimental comparative study*. Desalination, 2008. **221**(1–3): p. 17-22.
- [4] Buran, B., et al., *Environmental benefits of implementing alternative energy technologies in developing countries*. Applied Energy, 2003. **76**(1–3): p. 89-100.
- [5] Manolakos, D., et al., *A stand-alone photovoltaic power system for remote villages using pumped water energy storage*. Energy, 2004. **29**(1): p. 57-69.
- [6] Zoulias, E.I., et al., *Integration of hydrogen energy technologies in stand-alone power systems analysis of the current potential for applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006. **10**(5): p. 432-462.
- [7] Kaldellis, J.K., K.A. Kavadas, and E. Kondili, *Renewable energy desalination plants for the Greek islands—technical and economic considerations*. Desalination, 2004. **170**(2): p. 187-203.
- [8] Mohamed, E.S., et al., *The effect of hydraulic energy recovery in a small sea water reverse osmosis desalination system; experimental and economical evaluation*. Desalination, 2005. **184**(1–3): p. 241-246.
- [9] Kyriakarakos, G., et al., *A fuzzy cognitive maps–petri nets energy management system for autonomous polygeneration microgrids*. Applied Soft Computing, 2012. **12**(12): p. 3785-3797.
- [10] Li, X., Y.-J. Song, and S.-B. Han, *Frequency control in micro-grid power system combined with electrolyzer system and fuzzy PI controller*. Journal of Power Sources, 2008. **180**(1): p. 468-475.
- [11] Kyriakarakos, G., et al., *A fuzzy logic energy management system for polygeneration microgrids*. Renewable Energy, 2012. **41**(0): p. 315-327.
- [12] Kyriakarakos, G., et al., *Intelligent demand side energy management system for autonomous polygeneration microgrids*. Applied Energy, 2013. **103**(0): p. 39-51.

ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΥΨΗΛΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΑΠΕ

Ι. Αναγνωστόπουλος^{*} και Δ. Παπαντώνης

Εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.
E-mail: anagno@fluid.mech.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σχεδιαζόμενη μεγάλη ανάπτυξη των ΑΠΕ και η συνεπακόλουθη απαίτηση για υψηλή διείσδυση αιολικής και φωτοβολταϊκής παραγωγής κυμαινόμενης ισχύος θα δημιουργήσει την ανάγκη διαχείρισης ενός ποσοστού της παραγωγής αυτής, το οποίο δεν θα μπορεί να διοχετευθεί άμεσα στο δίκτυο, είτε λόγω προβλημάτων ευστάθειας, είτε επειδή μπορεί να υπερβαίνει κατά περιόδους τη συνολική ζήτηση.

Η προοπτική αυτή εξετάζεται ήδη στα περισσότερα εθνικά συστήματα των προηγμένων χωρών, ενώ η αποθήκευση της πλεονάζουσας παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) σε μονάδες αντλησιοταμίευσης αποτελεί σήμερα την πιο ώριμη και διαθέσιμη τεχνολογία διεθνώς, και ιδιαίτερα στην Ελλάδα, λόγω της ευνοϊκής τοπογραφίας και της σημαντικής τεχνολογίας από τη λειτουργία μεγάλων υδροηλεκτρικών έργων.

Η εκτίμηση των μελλοντικών αναγκών αποθήκευσης ενέργειας του ελληνικού συστήματος είναι ουσιώδης, προκειμένου να σχεδιαστεί αποτελεσματικά και να υλοποιηθεί εγκαίρως η κατασκευή των μονάδων αυτών, ώστε να υποστηριχθεί η ανάπτυξη των ΑΠΕ με οικονομικά βιώσιμες επενδύσεις.

Στην εισήγηση θα παρουσιασθούν αποτελέσματα της διερεύνησης που έγινε στο ΕΜΠ στα πλαίσια σχετικού ευρωπαϊκού ερευνητικού έργου, με συμμετοχή άλλων έξι χωρών. Εξετάζονται διάφορα σενάρια μελλοντικής ανάπτυξης του ηλεκτρικού συστήματος και των ΑΠΕ στην Ελλάδα, και μοντελοποιείται με ειδικό λογισμικό η συμπεριφορά του συστήματος, ώστε να προκύπτουν οι χρονοσειρές πλεονάζουσας παραγωγής ΑΠΕ. Τα αποτελέσματα αυτά αξιοποιούνται στη συνέχεια για τη μοντελοποίηση της λειτουργίας μονάδων αντλησιοταμίευσης ενταγμένων στο σύστημα, προκειμένου να εκτιμηθούν οι ανάγκες ισχύος και χωρητικότητάς τους για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τις επόμενες δεκαετίες.

Λέξεις Κλειδιά: Υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, Αντλησιοταμίευση, μοντελοποίηση ηλεκτρικού συστήματος

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μεγάλη διεύθυνση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) κυμαινόμενης ισχύος (κυρίως αιολικής και ηλιακής) έχει σημαντικούς περιορισμούς ασφαλείας ακόμη και σε πολύ ευέλικτα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και απορρίπτει παραγόμενης ενέργειας είναι αναπόφευκτες σε περιόδους υψηλού αιολικού ή ηλιακού δυναμικού. Επιπλέον, το παραμείνον φορτίο που πρέπει να καλύπτεται από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής του συστήματος μπορεί να εμφανίζει ισχυρές διακυμάνσεις, που επηρεάζουν τη σταθερότητα του δικτύου. Γι' αυτό, η μεγάλη κλίμακας αποθήκευση ενέργειας θα αποτελέσει μία από τις βασικές τεχνολογίες για την ένταξη μεγάλων μονάδων ΑΠΕ σε μελλοντικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, και θα συμμετάσχει στη δομή και λειτουργία των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας [1]. Η χρήση υδροηλεκτρικών μονάδων αντλησιοταμίευσης αποτελεί σήμερα την πλέον ώριμη και αξιόπιστη τεχνολογία για μεγάλη κλίμακας αποθήκευση ενέργειας, με υψηλή απόδοση και μεγάλη ευελιξία [2]. Επιπλέον, είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για την τοπολογία του εδάφους της Ελλάδας. Επομένως, θεωρείται σήμερα ως η βέλτιστη τεchnο-οικονομική λύση αποθήκευσης.

Το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής ΑΠΕ προβλέπεται να προέρχεται από εκμετάλλευση αιολικής και ηλιακής ενέργειας, το δυναμικό των οποίων είναι σημαντικό σε πολλές περιοχές, συμπεριλαμβανομένων των νησιών του Αιγαίου. Ωστόσο, λόγω της περιορισμένης ευελιξίας του συστήματος παραγωγής και των ασθενών διεθνών διασυνδέσεων, το υπάρχον δίκτυο δεν μπορεί να διαχειριστεί και να απορροφήσει μεγάλες ποσότητες κυμαινόμενης ισχύος παραγωγής, όπως η αιολική και η ηλιακή. Μερικές πρώτες μελέτες [3-5] έδειξαν ότι το σημερινό σύστημα θα μπορούσε να απορροφήσει σχεδόν το σύνολο της παραγωγής έως περίπου 5 GW εγκατεστημένης ισχύος αιολικών πάρκων. Πρόσφατα, ολοκληρώθηκε μια εμπειριστατωμένη ανάλυση και μελέτη των επιπτώσεων μεγαλύτερης διεύθυνσης αιολικής παραγωγής (έως 8 GW) στο ελληνικό σύστημα, με ορίζοντα το 2025 [6]. Για μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ ΑΠΕ οι απορρίπτει παραγωγής είναι αναπόφευκτες και αυξάνουν με την ανάπτυξη ΑΠΕ κυμαινόμενης ισχύος (αιολική και ηλιακή) φθάνοντας ή και υπερβαίνοντας το 35% έως το 2050 [7,8].

Τα υπάρχοντα ζεύγη διαδοχικών υδροηλεκτρικών σταθμών με ταμειυτήρες, που λειτουργούν σε διάφορα σημεία του ηπειρωτικού συστήματος της χώρας, αποτελούν τις πλέον πρόσφορες τοποθεσίες για την εγκατάσταση νέων μονάδων αντλησιοταμίευσης, απαιτώντας την κατασκευή μόνο του αντλιοστασίου και του αγωγού σύνδεσης των γειτονικών ταμειυτήρων. Οι θέσεις αυτές, καθώς και άλλες δυνατές θέσεις εγκατάστασης αντλησιοταμίευσης, προσδιορίζονται και αναλύονται σε πρόσφατες μελέτες [9].

Η καταγραφή και ιεράρχηση των υφιστάμενων εμποδίων για την ανάπτυξη της αποθήκευσης ενέργειας σε κλίμακα δικτύου σε έξι ευρωπαϊκές χώρες και η διαμόρφωση προτεινόμενων δράσεων για την αντιμετώπισή τους, ήταν ο στόχος του ερευνητικού προγράμματος της ΕΕ "Store" (www.store-project.eu), προκειμένου να υποστηριχθεί η υψηλή διεύθυνση των ΑΠΕ. Η εκτίμηση των μελλοντικών αναγκών αποθήκευσης ενέργειας των εθνικών ηλεκτρικών συστημάτων αποτελεί το πρώτο σημαντικό βήμα για την επίτευξη του στόχου αυτού. Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τα αποτελέσματα ενός υπολογιστικού αλγορίθμου που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του έργου και χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιώσει την τρέχουσα και τη μελλοντική εξέλιξη και λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Τα βασικά δεδομένα εισόδου για τον αλγόριθμο ελήφθησαν από τον εθνικό ενεργειακό σχεδιασμό – χάρτη για το 2050 [10], με βάση τον οποίο δημιουργήθηκαν και διερευνήθηκαν διάφορα μελλοντικά σενάρια ανάπτυξης του ηλεκτρικού συστήματος.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. ΕΘΝΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

Το 2010, η ελληνική κυβέρνηση συντάξε και δημοσιοποίησε το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΕΣΔΑΕ) για την περίοδο μέχρι το 2020 (Νόμος 3851/2010). Στόχος είναι η σημαντική αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη

τελική κατανάλωση ενέργειας στο 20%, που εξειδικεύεται σε 40% στην ηλεκτροπαραγωγή, 20% στη θέρμανση-ψύξη και 10% στις μεταφορές [11,12].

Τον Ιούνιο του 2012 εκπονήθηκε και δημοσιοποιήθηκε από την Εθνική Ενεργειακή Στρατηγική Επιτροπή ένας μακροπρόθεσμος εθνικός ενεργειακός σχεδιασμός του ελληνικού συστήματος, με τη μορφή Οδικού Χάρτη για την περίοδο 2020-2050 (ΕΟΧ-50) [10]. Η μελέτη αυτή παρέχει τις κατευθυντήριες γραμμές της εθνικής ενεργειακής στρατηγικής για τις επόμενες δεκαετίες, οι βασικοί στόχοι της οποίας είναι η μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενη ενέργεια και της κατανάλωσης πετρελαιοειδών και άνθρακα, με παράλληλη μεγιστοποίηση της διείσδυσης των ΑΠΕ, επιτυγχάνοντας σημαντικό περιορισμό των εκπομπών CO₂ μέχρι το έτος 2050. Περιλαμβάνει επίσης διάφορα πιθανά σενάρια εξέλιξης του ενεργειακού συστήματος, ώστε να προσδιοριστούν και να αξιολογηθούν εναλλακτικά μέτρα και πολιτικές για την εκπλήρωση των εθνικών και ευρωπαϊκών στόχων. Η συμμετοχή ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή μπορεί να φθάσει έως το 100% στα δύο πιο φιλόδοξα σενάρια (Μέτρα μεγιστοποίησης διείσδυσης ΑΠΕ – ΜΕΑΠ και Περιβαλλοντικά μέτρα Ελάχιστου Κόστους – ΠΕΚ), ενώ στο πιο συντηρητικό σενάριο (Υφιστάμενων Πολιτικών – ΥΦ) προβλέπεται μέτρια διείσδυση ΑΠΕ στο ηλεκτρικό σύστημα, έως 75% το 2050.

2.2. ΣΕΝΑΡΙΑ ΠΡΟΣ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

Στην παρούσα μελέτη εξετάζονται δύο σενάρια για τη μελλοντική ανάπτυξη ΑΠΕ. Το πρώτο (Σ-40) αφορά το έτος 2020, όταν, σύμφωνα με το [12], αλλά και τις τελευταίες προβλέψεις, το μερίδιο των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα προσεγγίσει το 40%. Το δεύτερο σενάριο (Σ-80) αναφέρεται σε μια πολύ μεγαλύτερη συμμετοχή των ΑΠΕ, της τάξης του 80%, η οποία, σύμφωνα με τον ΕΟΧ-50 [10], θα επιτευχθεί περί το 2040 με το σενάριο ανάπτυξης ΜΕΑΠ και περί το 2050 με το ΠΕΚ.

Επιπλέον, στο πλαίσιο των παραπάνω δύο βασικών σεναρίων διερευνάται και η σχετική ανάπτυξη των δύο πιο σημαντικών ανανεώσιμων πηγών στην Ελλάδα, δηλαδή της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας, επειδή υπάρχουν κινητήριες δυνάμεις της αγοράς που μπορεί να προωθήσουν περισσότερο την ανάπτυξη της μιας τεχνολογίας έναντι της άλλης. Τα κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για τις διάφορες υποπεριπτώσεις (Α, Β ή Γ) που εξετάζονται, συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα 1.

3. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε στο Εργαστήριο Υδροδυναμικών Μηχανών (ΕΥΜ) του ΕΜΠ χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση του ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και την προσομοίωση της εξέλιξης και ετήσιας λειτουργίας μέχρι το έτος 2050. Οι διαθέσιμες χρονοσειρές ωριαίων τιμών για το φορτίο και την παραγωγή των θερμικών και των μονάδων ΑΠΕ του συστήματος για ένα έτος αναφοράς προεκβάλλονται κατάλληλα στα επόμενα έτη, ώστε είναι να αντιπροσωπεύουν την προβλεπόμενη κατάσταση και λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε μία από τις περιπτώσεις που μελετώνται.

3.1. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΥΠΟΛΟΙΠΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

Αρχικά, ο αλγόριθμος υπολογίζει σε ωριαία βάση τις απορρίψεις της κυμαινόμενης παραγωγής ΑΠΕ, όταν είναι υψηλότερη από τη μέγιστη που μπορεί να διοχετευθεί μέσα στο σύστημα. Αυτό γίνεται δημιουργώντας κατ' αρχάς την καμπύλη υπολοίπου φορτίου (ΚΥΦ) για κάθε μία από τις περιπτώσεις που του Πίνακα 1, ως εξής: Κατασκευάζεται πρώτα η ετήσια χρονοσειρά ζήτησης φορτίου, προεκβάλλοντας τα αντίστοιχα δεδομένα του έτους αναφοράς, έτσι ώστε η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας να γίνει ίση με αυτήν που προβλέπεται στο εκάστοτε σενάριο που μελετάται. Τα ωριαία δεδομένα της παραγωγής των αιολικών πάρκων των φωτοβολταϊκών και των υδροηλεκτρικών εγκαταστάσεων

προεκβάλλονται επίσης στα μελλοντικά έτη, πολλαπλασιάζοντας κατάλληλα τη μέση και τις ωριαίες τιμές, ώστε να αντιπροσωπεύουν την προβλεπόμενη εγκατεστημένη ισχύ και ενεργειακή παραγωγή αυτών των τεχνολογιών σε κάθε σενάριο. Σε προηγούμενες μελέτες διαπιστώθηκε ότι οι ετήσιες ενεργειακές απορρίψεις ΑΠΕ αυξάνουν με την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των αιολικών πάρκων (ΑΠ) και συσχετίζονται με τον μέσο όρο του φορτίου του συστήματος του εξεταζόμενου έτους [4, 13].

Πίνακας 1: Μείγμα εγκατεστημένης ισχύος τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, για τα σενάρια που εξετάζονται

	2011	2020 – Σ-40%		Σ-80% ΑΠΕ		
		A	B	A	B	Γ
<i>Thermal power plants (GW)</i>						
Λιγνίτης	5.3	3.5		2.0		
Φυσικό αέριο	1.8	5.2		4.5		
Πετρέλαιο	1.4	1.4		0.2		
<i>RE power plants (GW)</i>						
Αιολικά	1.3	6.5	5.0	14.0	13.0	11.0
Ηλιακά (ΦΒ ισοδύν.)	0.4	2.5	4.9	8.3	11.5	14.7
Υδροηλεκτρικά	3.1	3.5		4.5		
Νέα αντλησιοταμίευση	0	1.0		4.5		
Γεωθερμία	0	0.1		1.7		
Λοιπές ΑΠΕ	0.3	0.3		0.5		
Παραγωγή (TWh/έτος)	53.0	60.8		88.3		
Παρ. ΑΠΕ (TWh/έτος)	7.9	24.5		70.6		
Συμμετοχή ΑΠΕ	~15%	~ 40%		~ 80%		

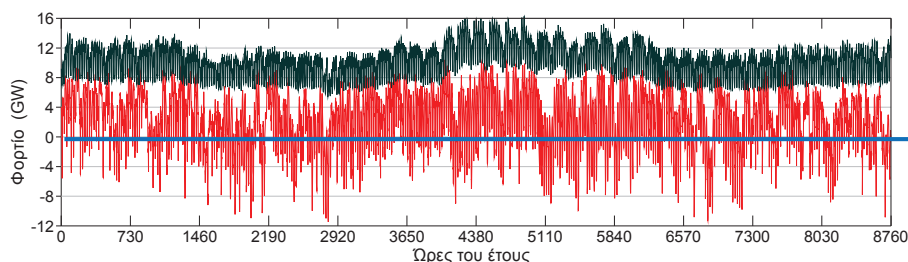
Στη συνέχεια, λαμβάνεται η ΚΥΦ αφαιρώντας την ωριαία αιολική, ηλιακή και υδροηλεκτρική παραγωγή από το αντίστοιχο φορτίο του συστήματος. Για το σενάριο 80% αφαιρείται επίσης μια σταθερή ισχύς 1 GW, που αντιπροσωπεύει ένα εκτιμώμενο φορτίο βάσης των μονάδων παραγωγής γεωθερμικής ενέργειας (~2/3 της εγκατεστημένης). Το υπόλοιπο αυτό φορτίο του συστήματος θα πρέπει να καλύπτεται από τις υπόλοιπες μονάδες παραγωγής που θα διαθέτει το σύστημα (θερμικές μονάδες βάσης και άλλες ελεγχόμενες ΑΠΕ, συμπεριλαμβανομένων των μονάδων αποθήκευσης ενέργειας).

3.2. ΑΠΟΡΡΙΨΕΙΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΕ

Οι απορρίψεις της κυμαινόμενης παραγωγής από ΑΠΕ συμβαίνουν κατά τη διάρκεια των χρονικών περιόδων που η ΚΥΦ βρίσκεται κάτω από το τεχνικό ελάχιστο του συστήματος ή κάτω από το μηδέν, στην περίπτωση ενός πολύ ευέλικτου συστήματος παραγωγής που δεν έχει τεχνικό όριο ελάχιστης ισχύος. Για το ελληνικό σύστημα το τεχνικό ελάχιστο έχει οριστεί σε 3.7 GW για το σενάριο του 2020, ενώ για το σενάριο του Σ-80 δοκιμάστηκαν δύο διαφορετικές τιμές: 0.4 GW και 2 GW, οι οποίες αντιπροσωπεύουν ένα πολύ ευέλικτο και ένα μέτριας ευελιξίας σύστημα, σύμφωνα με το τα σχέδια ανάπτυξης του εθνικού ενεργειακού χάρτη.

Το μέγιστο επιτρεπόμενο ποσοστό διείσδυσης κυμαινόμενης αιολικής και ηλιακής παραγωγής κατά τη διάρκεια της ημέρας λαμβάνεται τελικά με βάση τη σταθμισμένη ισχύ παραγωγής των δύο αυτών πηγών, σε κάθε χρονικό διάστημα προσομοίωσης (εδώ 1 ώρα).

Οι διακυμάνσεις της ΚΥΦ καθώς και της απορριπτόμενης ισχύος ΑΠΕ φαίνονται στο ενδεικτικό διάγραμμα της Εικ. 1. Το τμήμα της καμπύλης ΥΦ που βρίσκεται κάτω από το μηδέν (δηλ. οι απορρίψεις) εμφανίζει πολύ έντονες διακυμάνσεις, με πολλές υψηλές (αρνητικές) κορυφές και τυχαία κατανεμημένες περιόδους συνεχών ή μηδενικών απορρίψεων. Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας θα πρέπει να είναι σε θέση να παρακολουθεί όσο το δυνατόν πλησιέστερα αυτές τις μεταβολές ισχύος της ΚΥΦ, χρησιμοποιώντας π.χ. έναν αριθμό αντλιών μεταβλητών στροφών σε παράλληλη λειτουργία.



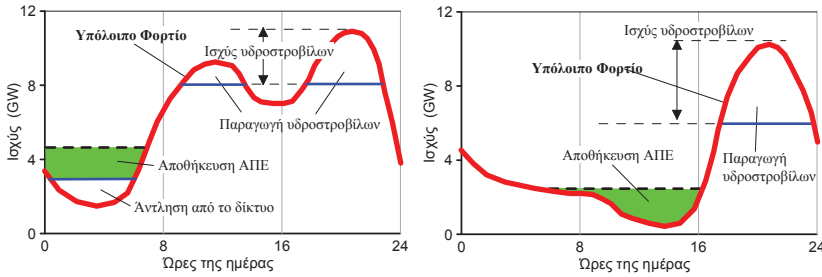
Εικόνα 1: Καμπύλη φορτίου (μαύρη) και ΚΥΦ (κόκκινη) για το σενάριο Σ-80, περ. Β.

3.3. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Ένας δεύτερος υπολογιστικός αλγόριθμος προσομοιώνει τη λειτουργία των μονάδων αντλησιοταμίευσης που εντάσσονται στο ηλεκτρικό σύστημα, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις επιμέρους ενεργειακές απώλειες και την συνολική απόδοση του κύκλου αποθήκευσης, καθώς και τους διάφορους τεχνικούς περιορισμούς, όπως η εγκατεστημένη αντλητική ισχύς και ισχύς των υδροστροβίλων και η χωρητικότητα των ταμιευτήρων. Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του εθνικού ενεργειακού χάρτη για το 2050, η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών (ΦΒ) λαμβάνεται 1 GW για το σενάριο Σ-40% (2020) και 4,5 GW για το σενάριο Σ-80% ΑΠΕ. Η ολική αποθηκευτική ικανότητα θεωρείται για όλες τις περιπτώσεις ότι αντιστοιχεί σε 12 ώρες συνεχούς λειτουργίας άντλησης σε ονομαστική ισχύ.

Το ημερήσιο πρόγραμμα παραγωγής των μονάδων αντλησιοταμίευσης καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του φορτίου αιχμής του συστήματος, προκειμένου να επιτευχθεί αποτελεσματική αποκοπή των κορυφών της ΚΥΦ σε περιόδους υψηλής ζήτησης (Εικ. 2) Τέλος, το υπόλοιπο της αντλητικής ισχύος και της διαθέσιμης χωρητικότητας των ταμιευτήρων που μπορεί να απομένει μετά τον κύκλο αποθήκευσης της παραγωγής ΑΠΕ, μπορεί να αξιοποιηθεί για την περαιτέρω εξομάλυνση της ΚΥΦ, εφαρμόζοντας μια στρατηγική λειτουργίας αποκοπής κορυφών και πλήρωσης κοιλάδων, όπως φαίνεται στην Εκ. 2. Ο αλγόριθμος μπορεί να εφαρμόζει τη στρατηγική αυτή σε καθημερινή βάση, καθ' όλη τη διάρκεια του έτους προσομοίωσης.

Το λογισμικό εφαρμόζεται επίσης για την διενέργεια παραμετρικών μελετών της επίδρασης της συνολικής ισχύος και χωρητικότητας αποθήκευσης του συστήματος αντλησιοταμίευσης της χώρας, στον βαθμό ανάκτησης της απορριπτόμενης παραγωγής ΑΠΕ, καθώς και στον συντελεστή εκμετάλλευσης (ΣΕ) των αντλιοστασίων. Ο συντελεστής αυτός μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο για τον σχεδιασμό και τη βέλτιστη διαστασιολόγηση νέων μονάδων αντλησιοταμίευσης, προκειμένου να ανταποκρίνονται στις μελλοντικές ανάγκες αποθήκευσης του συστήματος, αλλά να είναι και οικονομικά βιώσιμες.



Εικόνα 2: Ενδεικτικές μορφές ημερήσιας διακύμανσης της ΚΥΦ πριν και μετά την εξομάλυνση με αποθήκευση ενέργειας, για συνθήκες υψηλής διεξόδου ΑΠΕ.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1. ΑΠΟΡΡΙΨΕΙΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΕ

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για την απορριπτόμενη ισχύ ΑΠΕ και τη λειτουργία του συστήματος αντλησιοταμίευσης στο διασυνδεδεμένο δίκτυο δίνονται στον Πίνακα 2, για όλα τα σενάρια και τις υποπεριπτώσεις που εξετάστηκαν. Για το σενάριο Σ-40, περίπου το 20% της κυμαινόμενης παραγωγής ΑΠΕ δεν μπορεί να απορροφηθεί άμεσα και χρειάζεται αποθήκευση με αντλητική ισχύ της τάξης των 5-6 GW. Το ποσοστό απορρίψεων είναι αρκετά μικρότερο σε μερικές περιπτώσεις του σεναρίου Σ-80 (Α και Β στον Πίνακα 2), κατά το οποίο οι περισσότερες από τις ανελαστικές λιγνιτικές μονάδες θα έχουν κλείσει, και ως εκ τούτου η ευελιξία του συστήματος και οι δυνατότητες διεξόδου ΑΠΕ θα έχουν αυξηθεί. Ωστόσο, η αντίστοιχη ποσότητα απορριπτόμενης ενέργειας είναι σχεδόν διπλάσια (7-8 TWh, σε σύγκριση με 4-4.5 TWh το 2020). Επιπλέον, οι απορρίψεις στο Σ-80 μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερες αν τα τεχνικά ελάχιστα του συστήματος παραμείνουν σχετικά υψηλά. Έτσι, εάν το τεχνικό ελάχιστο, αντί για 0.4 GW (στο οποίο αντιστοιχούν τα αποτελέσματα του Πίνακα 2), είναι υψηλότερα, στα 2 GW, οι απορρίψεις θα είναι κατά 50%-70% αυξημένες.

Πίνακας 2. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των σεναρίων/περιπτώσεων που εξετάστηκαν

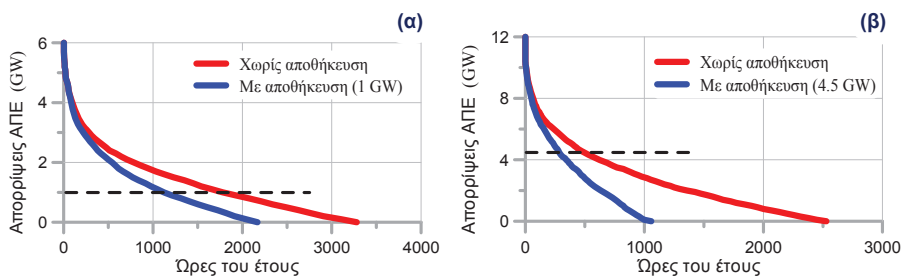
Περ.	Μεγ. αρν. Ισχύς ΥΦ (GW)	Απορριπ. τ. παραγ. ΑΠΕ. (%)	Για αποθήκευση (GWh)	Μη-αποθηκ. κεύσιμη (GWh)	Βαθμός απόδοσης αποθ. (%)	ΣΕ αντλησιοταμίευσης (%)	
						ΑΠΕ	Σύστημα
40% συμμετοχή ΑΠΕ (2020)							
A	5.2	19.8	4130	3100	25.0	11.6	18.6
B	6.3	21.5	4470	2980	33.3	17.0	18.1
80% συμμετοχή ΑΠΕ							
A	10.2	13.1	6900	3300	52.0	8.9	13.9
B	11.5	15.1	7900	2900	63.2	12.5	13.7
Γ	13.1	19.0	10000	3450	65.5	16.5	11.5

Η ισχύς του 1 GW για το σύστημα αντλησιοταμίευσης που προβλέπεται στο σενάριο Σ-40 δεν είναι αρκετή για την αποτελεσματική ανάκτηση των απορρίψεων ισχύος ΑΠΕ το εν λόγω έτος. Στην καλύτερη περίπτωση Β (παρόμοια αιολική - ηλιακή ανάπτυξη), αποθηκεύεται μόνο το 1/3 των απορρίψεων (βαθμός αποθήκευσης 33%, Πίνακας 2). Αντίθετα, το σύστημα των

4.5 GW στο σενάριο Σ-80 επιτυγχάνει περίπου διπλάσιο βαθμό αποθήκευσης, παρά το γεγονός ότι διπλασιάζεται η απορριπτόμενη ποσότητα ενέργειας. Η περίπτωση Α του σεναρίου αυτού, κατά την οποία ευνοείται η εκμετάλλευση του αιολικού έναντι του ηλιακού δυναμικού, είναι η χειρότερη όσον αφορά την αποτελεσματικότητα ανάκτησης απορρίψεων.

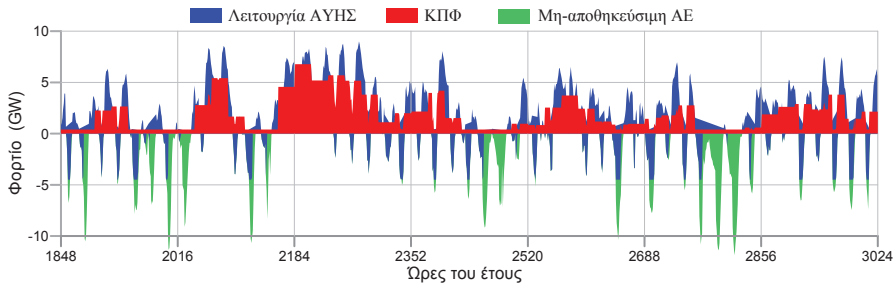
Όσον αφορά τον Συντελεστή Εκμετάλλευσης (ΣΕ, capacity factor) της αντλιοσταμείωσης, τα αποτελέσματα στον Πίνακα 2 δείχνουν ότι για όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν παραμένει χαμηλή, αρκετά κάτω από 20%, όταν οι μονάδες λειτουργούν μόνο για την απορρόφηση της περίσσειας παραγωγής ΑΠΕ. Ωστόσο, η πλήρης αξιοποίησή της και για την εξομάλυνση της καμπύλης φορτίου του συστήματος αυξάνει τον συντελεστή κατά περίπου 12%-14%. Ως εκ τούτου, η συνολική χρησιμοποίηση των αντλιοστασίων μπορεί να φθάσει στην περιοχή 25%-35%, η οποία θεωρείται οικονομικά βιώσιμη. Οι περιπτώσεις της πλέον αυξημένης ανάπτυξης των ΑΠ έναντι των ΦΒ εμφανίζουν και στα δύο σενάρια τον μικρότερο ΣΕ του συστήματος αντλιοσταμείωσης (περ. Α, Σ-40 και Σ-80, Πίνακας 2).

Η καμπύλη διάρκειας της περίσσειας παραγωγής ΑΠΕ δείχνει ότι απορρίψεις συμβαίνουν για περίπου 3300 ώρες του έτους κατά το σενάριο Σ-40 και λιγότερο συχνά στο Σ-80 (Εικ. 3). Λόγω του υψηλότερου βαθμού αποθήκευσης του τελευταίου, η καμπύλη διάρκειας της παραμένουσας μη-αποθηκεύσιμης παραγωγής ΑΠΕ εμφανίζει πολύ μικρό χρονικό εύρος (λίγο πάνω από 1000 ώρες ετησίως, Εικ. 3β). Αυτό σημαίνει ότι το υπόλοιπο της περίσσειας παραγωγής πιθανότατα δεν μπορεί να αξιοποιηθεί/αποθηκευθεί με οικονομικώς αποδοτικό τρόπο από κάποια άλλη τεχνολογία.



Εικόνα 3: Καμπύλες διάρκειας απορριπτόμενης παραγωγής ΑΠΕ: α) Σ-40/Β, και β) Σ-80/Β

Η περικοπή των ημερήσιων κορυφών της ΚΥΦ είναι μικρή όταν το σύστημα αντλιοσταμείωσης χρησιμοποιείται μόνο για τις απορρίψεις ΑΠΕ, αλλά αυξάνει αισθητά με πλήρη εκμετάλλευση του συστήματος (εξομάλυνση της ΚΥΦ με νυχτερινή άντληση). Οι μεγαλύτερες περικοπές των αιχμών της ΚΥΦ επιτυγχάνονται με το σύστημα 4.5 GW στο σενάριο Σ-80. Στην περίπτωση αυτή, η μέγιστη ετήσια ζήτηση φορτίου από τις υπόλοιπες μονάδες του συστήματος μπορεί να μειωθεί από 10.4 GW σε περίπου 7 GW για όλες τις περιπτώσεις. Το αποτέλεσμα αυτό αντιστοιχεί σε δυνατότητα σημαντικής μείωσης της αναγκαίας ισχύος θερμικών μονάδων (κυρίως φυσικού αερίου) που πρέπει να είναι ενταγμένες στο σύστημα κατά το σενάριο Σ-80. Μια ενδεικτική άποψη αυτής της συμπεριφοράς δίνεται στην Εικ. 4.

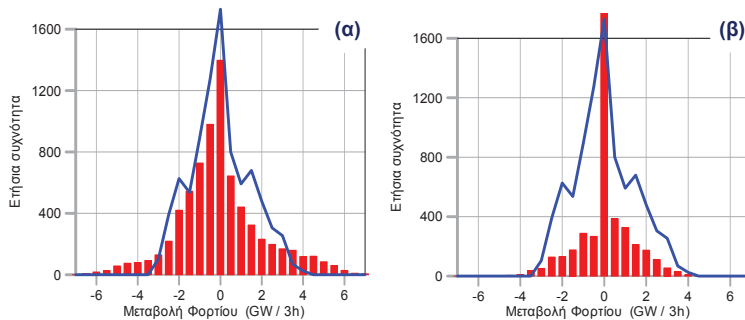


Εικόνα 4: Μεταβολή φόρτισης του συστήματος αντλησιοταμίευσης (ΑΥΗΣ) και των λοιπών ελεγχόμενων μονάδων. Σενάριο Σ-80/Β

4.2. ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η ευστάθεια του δικτύου μελετήθηκε με κριτήριο τη συχνότητα εμφάνισης συμβάντων σημαντικής μεταβολής φορτίου σε διάστημα 1-8 ωρών, που θα πρέπει να καλυφθεί από τις λοιπές ελεγχόμενες μονάδες του συστήματος. Διαπιστώθηκε ότι στο σενάριο Σ-40, λόγω της σχετικά μικρής έως μέτριας συμμετοχής των ΑΠΕ, η ευστάθεια του συστήματος δεν επηρεάζεται σημαντικά. Η όποια επιβάρυνση από την ένταξη κυμαινόμενης παραγωγής αντισταθμίζεται από την ελεγχόμενη έγχυση της αποθηκευμένης ενέργειας απορρίψεων στο δίκτυο κατά τις ώρες αιχμής.

Η εικόνα αυτή αλλάζει στο σενάριο Σ-80, όπου το απαιτούμενο εύρος μεταβολής του φορτίου των ελεγχόμενων μονάδων παραγωγής αυξάνεται σημαντικά, γεγονός που έχει αρνητική επίδραση στη σταθερότητα του δικτύου (Εικ. 5α). Ωστόσο, η πλήρης αξιοποίηση του προβλεπόμενου συστήματος αντλησιοταμίευσης μπορεί να αντιστρέψει αυτό το αποτέλεσμα, χάρη στη σημαντική εξομάλυνση της καμπύλης φορτίου που επιτυγχάνεται, με αποτέλεσμα μια αισθητή αύξηση της ευστάθειας του όλου συστήματος. (Εικ. 5β).

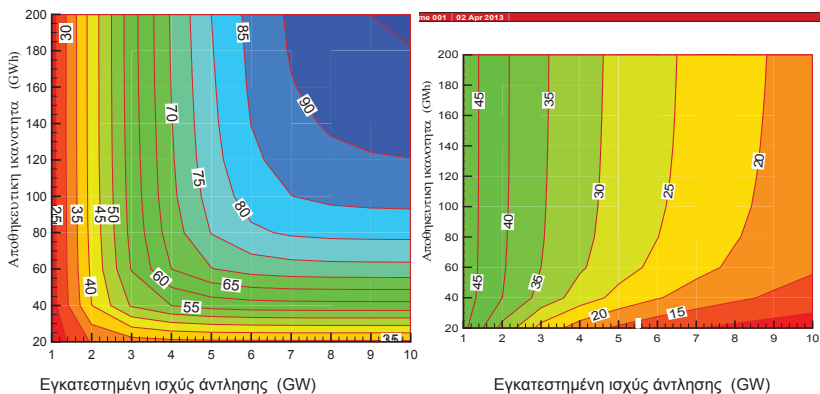


Εικόνα 5: Ετήσια μεταβλητότητα του φορτίου συστήματος (γραμμές) και των ελεγχόμενων μονάδων (μπαρές), Σ-80/Β: α) Χωρίς αποθήκευση, β) Πλήρης αξιοποίηση αποθήκευσης

4.3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΝΤΛΗΣΙΟΤΑΜΙΕΥΣΗΣ

Με τον υπολογιστικό αλγόριθμο μελετήθηκε η δυνατότητα βελτιστοποίησης των δύο βασικών μεταβλητών σχεδιασμού του μελλοντικού συστήματος αντλησιοταμίευσης, δηλαδή της αντλητικής ισχύος και της αποθηκευτικής ικανότητας. Τα αποτελέσματα της παραμετρικής διερεύνησης για την επίδραση των μεταβλητών αυτών στον βαθμό ανάκτησης απορρίψεων

και στον συντελεστή εκμετάλλευσης του αποθηκευτικού συστήματος παρουσιάζονται με τη μορφή ολοκληρωμένων διαγραμμάτων στην Εικ. 6, από τα οποία μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.



Εικόνα 6: Διαγράμματα μεταβολής του βαθμού ανάκτησης απορρίψεων ΑΠΕ (αριστερά) και του ΣΑ των αντλητικών μονάδων (δεξιά), για το σενάριο Σ-80/Γ

Στο αριστερό διάγραμμα της Εικ. 6 για παράδειγμα, παρατηρείται ότι για την προβλεπόμενη στον ΕΟΧ-50 εγκατεστημένη ισχύ αντλιοσταμείωσης (έως 4.5-5 GW), ο μέγιστος δυνατός βαθμός αποθήκευσης της περίσσειας ΑΠΕ δεν υπερβαίνει το 75%-80%, ακόμη και για απεριόριστη αποθηκευτική ικανότητα. Στο ίδιο διάγραμμα φαίνεται ότι, ενώ ένας βαθμός αποθήκευσης της τάξης του 75% μπορεί να επιτευχθεί με σύστημα αντλιοσταμείωσης ισχύος 5 GW και χωρητικότητας 80 GWh (16 ώρες συνεχούς λειτουργίας), η επίτευξη λίγο υψηλότερης απόδοσης, έως το 80%, θα απαιτούσε αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας σε 200 GWh. Εγκατάσταση ακόμη μεγαλύτερης αντλητικής ισχύος (π.χ. 7 GW) αυξάνει τον βαθμό ανάκτησης απορρίψεων, όμως μειώνει δραστικά τον ΣΕ της αντλιοσταμείωσης, όπως φαίνεται στο δεξί διάγραμμα της Εικ. 6.

Συνεπώς, η οριστική απόρριψη ενός ποσοστού της παραγωγής ΑΠΕ είναι αναπόφευκτη, δεδομένου μάλιστα και του πολύ περιορισμένου εύρους της καμπύλης διάρκειάς του, εκτός αν θα μπορούσε να διοχετευθεί σε μικρές καταναλωμένες καταναλώσεις, όπως για παράδειγμα τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα.

Τέλος, συγκρίνοντας τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τις τρεις περιπτώσεις του σεναρίου Σ-80, διαπιστώθηκε, με βάση τις εκτιμήσεις του ΕΟΧ-50, ότι η περίπτωση Γ (εντονότερη ανάπτυξη ΦΒ) συνδυάζει τον υψηλότερο βαθμό ανάκτησης περίσσειας ΑΠΕ και τον καλύτερο συντελεστή εκμετάλλευσης του συστήματος αντλιοσταμείωσης. Το πλεονέκτημα αυτό διατηρείται ακόμη και στην περίπτωση αυξημένου τεχνικού ορίου διεύθυνσης ΑΠΕ στο σύστημα.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα μελέτη διερευνά τις ανάγκες αποθήκευσης ενέργειας του εθνικού ηλεκτρικού συστήματος, σε μελλοντικές συνθήκες υψηλής συμμετοχή ΑΠΕ, με τη χρήση λογισμικού προσομοίωσης της λειτουργίας του μετά την ένταξη μονάδων αντλιοσταμείωσης. Η οικονομική βιωσιμότητα των τελευταίων προτείνεται να συσχετίζεται με τον συντελεστή εκμετάλλευσης των αντλιοστασίων, επιτρέποντας έτσι μια γενική εκτίμηση που δεν εξαρτάται από τη μελλοντική εξέλιξη της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα αποτελέσματα φανερώνουν τον σημαντικό ρόλο της ευελιξίας της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τη μείωση των αναγκών αποθήκευσης ενέργειας. Ένα σύστημα με σημαντικό τεχνικό ελάχιστο ισχύος της τάξης του 25% του μέσου ετήσιου φορτίου προκαλεί περίπου διπλάσια απόρριψη παραγωγής ΑΠΕ από ένα πιο ευέλικτο σύστημα με 5% τεχνικό ελάχιστο. Η απόδοση της αποθήκευσης με σύστημα αντλησιοταμίευσης επίσης βελτιώνεται αισθητά σε ένα πιο ευέλικτο ηλεκτρικό σύστημα.

Εκτός από την ανάκτηση σημαντικού μέρους των απορρίψεων ανανεώσιμης ενέργειας, η ένταξη και λειτουργία των μονάδων αντλησιοταμίευσης φαίνεται ότι μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ευστάθεια του συστήματος. Όμως, ο συντελεστής εκμετάλλευσης των μονάδων αυτών μειώνεται καθώς αυξάνεται εγκατεστημένη ισχύς τους. Επομένως, υπάρχει μια βέλτιστη διαστασιολόγηση της αντλησιοταμίευσης σε εθνικό επίπεδο, προκειμένου να μεγιστοποιείται το ποσοστό ανάκτησης των απορρίψεων ΑΠΕ και παράλληλα, να διασφαλίζεται η οικονομική βιωσιμότητα των σχετικών επενδύσεων. Η εγκατεστημένη ισχύς άντλησης και η χωρητικότητα αποθήκευσης είναι οι δύο πιο κρίσιμες παράμετροι σχεδιασμού, η βέλτιστη τιμή των οποίων εξαρτάται από τη μελλοντική ανάπτυξη του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Η σχετική ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας και των τεχνολογιών ηλιακής ενέργειας αποτελεί μια τρίτη σημαντική παράμετρο της μελλοντικής συμπεριφοράς του ηλεκτρικού συστήματος. Οι προσομοιώσεις έδειξαν ότι στο σενάριο ευνοϊκότερης ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας αυξάνει το ποσοστό άμεσης διείσδυσης της παραγωγής στο δίκτυο, αλλά μειώνεται τόσο ο βαθμός ανάκτησης των απορρίψεων, όσο και ο συντελεστής εκμετάλλευσης των μονάδων αντλησιοταμίευσης.

Ακόμη και με έναν αποτελεσματικό σχεδιασμό του συστήματος αντλησιοταμίευσης, με μεγάλη χωρητικότητα, θα παραμένει μη-αποθηκεύσιμο ένα μήμα απορρίψεων ΑΠΕ, της τάξης του 25%, το οποίο έχει μικρή καμπύλη διάρκειας και, ως εκ τούτου, δεν μπορεί να αποθηκευθεί με συστήματα υψηλού κεφαλαιακού κόστους. Η διοχέτευση αυτής της παραγωγής σε μικρές κατανεμημένες καταναλώσεις, όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, θα μπορούσε να είναι μια πιθανή λύση.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή συγχρηματοδοτήθηκε από το Intelligent Energy Europe Programme της Ευρωπαϊκής Ένωσης, στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου “stoRE”.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Zach K, Auer H, Korbler G, and Lettner G, 2012, “Contribution of bulk energy storage in future electricity systems. Facilitating renewable energy expansion”, Technical Report D2.3 of project “stoRE”, available at: <www.store-project.eu>
- [2] Deane et al, 2010, “Techno-economic review of existing and new pumped hydro energy storage plant”, *Ren. Sust. Energy Rev.*, 14, pp. 1293-1302.
- [3] Διαλυνάς Ε., 2009, “Επιπτώσεις της υψηλής στάθμης αιολικής διείσδυσης στη λειτουργία του ελληνικού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας”, *Ημερίδα ΤΕΕ, Χαλκίδα, 10-11 Απριλίου*
- [4] Caralis G., Papantonis D., Zervos A., 2012, “The role of pumped storage systems towards the large scale wind integration in the Greek power system”, *Ren. Sust. Energy Rev.*, 16, pp. 2558-65.
- [5] Μπουλαξής Ν., 2009, “Η Διείσδυση των ΑΠΕ στο Ηλεκτρικό Δίκτυο και οι Εθνικοί Στόχοι για το 2020”, 2η Επιστημονική Συνάντηση, Energy Institute of Southeast Europe, Αθήνα, 24 Νοεμ.

- [6] Διαλυνάς Ε., Παπαντώνης Δ., Παπαθανασίου Σ., 2011, “Μελέτη των επιπτώσεων στη λειτουργία του ελληνικού συστήματος από την αιολική διείσδυση 5 έως 8 GW μέχρι το έτος 2025: Προϋποθέσεις και εκτίμηση του κόστους ομαλής ένταξής τους”, Τελική Έκθεση για τη ΡΑΕ
- [7] Anagnostopoulos J. and Papantonis D., 2012, “Energy storage to support large RES integration in Greece: Current policy, legislation, and investment prospects”, Renewable Energy / PowerGen Europe, Cologne, Germany, June 12-14, 2012.
- [8] Anagnostopoulos J. and Papantonis D., 2012, “Study of pumped storage schemes to support high RES penetration in the electric power system of Greece”, Energy, 45, pp. 416-423.
- [9] Στεφανάκος Ι., Μουτάφης Ν., Αναγνωστόπουλος Ι., Παπαντώνης Δ., 2010, “Διερεύνηση της δυνατότητας κατασκευής έργων αποταμίευσης ενέργειας μέσω άντλησης σε περιοχές του Ελληνικού Διασυνδεδεμένου Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας”, ΕΜΠ, Τελική Έκθεση για τη ΡΑΕ
- [10] Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, 2012, “Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός – Οδικός Χάρτης για το 2050”, <www.ypeka.gr>
- [11] Επιτροπή 20-20-20, “Ανάλυση Ενεργειακών Σεναρίων διείσδυσης των τεχνολογιών ΑΠΕ στο Ενεργειακό Σύστημα και Επίτευξης των Εθνικών Στόχων του 2020 με χρήση των μοντέλων MARKAL, ENPEP, WASP, COST”, ΥΠΕΚΑ, Αθήνα, Ιούλιος 2010.
- [12] Ministry of Environment, Energy & Climate Change, 2010, “National Renewable Energy Action Plan in Scope of Directive 2009/28/EC” (www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=285)
- [13] Anagnostopoulos J, and Papantonis D, 2011, “Combined conventional hydropower plants and pumped storage units to support large wind penetration in electric grids”, HYDRO 2011 Intl. Conference and Exhibition, Prague, Czech Republic, October 17-19.

ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ ΕΝΘΥΛΑΚΩΜΕΝΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΣΕ ΣΦΑΙΡΙΚΗ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ ΣΕ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΥΠΟ ΜΟΡΦΗ ΛΑΝΘΑΝΟΥΣΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Κ. Αρβανίτης^{1,2,*}, Η. Παπανικολάου¹, Β. Μπελεσιώτης¹, Μ. Ασσαέλ²

¹Εργαστήριο Ηλιακών & Άλλων Ενεργειακών Συστημάτων, ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»
153 10 Αγία Παρασκευή, Αθήνα, Ελλάδα

*e-mail: k.arvanitis@ipta.demokritos.gr

²Εργαστήριο Θερμοφυσικών Ιδιοτήτων & Περιβαλλοντικών Διεργασιών,
Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΑΠΘ, 54124 Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία μελετάται το φαινόμενο αλλαγής φάσης κατάλληλων υλικών για αποθήκευση θερμότητας σε κλειστές μακροκάψουλες με μεθόδους υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Ειδικότερα, εξετάζεται η περίπτωση τήξης σε σφαιρική κοιλότητα της σακχαροαλκοόλης 'μαννιτόλη' (D-mannitol), υλικό με σημείο τήξης στην περιοχή ενδιαφέροντος των μεσαίων θερμοκρασιών (100 – 250 °C). Η προσομοίωση του φαινομένου γίνεται μέσω επίλυσης του μαθηματικού μοντέλου μεταφοράς θερμότητας και ροής λόγω φυσικής συναγωγής σε κλειστή σφαιρική γεωμετρία με χρήση του λογισμικού ANSYS Fluent. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων επικεντρώνεται στην επιρροή της φυσικής συναγωγής στη δυναμική της διεργασίας σε σχέση με την απλοϊκή προσέγγιση της επίλυσης μόνο της αγωγής θερμότητας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης επιβεβαιώνουν την ιδιαίτερη σημασία της φυσικής συναγωγής, και ελλείψει πειραματικών δεδομένων μπορούν να βοηθήσουν στην καλύτερη κατανόηση του φαινομένου αλλαγής φάσης σε κλειστές γεωμετρίες και εν τέλει στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των συστημάτων αποθήκευσης θερμικής ενέργειας για χρήση συνδυαστικά με ηλιακά συγκεντρωτικά συστήματα.

Λέξεις Κλειδιά: αποθήκευση θερμικής ενέργειας, υλικά αλλαγής φάσης, τήξη, υπολογιστική ρευστομηχανική, σφαιρική κοιλότητα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο πλαίσιο της μετάβασης στη χρήση ήπιων ενεργειακών μορφών, η αποθήκευση θερμικής ενέργειας μπορεί να αποτελέσει ένα καθοριστικό παράγοντα συνεισφοράς. Σε συνδυασμό με την εκμετάλλευση της ηλιακής θερμότητας, η αποθήκευση μπορεί να αυξήσει την αποδοτικότητα των αντίστοιχων συστημάτων και να βελτιώσει την χρονική ανακολουθία μεταξύ της ενεργειακής προσφοράς και ζήτησης [1]. Η αξιοποίηση της λανθάνουσας θερμότητας (ενθαλπία αλλαγής φάσης), μέσω της χρήσης των υλικών αλλαγής φάσης (phase change materials - PCM), αποτελεί μια πολύ ενδιαφέρουσα προσέγγιση στο πρόβλημα της αποθήκευσης και παράλληλα κεντρική ιδέα για την παρούσα εργασία.

Η χρήση των PCM ως αποθηκευτικά μέσα θερμικής ενέργειας σε συγκεντρωτικά θερμικά ηλιακά συστήματα έχει γίνει ευρέως διαδεδομένη τα τελευταία χρόνια, καθώς προσφέρει τα πλεονεκτήματα αφενός της μεγάλης ενεργειακής πυκνότητας και αφετέρου της αύξησης της ενεργειακής και εξεργειακής αποδοτικότητας των κύκλων παραγωγής ισχύος (π.χ Rankine, Kalina κλπ.). Ενώ οι περισσότερες εφαρμογές εστιάζουν στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας και αποθήκευσης για ηλεκτροπαραγωγή, μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η περιοχή των 'μεσαίων' θερμοκρασιών (100 - 250 °C). Στην περιοχή αυτή η ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε εφαρμογές παραγωγής ατμού για βιομηχανική κυρίως χρήση αλλά και παραγωγής ισχύος σε κύκλο Rankine με οργανικά ρευστά (Organic Rankine Cycle-ORC) [2].

Η σύγχρονη τάση που επικρατεί σχετικά με τη χρήση των υλικών αλλαγής φάσης, είναι η ενθουσιάζοντάς τους σε κλειστές κοιλότητες (κάψουλες) για την αποφυγή διαρροών. Στην περίπτωση των μακροκάψουλών (τάξη μεγέθους: cm), απαντώνται διάφορες γεωμετρικές κοιλοτήτων, με κυριότερες τις σφαιρικές, τις κυλινδρικές και τις ορθογωνικές [3]. Ειδικότερα, τα μακροενθουλακωμένα PCM σε σφαιρικές κάψουλες απαντώνται πολύ συχνά σε συστήματα αποθήκευσης σταθερής κλίνης (packed beds) ως πληρωτικό υλικό, καθώς παρουσιάζουν πλεονεκτήματα όπως σημειακή (ιδανικά) αγωγή με άλλες κάψουλες, μεγαλύτερο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας από το ρευστό προς αυτά κλπ.

Γενικά, η ροή στις σταθερές κλίνες αλλά και η θερμική αλληλεπίδραση της κάθε κάψουλας με το περιβάλλον της περιγράφεται επαρκώς από εμπειρικές σχέσεις που συναντώνται συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία. Αντιθέτως, η απορρόφηση/απόρριψη της θερμότητας από το PCM, η αλλαγή φάσης και η ροή φυσικής συναγωγής που δημιουργείται επιπέδονται αποκλίσεις στα αποτελέσματα, καθώς οι σχέσεις που συνήθως χρησιμοποιούνται βασίζονται σε απλούστερα μοντέλα αγωγής θερμότητας που δεν περιγράφουν πλήρως ένα τόσο πολύπλοκο πρόβλημα. Συνεπώς η χρήση αριθμητικών μεθόδων και ειδικότερα της υπολογιστικής ρευστομηχανικής για την προσομοίωση του φαινομένου και την εξαγωγή των κατάλληλων συσχετίσεων αποτελεί ένα αναγκαίο εργαλείο στη μελέτη της αλλαγής φάσης σε κλειστές κοιλότητες για αποθήκευση ενέργειας.

Η τήξη και η στερεοποίηση ενός PCM μέσα σε μια κλειστή κοιλότητα μπορεί να χαρακτηριστεί ως πρόβλημα 'κινούμενων ορίων' (moving boundary problem) στην ορολογία της υπολογιστικής ρευστομηχανικής. Εναλλακτικά ονομάζονται και 'προβλήματα Stefan' (Stefan problems) από το όνομα του Josef Stefan, που μελέτησε πρώτος εκτεταμένα τα προβλήματα κινούμενων διεπιφανειών που διέπονται από ανταλλαγή λανθάνουσας θερμότητας στα όρια, με χρήση μερικών διαφορικών εξισώσεων. Τα τελευταία χρόνια, με τη ραγδαία εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων αλλά και των αλγορίθμων αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων των φαινομένων μεταφοράς, αρκετοί ερευνητές ασχολήθηκαν με την μελέτη του προβλήματος αλλαγής φάσης σε σφαιρικές κοιλότητες.

Ειδικότερα, μια από τις πρώτες ολοκληρωμένες προσπάθειες ήταν η μελέτη των Moore and Bayazitoglu [4], που μελέτησαν τη μη χωρικά περιορισμένη τήξη (unconstrained melting) ενός PCM με σημείο τήξης στην περιοχή των χαμηλών θερμοκρασιών ($T_m < 100$ °C) χρησιμοποιώντας πεπερασμένες διαφορές και διαφορετικές πυκνότητες για το στερεό και το υγρό PCM. Από την ανάλυση προέκυψε ότι για χαμηλούς αριθμούς Stefan ($Ste < 0.1$) τα αριθμητικά αποτελέσματα συμφωνούν αρκετά ικανοποιητικά με τα πειραματικά σε σχέση με τη θέση στο χώρο του μετώπου αλλαγής φάσης – διεπιφάνεια στερεού-ρευστού. Οι Roy and

Sengupta [5] μελέτησαν επίσης αριθμητικά την επίδραση της φυσικής συναγωγής λόγω διαφοράς πυκνότητας στην τήξη και έδειξαν ότι η ροή στο άνω μέρος της κοιλότητας είναι ψευδομόνιμη. Οι Khodadadi and Zhang [6] στην υπολογιστική μελέτη τους, έδειξαν ότι η ροή λόγω φυσικής συναγωγής στο τήγμα επιταχύνει την τήξη του υλικού σε σχέση με την απλή θεώρηση της αγωγής και ότι ο αριθμός Prandtl επιδρά στο φαινόμενο αυτό. Ο Tan [7] μελέτησε πειραματικά αμφότερες τις περιπτώσεις της τήξης σε σφαιρική κοιλότητα (χωρικά περιορισμένη και μη) και παρατήρησε στην δεύτερη περίπτωση ότι το άνω μισό μέρος της σφαίρας λιώνει γρηγορότερα από το αντίστοιχο κάτω, λόγω της φυσικής συναγωγής. Οι Rizanetal [8] με την πειραματική τους εργασία σε σφαιρική κοιλότητα με μια παραφίνη ως PCM έδειξαν ότι και ο αριθμός Stefan επιδρά στην δυναμική του φαινομένου της τήξης. Τέλος, οι Archiboldetal [9] μελετώντας υπολογιστικά την τήξη του NaNO_3 ως PCM σε σφαιρική επίσης κάψουλα εξήγαγαν συσχετίσεις για τη δυναμική του φαινομένου της τήξης σε σχέση με τους αντίστοιχους αδιάστατους αριθμούς Grashof, Prandtl και Stefan.

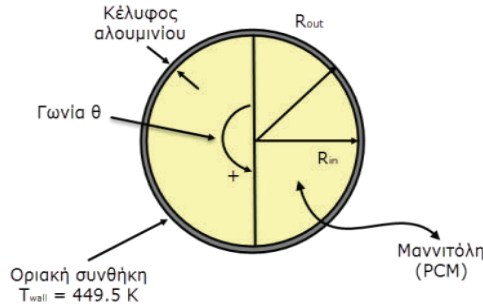
Έχοντας λοιπόν υπόψη όλα τα παραπάνω, στην παρούσα εργασία εξετάζεται η περίπτωση της σακχαροαλκοόλης (sugaralcohol) 'μαννιτόλη' (D-mannitol – $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_6$) ως PCM, καθώς διαθέτει, αφενός σημείο τήξης στην περιοχή ενδιαφέροντος των μεσαίων θερμοκρασιών και αφετέρου επιθυμητά χαρακτηριστικά για χρήση ως αποθηκευτικό μέσο (υψηλή ενθαλπία τήξης, χαμηλό κόστος, μη τοξικότητα κλπ.) [10]. Ειδικότερα, μελετάται η τήξη της σε σφαιρική κλειστή κοιλότητα με χρήση υπολογιστικής ρευστομηχανικής (computational fluid dynamics-CFD) μέσω του κώδικα ANSYS Fluent για την προσομοίωση της διεργασίας αλλαγής φάσης. Η πρωτοτυπία της παρούσας προσέγγισης έγκειται στο ότι μελετάται για πρώτη φορά, όπως διαπίστωσαν οι συγγραφείς μετά από εκτεταμένη έρευνα της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, η τήξη σε υλικά στην περιοχή των μεσαίων θερμοκρασιών. Επίσης οι θερμοφυσικές ιδιότητες του PCM δεν θεωρούνται σταθερές αλλά μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία, σε αντίθεση με τη συνήθη τακτική πχ. προσέγγιση Boussinesq μόνο για την πυκνότητα.

2. ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΑΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ

Μια σφαιρική κάψουλα αλουμινίου (Al) εσωτερικής ακτίνας $R_{in}=25$ mm και πάχους κελύφους 0.5 mm γεμίζεται πλήρως με καθαρή μαννιτόλη (εικόνα 1). Το υλικό βρίσκεται αρχικά σε θερμοκρασία 439 K, δηλαδή σε στερεά κατάσταση, και τη χρονική στιγμή $t=0$ η κάψουλα εκτίθεται σε περιβάλλον σταθερής θερμοκρασίας $T_{wall}=449.5$ K, που είναι μεγαλύτερη του σημείου τήξης του PCM, στην εξωτερική επιφάνεια. Συνεπώς, μεταφέρεται θερμότητα από περιβάλλον σταθερής θερμοκρασίας στο κέλυφος και μέσω αυτού με αγωγή στο PCM και ξεκινά η τήξη του με τη δημιουργία μιας κινούμενης διεπιφάνειας στερεού -ρευστού. Καθώς συνεχίζεται η διεργασία αλλαγής φάσης, το υγρό μέρος του PCM καταλαμβάνει το χώρο στο άνω κομμάτι της σφαίρας ενώ το στερεό μέρος, λόγω διαφοράς πυκνότητας βυθίζεται στο κάτω μέρος. Αποτέλεσμα αυτών των επιδράσεων είναι η πρόκληση ροής λόγω φυσικής συναγωγής στο τήγμα. Ενώ όμως το στερεό βυθίζεται, λόγω βαρυτικής επίδρασης, προκαλεί στο σημείο επαφής με υγρό υμένιο που το περιβάλλει μια ενισχυμένη 'τήξη λόγω επαφής' (contactmelting), φαινόμενο που ενισχύει περισσότερο τη ροή λόγω φυσικής συναγωγής. Τελικά η διεργασία συνεχίζεται μέχρις ότου να υγροποιηθεί όλη η ποσότητα του στερεού PCM.

Για την επίλυση του προβλήματος είναι απαραίτητο να γίνουν κάποιες παραδοχές. Ειδικότερα θεωρήθηκε ότι: (i) Η ροή είναι συμμετρική ως προς την οριζόντια γωνία ϕ του σφαιρικού συστήματος συντεταγμένων και γι' αυτό χρησιμοποιούμε δισδιάστατο μοντέλο (r, θ) επίπεδης όψης (2D planar). (ii) Η υγρή και η στερεή φάση θεωρούνται ομογενείς και ισότροπες. (iii) Δεν λαμβάνεται υπόψη η μεταβολή του όγκου λόγω αλλαγής φάσης. (iv) Η υγρή φάση θεωρείται νευτωνικό ρευστό και η ροή σε αυτή στρωτή και ασυμπίεστη χωρίς διάχυση λόγω συνεκτικότητας (viscous dissipation). (v) Η μεταφορά θερμότητας λόγω ακτινοβολίας θεωρείται αμελητέα. (vi) Για τον υπολογισμό των αδιάστατων παραμέτρων, οι θερμοφυσικές ιδιότητες του υλικού υπολογίζονται στην θερμοκρασία αναφοράς $T_{ref} = (T_{wall} + T_{melt}) / 2 = 444$ K. (vii) Η αλλαγή φάσης λαμβάνει χώρα στο διάστημα θερμοκρασιών μεταξύ

439 – 439.5 K. (viii). Μεταξύ των περιοχών υγρού και στερεού υπάρχει μια πολτώδης περιοχή (mushy zone) όπου οι δύο φάσεις συνυπάρχουν. Στην πολτώδη ζώνη, η μετάβαση των θερμοφυσικών ιδιοτήτων από τη μία φάση στην άλλη, ακολουθεί γραμμική κατανομή. Η χρήση των παραπάνω παραδοχών διευκολύνει τους υπολογισμούς που απαιτούνται για την επίλυση του προβλήματος, χωρίς να επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια της λύσης, όπως φαίνεται και από τη διεθνή βιβλιογραφία [5], [6], [9].



Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση του χώριου επίλυσης

Δεδομένων των παραδοχών που προαναφέρθηκαν, οι εξισώσεις που επιλύονται είναι:

$$\text{Η εξίσωση διατήρησης της μάζας} \rightarrow \frac{D\rho}{Dt} = 0 \quad (1)$$

$$\text{Η εξίσωση διατήρησης της ορμής} \rightarrow \frac{D(\rho v)}{Dt} = -\nabla p + \rho g + \nabla \cdot \underline{\tau} + S_1 \quad (2)$$

$$\text{Η εξίσωση διατήρησης ενέργειας} \rightarrow \frac{D(\rho H)}{Dt} = \nabla(k \cdot \nabla T) - S_2 \quad (3)$$

Ειδικότερα, στην εξίσωση διατήρησης της ενέργειας χρησιμοποιείται ως μεταβλητή η ειδική ενθαλπία H που αποτελείται από την αισθητή ενθαλπία (λόγω διαφοράς θερμοκρασίας) και την ενθαλπία αλλαγής φάσης $H = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p \cdot dT + \gamma \cdot \Delta h_{fus}$, όπου γ είναι το 'κλάσμα ρευστού'

$$\left[\begin{array}{l} \gamma = 0 \text{ αν } T < T_{sol} \\ \gamma = 1 \text{ αν } T > T_{liq} \\ \gamma = \frac{T - T_{sol}}{T_{liq} - T_{sol}} \text{ αν } T_{sol} < T < T_{liq} \end{array} \right]$$

(liquidfraction) και ορίζεται ως:

Επίσης, στην εξίσωση (2) έχει προστεθεί και ένας όρος πηγής $S_1 = \frac{C_{m.z.}(1-\gamma)^2}{\gamma^3 + \varepsilon} \cdot v_r$, ο οποίος

είναι τύπου Darcy για να αποδοθεί έτσι η επίδραση της αλλαγής φάσης στην συναγωγή μέσω του μοντέλου ενθαλπίας – πορώδους μέσου που χρησιμοποιείται για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων, ενώ στην εξίσωση (3) χρησιμοποιείται ο όρος

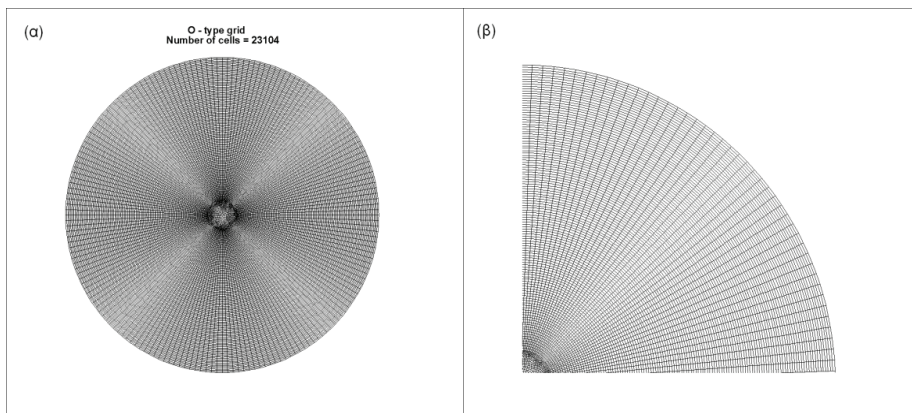
πηγής $S_2 = \frac{D(\rho \cdot \Delta h_{fus})}{Dt}$ [11], [12]. Οι αρχικές συνθήκες του προβλήματος είναι $u_r = u_\theta = 0$ και

$T(r, \theta, 0) = 439 \text{ K}$. Οι οριακές συνθήκες στον εξωτερικό τοίχο είναι $T(R, \theta, t) = T_{wall}$ ενώ στον

εσωτερικό τοίχο $k_s \cdot \frac{\partial T_s}{\partial r} \Big|_{r=R_i} = k_{PCM} \cdot \frac{\partial T_{PCM}}{\partial r} \Big|_{r=R_i}$ και $u_r(R_i, \theta, t) = u_\theta(R_i, \theta, t) = 0$.

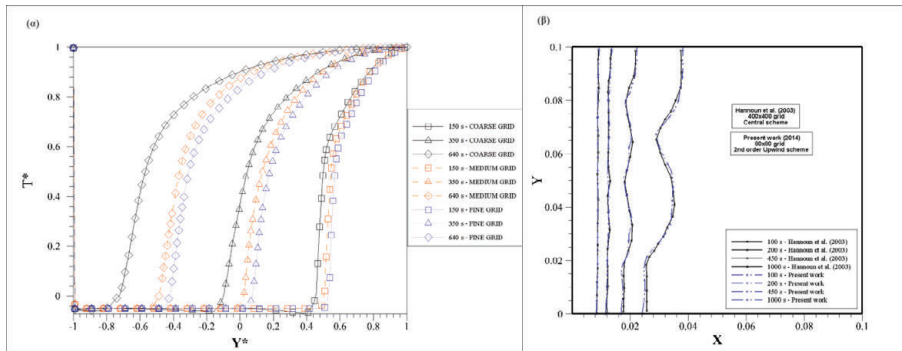
Για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων χρησιμοποιήθηκε ο εμπορικός κώδικας ANSYSFluent.14. Ο κώδικας αυτός επιλύει με τη μέθοδο των πεπερασμένων όγκων (finite volume method) κάνοντας χρήση του αλγορίθμου SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) για τη επίλυση της πίεσης. Η διακριτοποίηση των όρων συναγωγής έγινε με το σχήμα δεύτερης τάξης ανάντι διαφορών (second order upwind scheme) και για τη διόρθωση της πίεσης έγινε χρήση του σχήματος PRESTO (Pressure Staggering Option). Η χρονική διακριτοποίηση έγινε με ένα φραγμένο σχήμα δεύτερης τάξης (bounded second order scheme) με σκοπό να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια στα ενδιάμεσα στάδια της μεταβατικής ροής (transient flow). Η σύγκλιση (convergence) των αποτελεσμάτων ελεγχόταν ανα χρονικό βήμα με κριτήρια τα ολικά σταθμισμένα υπόλοιπα (global scaled residuals) 10^{-4} για την εξίσωση συνέχειας, 10^{-3} για τις εξισώσεις ορμής και 10^{-6} για την εξίσωση ενέργειας. Οι συντελεστές υποχαλάρωσης (under-relaxation factors) των μεταβλητών προς επίλυση που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 0.6 για την πίεση, 0.6 για τις ταχύτητες, 0.5 για το κλάσμα υγρού και 0.9 για την ενθαλπία. Για την σταθερή παράμετρο μορφής $C_{m,z}$ της πολτώδους ζώνης (mushy zone constant) επιλέχθηκε η τιμή 10^4 [9], ενώ το χρονικό βήμα ορίστηκε σε 0.01 s.

Το υπολογιστικό πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε, αποτελείται από 23100 στοιχεία περίπου και έχει διάταξη O-grid με σκοπό την επίτευξη καλύτερης ποιότητας στοιχείων. Ειδικότερα, αποτελείται από 2 χωρία που ορίζονται από 2 ομόκεντρους κύκλους, όπου το ένα εξ αυτών είναι ένας δακτύλιος δομημένου πλέγματος (structured grid) και ένας εσωτερικός κυκλικός δίσκος μη δομημένου πλέγματος (unstructured grid), όπως φαίνεται και στην εικόνα 2. Αφού έγινε συγκριτική μελέτη 3 πλεγμάτων των 13990, 23100 και 30500 στοιχείων, επιλέχθηκε το δεύτερο πλέγμα (με 23100 στοιχεία) καθώς η περαιτέρω πύκνωση επέφερε μικρή μεταβολή στα αποτελέσματα συγκριτικά με τον επιπλέον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται για πιο πυκνά πλέγματα (εικόνα 3α).



Εικόνα 2: (α) Πλήρες υπολογιστικό πλέγμα (β) Λεπτομέρεια του πλέγματος

Αφού έγινε συγκριτική μελέτη 3 πλεγμάτων των 13990, 23100 και 30500 στοιχείων, επιλέχθηκε το δεύτερο πλέγμα (με 23100 στοιχεία) καθώς η περαιτέρω πύκνωση επέφερε μικρή μεταβολή στα αποτελέσματα συγκριτικά με τον επιπλέον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται για πιο πυκνά πλέγματα (εικόνα 3α). Με αυτά τα χαρακτηριστικά ως δεδομένα, η πλήρης επίλυση του προβλήματος χρειάστηκε περίπου 7 ημέρες υπολογιστικού χρόνου. Η επικύρωση του υπολογιστικού κώδικα σε προβλήματα αλλαγής φάσης πραγματοποιήθηκε συγκρίνοντας τα αποτελέσματά μας με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τη μελέτη των Hannoun et al [13] για τήξη κασσίτερου σε τετραγωνική κοιλότητα, που θεωρείται και πρόβλημα αναφοράς (benchmark) για προβλήματα αλλαγής φάσης (εικόνα 3β).



Εικόνα 3: (α) Σύγκριση αποτελεσμάτων για την ανεξαρτησία του πλέγματος βάσει της κατανομής της αδιάστατης θερμοκρασίας T^* κατά μήκος της κατακόρυφης αδιάστατης διαμέτρου (β) Σύγκριση με αποτελέσματα αναφοράς [13] για επικύρωση του κώδικα

Οι θερμοφυσικές ιδιότητες της μαννιτόλης παρουσιάζονται στον πίνακα 1 που ακολουθεί. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι στη βιβλιογραφία παρουσιάζεται έλλειψη δεδομένων για τις θερμοφυσικές ιδιότητες της μαννιτόλης κοντά στο σημείο τήξης της ($T_{\text{melt}} = 439.5 \text{ K}$) αλλά και για το πώς οι ιδιότητες αυτές μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία. Συνεπώς, ελλείψει αυτών των στοιχείων, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τη σορβιτόλη (sorbitol) [14], που είναι στερεοϊσομερές της μαννιτόλης. Η παραδοχή που έγινε ήταν ότι λόγω της στερεοϊσομερείας των 2 ουσιών, τα μοτίβα της αλλαγής των θερμοφυσικών ιδιοτήτων συναρτήσει της θερμοκρασίας, δηλαδή οι σχέσεις $X = f(T)$ με X την εκάστοτε ιδιότητα, είναι κοινά και για τις 2 ουσίες. Η εφαρμογή των μεταβλητών ιδιοτήτων στον κώδικα έγινε μέσω χρήσης εξωτερικών υπορουτινών σε γλώσσα C (user defined functions - UDFs).

Πίνακας 1: Ιδιότητες των υλικών

Θερμοφυσικές Ιδιότητες	Μαννιτόλη (D-mannitol)	Αλουμίνιο (Aluminum)
Πυκνότητα (ρ) [kg/m^3]	$\rho_{\text{liq}} = 0.3772 \cdot 0.2288^{-\left(1 - \frac{T}{959}\right)^{0.21731}}$ $\rho_{\text{m.z.}} = (-234 * T) + 104215$ $\rho_{\text{sol}} = 1489$	2719
Δυναμικό ιξώδες (μ) [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	$\mu = \exp\left(-10.185 + \frac{3978}{T} - 1.2798 * \ln T\right)$	-
Ενθαλπία τήξης (Δh_{fus}) [J/kg]	$\Delta h_{\text{fus}} = 233000$	-
Ειδική θερμότητα (c_p) [$\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$]	$c_p = -6.695 + (1.0042 * T) + (-7.9252 * 10^{-4} * T^2)$ $+ (2.0507 * 10^{-7} * T^3) + (3.0979 * 10^{-11} * T^4)$	871
Συντελεστής θερμικής διαστολής (β) [$1/\text{K}$]	$\beta = 5.4 * 10^{-4}$	-
Θερμική αγωγιμότητα (k) [$\text{W/(m}\cdot\text{K)}$]	$k_{\text{liq}} = 0.1603 + (-1.3031 * 10^{-4} * T)$ $k_{\text{m.z.}} = (-0.334 * T) + 146.896$ $k_{\text{sol}} = 0.27$	202.4

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

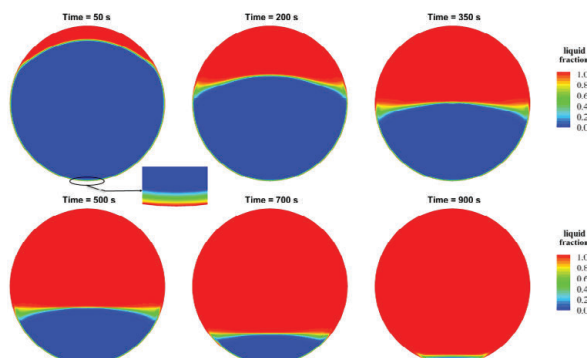
Για τη παρουσίαση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκαν αδιάστατοι αριθμοί που χαρακτηρίζουν τη ροή και τη μεταφοράς θερμότητας. Ορίζονται ως εξής:

Πίνακας 2: Αδιάστατοι αριθμοί

Αδιάστατος αριθμός	Τύπος	Αδιάστατος αριθμός	Τύπος
Grashof	$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{wall} - T_{melt}) \cdot R^3}{\nu^2}$	γ^*	$\gamma^* = \frac{Y}{R}$
Archimedes	$Ar = \frac{\rho_{liq} \cdot g \cdot (\rho_{sol} - \rho_{liq}) \cdot R^3}{\mu^2}$	T^*	$T^* = \frac{T - T_{melt}}{T_{wall} - T_{melt}}$
Prandtl	$Pr = \frac{c_{p-liq} \cdot \mu}{k_{liq}}$	γ	$\gamma = 1 - \frac{V_{sol}}{V_{total}}$
Stefan	$Ste = \frac{c_{p-liq} \cdot (T_{wall} - T_{melt})}{\Delta h_{fus}}$	Nusselt	$Nu = \frac{h \cdot R}{k_{liq}}$

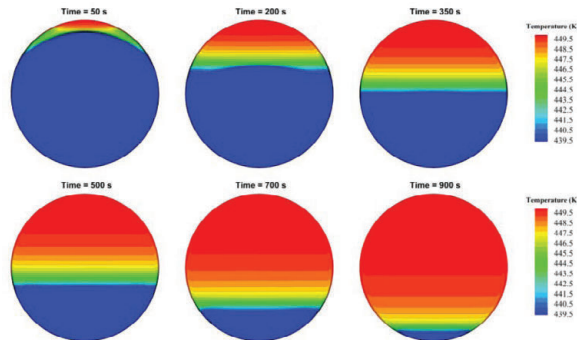
Οι τιμές των σταθερών αδιάστατων παραμέτρων για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις είναι: $Gr = 1.09 \times 10^8$, $Ar = 1.8 \times 10^9$, $Pr = 1.92$, $Ste = 0.071$. Οι ισούψεις καμπύλες (contours) της διεπιφάνειας στερεού – υγρού, των κλασμάτων υγρού και της θερμοκρασίας για διάφορες χρονικές στιγμές, παρουσιάζονται στις εικόνες που ακολουθούν.

Συγκεκριμένα, στην εικόνα 4 παρουσιάζεται η θέση της διεπιφάνειας υγρού-στερεού και τα αντίστοιχα κλάσματα (υγρού και στερεού) σε διάφορες χρονικές στιγμές. Όπως παρατηρούμε, το μέτωπο αλλαγής φάσης έχει τη μορφή μιας κυρτής καμπύλης, η οποία τείνει να γίνει ευθεία προς το τέλος της διεργασίας. Επίσης, επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα η κίνηση του στερεού κλάσματος προς τον πυθμένα της κάψουλας, λόγω διαφοράς των πυκνοτήτων υγρού-στερεού. Το γεγονός αυτό δημιουργεί ένα λεπτό φιλμ υγρού ανάμεσα στο στερεό και το τοίχωμα που επιταχύνει την τήξη και ονομάζεται «τήξη λόγω επαφής» (contactmelting).

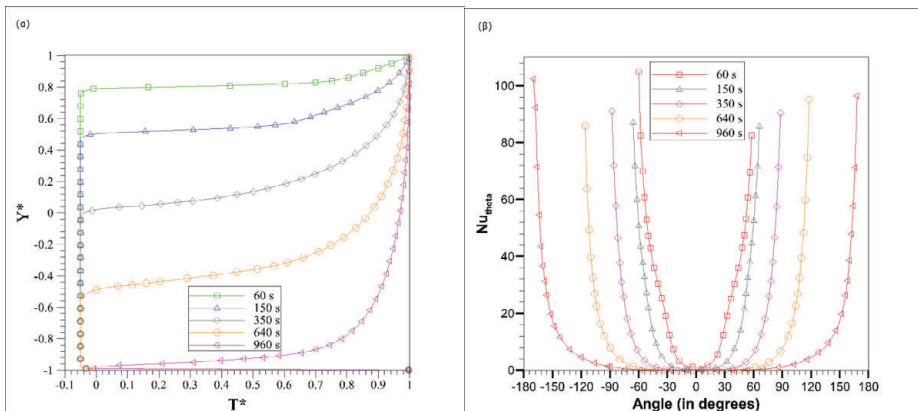


Εικόνα 4: Κίνηση του μετώπου κατά την εξέλιξη του φαινομένου με λεπτομέρεια

Από τις πρώτες κιόλας χρονικές στιγμές, γίνεται αντιληπτό ότι η φυσική συναγωγή επηρεάζει την εξέλιξη του φαινομένου. Αυτό φαίνεται καθαρά από τις ισοϋψείς καμπύλες της θερμοκρασίας, οι οποίες ειδικά στους αρχικούς χρόνους αποκλίνουν αρκετά από την αναμενόμενη συμπεριφορά στην περίπτωση που η αγωγή ήταν κυρίαρχη. Ειδικότερα, σε μια τέτοια περίπτωση θα αναμέναμε ότι οι ισοϋψείς της θερμοκρασίας θα ήταν ομόκεντροι κύκλοι, γεγονός που απέχει αρκετά από τα αποτελέσματα που ελήφθησαν και φαίνονται στην εικόνα 5.



Εικόνα 5: Ισοϋψείς καμπύλες θερμοκρασίας σε διάφορες χρονικές στιγμές



Εικόνα 6: (α) Κατανομή της αδιάστατης θερμοκρασίας T^* κατά μήκος της κατακόρυφης αδιάστατης διαμέτρου (β) Κατανομή του τοπικού αριθμού Nusselt πάνω στην κυκλική επιφάνεια του ορίου

Σχετικά με τη δυναμική του φαινομένου, αυτό που παρατηρούμε λοιπόν είναι μια διαστρωματωμένη ροή που εξελίσσεται βαθμιαία και το συμπέρασμα αυτό επιβεβαιώνεται και από την κατανομή της θερμοκρασίας πάνω σε μια κατακόρυφη διάμετρο του κύκλου, όπως φαίνεται και στην εικόνα 6α. Ειδικότερα, στις πρώτες χρονικές στιγμές που το κλάσμα του τηγμένου PCM είναι μικρό, παρατηρείται μια έντονη κλίση της θερμοκρασίας στο άνω μέρος της κάψουλας (για $Y^* > 0.8$ τη χρονική στιγμή $t=60$ s), η οποία σταδιακά μειώνεται τείνοντας στην πλήρη διαστρωμάτωση προς το τέλος της διεργασίας αλλαγής φάσης ($t=960$ s).

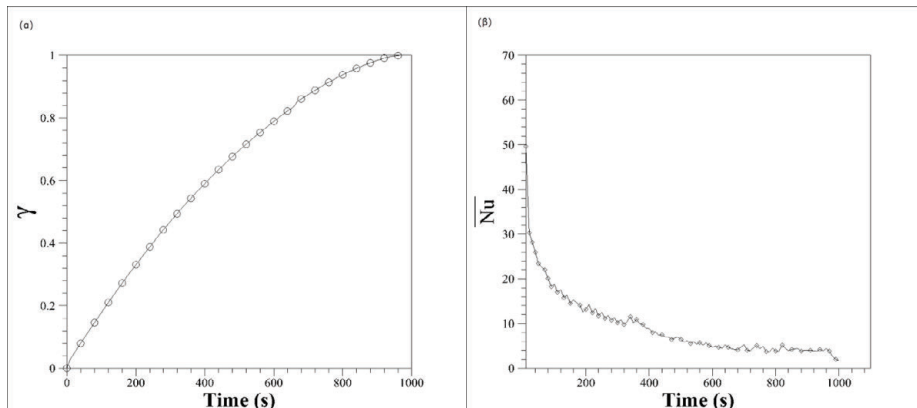
Επίσης εξετάζοντας την κατανομή του τοπικού αριθμού Nusselt πάνω στην κυκλική επιφάνεια (εικόνα 6β) παρατηρούμε τα αποτελέσματα της εξελισσόμενα διαστρωματωμένης

ροής κατά την διάρκεια της τήξης. Συγκεκριμένα, στις αρχικές χρονικές στιγμές ($t=60$ s) το πλάτος ελάχιστων τιμών του τοπικού Nusselt έχει μικρό εύρος (περίπου 20 μοίρες) ενώ το εύρος αυτό αυξάνεται όσο εξελίσσεται το φαινόμενο ξεπερνώντας στο τέλος τις 240 μοίρες για $t=960$ s. Ο ελάχιστος τοπικός Nusselt εμφανίζεται αρχικά μόνο κοντά στις 0 μοίρες (δηλαδή στην κατακόρυφη διάμετρο) και στη συνέχεια σε όλο και μεγαλύτερο εύρος γωνιών.

Ο συνολικός χρόνος που απαιτήθηκε για την πλήρη τήξη του PCM στην κάψουλα ήταν $t_{melt}=970$ σπερίπου. Η τιμή αυτή βρίσκεται πολύ κοντά στον αντίστοιχα υπολογιζόμενο χρόνο ολοκλήρωσης του φαινομένου από αντίστοιχες σχέσεις που συναντώνται στη

βιβλιογραφία [15] $t_{melt} = 2.03 \cdot \left(\frac{R^2}{Ste \cdot \alpha} \right) \cdot \left(\frac{\rho_{sol}}{\rho_{liq}} \right) \cdot \left(\frac{Ste}{Pr \cdot Ar} \right)^{\frac{1}{4}}$. Ειδικότερα, η τιμή που προκύπτει

από τη συσχέτιση των Bahrami and Wang είναι $t=916$ s και συνεπώς η απόκλιση είναι της τάξης του 6% και κρίνεται ικανοποιητική. Στην εικόνα 7α φαίνεται και διαγραμματικά η εξέλιξη της τήξης ως προς το χρόνο, εκφρασμένη ως κλάσμα ρευστού συναρτήσει της χρονικής διάρκειας του φαινομένου, ενώ στην 7β παρουσιάζεται η χρονική διακύμανση του μέσου αριθμού Nusselt. Δεδομένης της απουσίας πειραματικών μετρήσεων για την τήξη υλικών στο εύρος των ιδιοτήτων της μαννιτόλης (Prandtl, Grashof κλπ.), η συμφωνία των απαιτούμενων χρόνων τήξης μας δίνει μια εικόνα ότι η προσομοίωση είναι κατ' αρχήν ρεαλιστική.



Εικόνα 7: (α) Κλάσμα υγρού και (β) Μέσος Αριθμός Nusselt συναρτήσει του χρόνου

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία ερευνηθήκε υπολογιστικά η τήξη της μαννιτόλης ως PCM σε κλειστή σφαιρική κοιλότητα. Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του φαινομένου αλλαγής φάσης καταδεικνύουν ότι η φυσική συναγωγή γίνεται σημαντικός παράγοντας στη μεταφορά θερμότητας και δεν μπορεί να αγνοηθεί. Ειδικότερα, από τις πρώτες κιόλας χρονικές στιγμές παρατηρείται απόκλιση από την συμπεριφορά λόγω αγωγής, γεγονός το οποίο γίνεται περισσότερο εμφανές όσο το φαινόμενο εξελίσσεται. Η κατανομή της θερμοκρασίας στο τήγμα τείνει να γίνει διαστρωματωμένη και συνεπώς η κλίση της θερμοκρασίας αντίστοιχα μειώνεται με το πέρασμα του χρόνου. Συμπερασματικά, η ροή λόγω φυσικής συναγωγής εμφανίζεται στο άνω τμήμα της σφαίρας και τείνει να αυξήσει τοπικά τη μεταφορά θερμότητας και εν γένει τον ρυθμό τήξης του PCM, κατά βάση στις αρχικές χρονικές στιγμές. Ελλείψει αντίστοιχων πειραματικών μετρήσεων, η προσομοίωση αυτή αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση στην μελέτη της αλλαγής φάσης κατάλληλων υλικών αποθήκευσης για μεσαίες θερμοκρασίες.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ο 1^{ος} συγγραφέας, Κ. Αρβανίτης, επιθυμεί να εκφράσει τις ευχαριστίες του προς την επιχείρηση Nobel Ξυλινάκης Δ. & Σια ΕΕ για την υποστήριξη στην εκπόνηση της διδακτορικής του διατριβής, μέρος της οποίας αποτελεί η παρούσα εργασία. Οι προσομοιώσεις με το λογισμικό ANSYS Fluent v.14 πραγματοποιήθηκαν κάνοντας χρήση της υπολογιστικής υποδομής Cloud Computing του ΕΜΠ. Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν το προσωπικό του Υπολογιστικού Κέντρου του ΕΜΠ για την παροχή αποθηκευτικού χώρου δεδομένων καθώς και τεχνικής βοήθειας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Regin, a. F., Solanki, S. C., and Saini, J. S., 2008, "Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **12**(9), pp. 2438–2458.
- [2] Kuravi, S., Trahan, J., Goswami, D. Y., Rahman, M. M., and Stefanakos, E. K., 2013, "Thermal energy storage technologies and systems for concentrating solar power plants," *Prog. Energy Combust. Sci.*, **39**(4), pp. 285–319.
- [3] Mehling, H., and Cabeza, L., 2008, *Heat and cold storage with PCM*, Springer, Berlin.
- [4] Moore, F. E., and Bayazitoglu, Y., 1982, "Melting Within a Spherical Enclosure," *J. Heat Transfer*, **104**(2), pp. 19–23.
- [5] Roy, S., and Sengupta, S., 1987, "The melting process within spherical enclosures," *J. Heat Transfer*, **109**(2), pp. 460–462.
- [6] Khodadadi, J., and Zhang, Y., 2001, "Effects of buoyancy-driven convection on melting within spherical containers," *Int. J. Heat Mass Transf.*, **44**, pp. 1605–1618.
- [7] Tan, F., 2008, "Constrained and unconstrained melting inside a sphere," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, **35**, pp. 466–475.
- [8] Rizan, M. Z. M., Tan, F. L., and Tso, C. P., 2012, "An experimental study of n-octadecane melting inside a sphere subjected to constant heat rate at surface," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, **39**(10), pp. 1624–1630.
- [9] Archibold, A. R., Rahman, M. M., Goswami, D. Y., and Stefanakos, E. K., 2014, "Analysis of heat transfer and fluid flow during melting inside a spherical container for thermal energy storage," *Appl. Therm. Eng.*, **64**, pp. 396–407.
- [10] Solé, A., Neumann, H., Niedermaier, S., Martorell, I., Schossig, P., and Cabeza, L. F., 2014, "Stability of sugar alcohols as PCM for thermal energy storage," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **126**, pp. 125–134.
- [11] Brent, A., Voller, V., and Reid, K., 1988, "Enthalpy-Porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: Application to the melting of a pure metal," *Numer. Heat Transf.*, **13**, pp. 297–318.
- [12] Voller, V. R., and Swaminathan, C. R., 1991, "General Source-Based Method for Solidification Phase Change," *Numer. Heat Transf. Part B Fundam.*, **19**(2), pp. 175–189.
- [13] Hannoun, N., Alexiades, V., and Mai, T., 2005, "A reference solution for phase change with convection," *Int. J. Numer. Methods Fluids*, **48**, pp. 1283–1308.
- [14] Yaws C., 2003, *Handbook of Thermodynamic and Physical Properties of Chemical Compounds*, Knovel, New York, USA.
- [15] Bahrami, P., and Wang, T., 1987, "Analysis of gravity and conduction-driven melting in a sphere," *J. Heat Transfer*, **109**, pp. 806–809.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (ΥΑΦ)

Μ. Σταματιάδου*, Δ. Κατσουρίνης, Γ. Κλουσάκου, Ι. Μανδηλαράς, Γ. Ζαννής, Μ. Φούντη

*Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
15780, Αθήνα, e-mail: mstam@central.ntua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μια πιλοτική δώροφη μονοκατοικία κατασκευάστηκε στο Στάνο Αμφιλοχίας στις εργοστασιακές εγκαταστάσεις της εταιρείας KNAUF Γυψοποιία ΑΒΕΕ. Η κατασκευή φέρει χαλύβδινο σκελετό, ειδικά σχεδιασμένο να αντέχει σε σεισμικές δονήσεις. Η τοιχοποιία κατά βάση αποτελείται από ένα σύστημα γυψοσανίδων με ενσωματωμένα Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ) και θερμομόνωση. Η ενσωμάτωση των ΥΑΦ στα δομικά στοιχεία ενός κτιρίου οδηγεί υπό προϋποθέσεις σε αποθήκευση θερμικής ενέργειας, αύξηση της θερμικής μάζας των τοιχωμάτων και εμφάνιση υψηλών τιμών θερμοχωρητικότητας. Γενικά, η ενσωμάτωση των ΥΑΦ σε δομικά υλικά, επιφέρει ομαλότερες διακυμάνσεις στις εσωτερικές θερμοκρασίες χώρων και συνεισφέρει στη δημιουργία συνθηκών άνεσης. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται μείωση των καταναλώσεων ενέργειας, μέσω αντίστοιχης μείωσης των ψυκτικών ή / και των θερμικών φορτίων. Η θερμική συμπεριφορά της πρότυπης μονοκατοικίας παρακολουθείται και αξιολογείται διαρκώς από το τέλος του 2010 μέχρι σήμερα. Αισθητήρες θερμοκρασίας και ροής θερμότητας έχουν εγκατασταθεί σε διαφορετικές τοποθεσίες εντός και επί των στοιχείων της τοιχοποιίας καθώς επίσης στο πάτωμα και την οροφή κάθε δωματίου. Τα δεδομένα των μετρήσεων αποθηκεύονται κάθε 10 λεπτά και μπορούν να συλλεχθούν από απόσταση για περαιτέρω επεξεργασία. Το πρώτο μέρος της εργασίας, εστιάζει στη μελέτη των θερμικών χαρακτηριστικών της κατοικίας με βάση τις διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις θερμοκρασίας, δίνοντας παράλληλα έμφαση στον εντοπισμό της ενεργοποίησης, καθώς επίσης και στην αξιολόγηση της επίδρασης των ΥΑΦ στη θερμική συμπεριφορά του κελύφους της τοιχοποιίας. Παρουσιάζονται οι μέσες, μηνιαίες εσωτερικές θερμοκρασίες αέρα του σαλονιού και οι μέσες μηνιαίες τιμές του λόγου θερμοκρασιακών διακυμάνσεων της εσωτερικής προς την εξωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας (συντελεστής μείωσης, ΣΜ). Οι τιμές των παραπάνω μεγεθών παρουσιάζονται για τα έτη 2011 και του 2012. Αποδεικνύεται πώς για τις δεδομένες συνθήκες (το σπίτι παρέμεινε κλειστό και ακατοίκητο), η επίδραση των ΥΑΦ γίνεται εντονότερη την Άνοιξη και το Φθινόπωρο, ενισχύοντας τη θερμική μάζα της τοιχοποιίας και οδηγώντας σε μείωση του ΣΜ κατά 30-40%. Στο δεύτερο μέρος της εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα υπολογιστικής προσομοίωσης της πιλοτικής κατοικίας με τη χρήση ενός σύνθετου υπολογιστικού εργαλείου που αναπτύχθηκε στην πλατφόρμα του εμπορικού λογισμικού TRNSYS και επικοινωνεί με μια υπορουτίνα που αναπτύχθηκε στο MATLAB για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών των χρησιμοποιούμενων ΥΑΦ. Αποδεικνύεται ότι η ενεργοποίηση των ΥΑΦ οδηγεί σε μείωση των ψυκτικών φορτίων της οικίας κατά ένα μέσο όρο ίσο με 29%. Πραγματοποιείται επίσης παραμετρική μελέτη που αναδεικνύει την ανάγκη σωστής επιλογής ΥΑΦ σε σχέση με τις κλιματικές συνθήκες για τη μεγιστοποίηση του ενεργειακού οφέλους.

Λέξεις Κλειδιά: Υλικά αλλαγής φάσης, Αποθήκευση ενέργειας, Πειραματικές Μετρήσεις - Καταγραφή και επεξεργασία, Μοντέλα προσομοίωσης, Ενεργειακή προσομοίωση κτηρίου

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΥΛΙΚΑ ΑΛΛΑΓΗΣ ΦΑΣΗΣ (ΥΑΦ)

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το 40% της συνολικής ενέργειας της ΕΕ καταναλώνεται στον κτιριακό τομέα, εξετάζεται το ενδεχόμενο εξοικονόμησης σημαντικών ποσών ενέργειας μέσω της επιβολής κατάλληλων μέτρων. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, προωθούνται νέες - καινοτόμες τεχνολογίες, ανάμεσα στις οποίες είναι και τα υλικά με ενισχυμένες ή/και βελτιωμένες θερμικές ιδιότητες (είτε μονωτικά, είτε υλικά βελτίωσης θερμικής μάζας). Τα υλικά αυτά μπορούν να ενσωματωθούν εύκολα σε δομικά στοιχεία και κατ' επέκταση να χρησιμοποιηθούν σε μια σειρά νέων ή ανακαινισμένων, «ενεργειακά αποδοτικών κτιρίων».

Τα Υλικά Αλλαγής Φάσης (ΥΑΦ) ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία υλικών και χαρακτηρίζονται από την ιδιότητα τους να αλλάζουν φάση (τήξη και στερεοποίηση) εντός του θερμοκρασιακού εύρους εφαρμογής τους. Όταν, αυξανομένης της θερμοκρασίας, το υλικό λάβει τιμές μεγαλύτερες από το σημείο αλλαγής φάσης, τήκεται, με ταυτόχρονη απορρόφηση και αποθήκευση της λανθάνουσας θερμότητας που απαιτείται, για την αλλαγή της φάσης. Συνεπώς, όταν τα υλικά αυτά, ενσωματώνονται σε δομικά στοιχεία, οι τοίχοι αποθηκεύουν ενέργεια από τον ήλιο που εισέρχεται σε ένα δωμάτιο κατά τη διάρκεια της ημέρας, οδηγώντας σε χαμηλότερες μέγιστες θερμοκρασίες εσωτερικών χώρων. Αντιθέτως, όταν η θερμοκρασία, ελαττώνεται και καταλήγει σε τιμές μικρότερες του σημείου τήξης του ΥΑΦ (αυτό γίνεται το βράδυ), το υλικό στερεοποιείται εκ νέου και η αποθηκευμένη στη διάρκεια της ημέρας θερμότητα, απελευθερώνεται στον εσωτερικό χώρο. Μέσω της παραπάνω διαδικασίας, αναμένεται ότι η ενσωμάτωση των ΥΑΦ σε δομικά υλικά, δύναται να επιφέρει ομαλότερες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στους εσωτερικούς χώρους των υπό εξέταση κτιρίων και επομένως να συνεισφέρει στη δημιουργία συνθηκών άνεσης. Παράλληλα, στην περίπτωση αυτή, αναμένονται μειωμένες συνολικές καταναλώσεις ενέργειας, λόγω της αντίστοιχης μείωσης των θερμικών ή ψυκτικών φορτίων. Πολλές δημοσιεύσεις στη διεθνή βιβλιογραφία παρέχουν λεπτομερείς αναλύσεις σχετικά με τα κύρια χαρακτηριστικά των ΥΑΦ. Αξιολογούν τα οφέλη που άπτονται της εφαρμογής τους και εστιάζουν σε παρούσες και πιθανές μελλοντικές εξελίξεις που αφορούν στις ιδιότητες τους [1] – [6].

Στην παρούσα εργασία μελετάται τόσο πειραματικά, όσο και υπολογιστικά η ενεργειακή συμπεριφορά πρότυπης πιλοτικής οικίας που κατασκευάστηκε στην Αμφιλοχία και περιέχει ενσωματωμένες γυψοσανίδες με ΥΑΦ τόσο στους εξωτερικούς, όσο και στους εσωτερικούς τοίχους της.

2. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ ΑΜΦΙΛΟΧΙΑΣ

Η πιλοτική κατοικία στην Αμφιλοχία, κατασκευάστηκε στο πλαίσιο των χρηματοδοτούμενων από την Ευρωπαϊκή Ένωση προγραμμάτων (EE-NMP) I-SSB, MESSIB και FC-District [7-9]. Η οικία βρίσκεται στις εγκαταστάσεις της Knauf Γυψοποιία ABEE, στο Στάνο Αμφιλοχίας, και συνδυάζει καινοτόμα στοιχεία (ξηρά δόμηση με ΥΑΦ) με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τεχνολογίες αποθήκευσης.

Το πρότυπο σπίτι είναι ένα διώροφο κτίριο, με τυπική ελληνική αρχιτεκτονική (Εικόνα 1). Η συνολική θερμαινόμενη επιφάνειά του είναι 125 m². Στο ισόγειο υπάρχει μια κουζίνα, ένα γραφείο, ένα βοηθητικό δωμάτιο (για τις μηχανολογικές εγκαταστάσεις) και το σαλόνι, ενώ στον 1ο όροφο, βρίσκονται τα υπνοδωμάτια που χωρίζονται από το μπάνιο. Η κατασκευή περιλαμβάνει μεταλλικό σκελετό σε συνδυασμό με συστήματα ξηράς δόμησης για την τοιχοποιία. Οι εξωτερικοί τοίχοι του σπιτιού αποτελούνται από πολλά στρώματα και η διαστρωμάτωση τους φαίνεται στην Εικόνα 2. Οι εσωτερικοί τοίχοι αποτελούνται από δύο γυψοσανίδες 15 mm, ένα στρώμα 80 mm πετροβάμβακα και δύο γυψοσανίδες 15 mm.

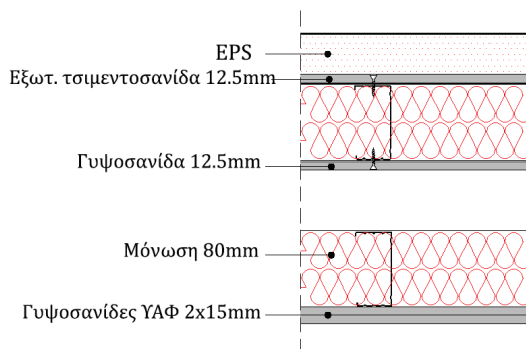
Η θέρμανση της οικίας επιτυγχάνεται μέσω αντλίας θερμότητας αέρα/νερού, η οποία συνδέεται με ενδοδαπέδιο σύστημα θέρμανσης. Για το δροσισμό χρησιμοποιείται η ίδια αντλία θερμότητας σε συνδυασμό με σύστημα δροσισμού οροφής. Για την θέρμανση και το δροσισμό χρησιμοποιούνται ενεργητικά αποθηκευτικά συστήματα, τα οποία συνδυάζουν το σύστημα γυψοσανίδων με σωληνώσεις νερού. Επιπλέον, ηλιοθερμικά συστήματα (ηλιακό

συλλέκτες και λέβητες) χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του ζεστού νερού χρήσης και υποστήριξη της λειτουργίας της αντλίας θερμότητας –αν αυτό χρειασθεί. Στην παρούσα μελέτη, η πιλοτική κατοικία εξετάζεται χωρίς τη χρήση των συστημάτων θέρμανσης ή ψύξης.



Εικόνα 1: Φωτογραφία της πιλοτικής κατοικίας στην Αμφιλοχία ολοκληρωμένο αλλά και στη φάση κατασκευής

Η γυψοσανίδα με ΥΑΦ που χρησιμοποιήθηκε στην πιλοτική οικία έχει εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας 21-26 °C, με θερμοκρασία αλλαγής φάσης στους 24 °C. Μια πιο λεπτομερή περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας προσδιορισμού της καμπύλης ενθαλπίας των χρησιμοποιούμενων ΥΑΦ δίνεται στην βιβλιογραφία [10].

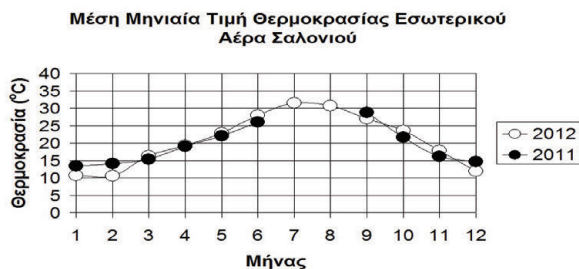


Εικόνα 2: Διαστρωμάτωση εξωτερικών τοίχων. Μεταξύ του μονού στρώματος γυψοσανίδας 12,5 mm και της μόνωσης 80 mm υπάρχει διάκενο αέρα

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑΣ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ

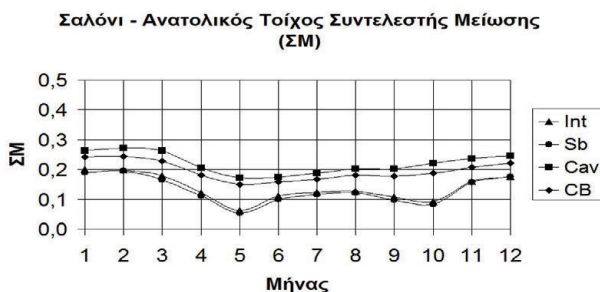
Η θερμική συμπεριφορά της πιλοτικής κατοικίας παρακολουθείται και αξιολογείται διαρκώς από το τέλος του 2010 μέχρι σήμερα. Αισθητήρες θερμοκρασίας και ροής θερμότητας έχουν εγκατασταθεί σε διαφορετικές τοποθεσίες εντός και επί των στοιχείων της τοιχοποιίας καθώς επίσης στο πάτωμα και την οροφή κάθε δωματίου. Τα δεδομένα των μετρήσεων αποθηκεύονται κάθε 10 λεπτά και μπορούν να συλλεχθούν από απόσταση για περαιτέρω επεξεργασία. Αξίζει να σημειωθεί πώς κατά το διάστημα της διετίας 2011-2012 (για το οποίο παρουσιάζονται αποτελέσματα εδώ), η κατοικία παρέμεινε κλειστή και ακατοίκητη, ενώ δεν τέθηκαν σε λειτουργία τα ενεργειακά συστήματα θέρμανσης και ψύξης. Η συγκεκριμένη επιλογή έγινε εσκεμμένα, ούτως ώστε η ανάλυση των πειραματικών δεδομένων να εστιάσει

στη μελέτη των θερμικών χαρακτηριστικών της τοιχοποιίας, δίνοντας παράλληλα έμφαση στον εντοπισμό της ενεργοποίησης των ΥΑΦ. Σημειώνεται επίσης ότι δεν υπάρχουν διαθέσιμα αποτελέσματα για το δίμηνο Ιουλίου – Αυγούστου 2011, λόγω εργασιών συντήρησης. Μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο των θερμοκρασιών της κατοικίας καθώς επίσης και των μετεωρολογικών συνθηκών στον περιβάλλοντα χώρο της βρίσκονται στη διεύθυνση: http://demothouse.hmcs.mech.ntua.gr/demothouse_site/



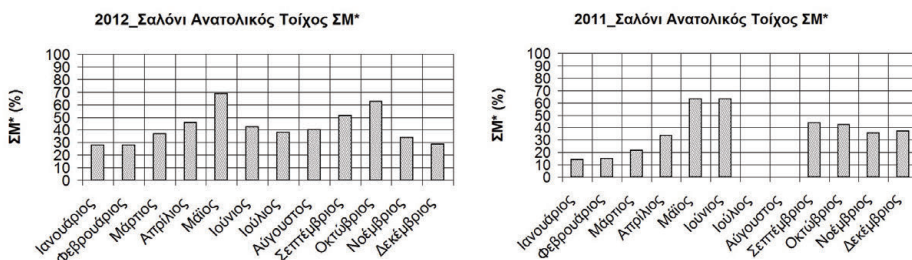
Εικόνα 3: Μέση μηνιαία τιμή θερμοκρασίας εσωτερικού αέρα στο σαλόνι της κατοικίας για τα έτη 2012 και 2011

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται οι μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας χώρου (εσωτερικού αέρα) για το 2012 και το 2011 αντίστοιχα, που ελήφθησαν από τον αισθητήρα εσωτερικού χώρου που είναι τοποθετημένος κοντά στον ανατολικό τοίχο του σαλονιού. Όπως αναμένεται και με δεδομένη την μη λειτουργία ενεργειακών συστημάτων, οι μετρούμενες θερμοκρασίες βρίσκονται συχνά εκτός του εύρους θερμικής άνεσης το οποίο σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία (ΚΕΝΑΚ) [10] κυμαίνεται μεταξύ 20-26 °C. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται ιδιαίτερα κατά τη θερινή και τη χειμερινή περίοδο. Οι μέσες τιμές της εσωτερικής θερμοκρασίας του σαλονιού: (α) ξεπερνούν τους 30 °C τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο (2012), (β) βρίσκονται μεταξύ 25-30 °C τον Ιούνιο και τον Σεπτέμβριο (2011 και 2012), (γ) πέφτουν αισθητά κάτω από τους 20 °C τους χειμερινούς μήνες Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο, αλλά και οριακά τον Απρίλιο και το Νοέμβριο, (δ) κυμαίνονται μεταξύ 20-25 °C τον Μάιο και τον Οκτώβριο. Σημειώνεται ότι οι διαφορές στις μετρούμενες μέσες τιμές εσωτερικής θερμοκρασίας μεταξύ των ετών 2011 και 2012, είναι πολύ μικρές, πρακτικά αμελητέες. Με βάση τα παραπάνω και με δεδομένη την αλλαγή φάσης των ΥΑΦ εντός θερμοκρασιακού εύρους μεταξύ 21-26 °C αναμένεται ενεργοποίηση τους κυρίως κατά τους μήνες Μάιο, Ιούνιο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο.



Εικόνα 4: Μέση μηνιαία τιμή του συντελεστή μείωσης (ΣΜ) για τα διάφορα στρώματα του ανατολικού τοίχου της κατοικίας. (Int: εσωτερική επιφάνεια, Sb: εξωτερική επιφάνεια γυψοσανίδας με ΥΑΦ, Cav: διάκενο τοιχοποιίας, CB: εσωτερική επιφάνεια στρώματοςτσιμεντοσανίδας)

Με σκοπό την πιστοποίηση της επίδρασης της τοιχοποιίας στην εξομάλυνση των εξωτερικών θερμοκρασιακών διακυμάνσεων εντός της κατοικίας, υπολογίζεται ο μέσος μηνιαίος συντελεστής μείωσης (ΣΜ). Ο ΣΜ υπολογίζεται μέσω του λόγου του ημερήσιου θερμοκρασιακού εύρους (α) της εσωτερικής επιφάνειας της τοιχοποιίας (ανατολικός τοίχος) προς το αντίστοιχο ημερήσιο θερμοκρασιακό εύρος της εξωτερικής επιφάνειας της τοιχοποιίας (επίσης ανατολικός τοίχος), άρα $\Sigma\text{Μ} = a_{\text{int}}/a_{\text{ext}}$. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται μέσες μηνιαίες τιμές του ΣΜ όπως αυτές προκύπτουν από τις υπάρχουσες θερμοκρασιακές μετρήσεις στα διάφορα στρώματα της τοιχοποιίας όπου και έχουν τοποθετηθεί αισθητήρες θερμοκρασίας, καθώς επίσης και στο διάκενο. Οι μετρήσεις αυτές αφορούν το έτος 2012 και το τμήμα της τοιχοποιίας που αντιστοιχεί στον ανατολικό τοίχο του σαλονιού. Πρακτικά, οι τιμές του ΣΜ με την ένδειξη "Sb" αναφέρονται στο λόγο του ημερήσιου θερμοκρασιακού εύρους της γυψοσανίδας που φέρει τα ΥΑΦ προς το αντίστοιχο θερμοκρασιακό εύρος της εξωτερικής επιφάνειας της τοιχοποιίας. Αντιστοίχως έχουν επεξεργαστεί και οι υπόλοιπες μετρήσεις. Αυτή η αναλυτικότερη προσέγγιση βοηθά στον καταμερισμό του συνολικού ΣΜ στα διάφορα στρώματα – τμήματα της τοιχοποιίας προκειμένου να αναδειχθεί και κατόπιν να αξιολογηθεί η συνεισφορά του καθενός από αυτά στην απομείωση των εξωτερικών θερμοκρασιακών διακυμάνσεων. Όπως αναμένεται οι τιμές του ΣΜ που υπολογίζονται με βάση το θερμοκρασιακό εύρος τιμών που μετράται στη γυψοσανίδα με τα ΥΑΦ, αλλά και στην εσωτερική επιφάνεια του εξωτερικού ανατολικού τοίχου με τις ενδείξεις "Sb" και "Iπ" αντίστοιχα είναι μικρότερες από εκείνες που υπολογίζονται με βάση το θερμοκρασιακό εύρος της τσιμεντοσανίδας και του διακένου (ενδείξεις "CB" και "Cav", αντίστοιχα) λόγω του ότι η θερμική μάζα των στρωμάτων δομικών υλικών (και του διακένου) που παρεμβάλλονται συντελεί στην περαιτέρω μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων. Είναι όμως εμφανές ότι αυτή η σταδιακή μείωση του ΣΜ (ενδείξεις "CB" και "Cav") γίνεται πιο έντονη κατά τη διάρκεια των μηνών στους οποίους βάσει των μετρούμενων θερμοκρασιών αναμένεται η ενεργοποίηση του ΥΑΦ (Μάιος, Ιούνιος Σεπτέμβριος, Οκτώβριος).



Εικόνα 5: Μέση μηνιαία τιμή του «ενεργού» συντελεστή μείωσης (ΣΜ*) του ανατολικού τοίχου της κατοικίας για τα έτη (α) 2012, (β) 2011.

Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση των ΥΑΦ, υπολογίζεται ένας ενδεικτικός λόγος μεταξύ των ΣΜ του στρώματος της γυψοσανίδας με τα ενσωματωμένα ΥΑΦ ("Sb") και του γειτονικού ΣΜ του διακένου ("Cav") μέσω της εξίσωσης: $\Sigma\text{Μ}^* = [(\Sigma\text{Μ}_{\text{Sb}} - \Sigma\text{Μ}_{\text{Cav}}) / \Sigma\text{Μ}_{\text{Cav}}] * 100$ και οι τιμές του προκύπτουν για τα έτη 2012 και 2011 παρουσιάζονται στην Εικόνα 5 (5α και 5β αντίστοιχα). Αυτός ο «ενεργός» λόγος ΣΜ* εκπροσωπεί την περαιτέρω μείωση των εξωτερικών θερμοκρασιακών διακυμάνσεων λόγω του διακένου, του στρώματος της μόνωσης και των γυψοσανίδων με ΥΑΦ. Όπως αναφέρθηκε αυτή η μείωση δεν είναι σταθερή (όπως θα αναμενόταν αν όλα τα στρώματα είχαν σταθερή θερμική μάζα), αλλά αυξάνεται τους μήνες ενεργοποίησης των ΥΑΦ. Η σύγκριση μεταξύ των τιμών του «ενεργού» ΣΜ για τα έτη 2012 και 2011 αναδεικνύει τις διαφορές στη συμπεριφορά των ΥΑΦ από χρόνο λόγω των αντίστοιχων διαφορών στις μετεωρολογικές συνθήκες όπως αυτές καταγράφονται και μέσω των μετρούμενων θερμοκρασιών εκτός και εντός της κατοικίας. Μια προσεκτική επισκόπηση δείχνει ότι η επιπρόσθετη μείωση των τιμών του ΣΜ λόγω της ενεργοποίησης των ΥΑΦ μπορεί να φτάσει και τα επίπεδα του 30-40% τους μήνες Μάιο, Ιούνιο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο, τόσο για το 2012, όσο και για το 2011. Για το 2012 η μεγιστοποίηση της

επίδρασης των ΥΑΦ επιτυγχάνεται το Μάιο και τον Οκτώβριο, ενώ οι αντίστοιχοι μήνες του 2011 είναι ο Μάιος και ο Ιούνιος.

Αξίζει να σημειωθεί πώς τους καλοκαιρινούς μήνες και ιδιαίτερα τον Ιούλιο και των Αύγουστο, τα ΥΑΦ παραμένουν ανενεργά λόγω υψηλών θερμοκρασιών και συνεπώς δεν συνεισφέρουν στην περαιτέρω μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων. Αυτή η παρατήρηση βεβαίως συνδέεται άμεσα με το γεγονός ότι η κατοικία παρέμεινε κλειστή κατά το υπό εξέταση χρονικό διάστημα. Η χρήση φυσικού ή/και μηχανικού αερισμού κατά τους ζεστούς καλοκαιρινούς μήνες θα οδήγούσε σε χαμηλότερες εσωτερικές θερμοκρασίες χώρου συντελώντας στη μετάθεση του «παραθύρου» ενεργοποίησης των ΥΑΦ εντός του καλοκαιριού.

4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ

Την τελευταία δεκαετία έχουν αναπτυχθεί αρκετά υπολογιστικά μοντέλα για την προσομοίωση των ΥΑΦ. Κάποια από αυτά αφορούν στην ενσωμάτωση των ΥΑΦ σε κτίρια [11-15], ωστόσο δεν έχουν τη δυνατότητα να εφαρμοστούν για την προσομοίωση πολύπλοκων γεωμετριών. Η πλατφόρμα ανάλυσης θερμοκίνης συμπεριφοράς κατασκευών TRNSYS, ξεπερνά το συγκεκριμένο εμπόδιο και προωθεί αξιόπιστους υπολογισμούς για όλα τα είδη κτιρίων. Ειδικότερα για την πλατφόρμα του TRNSYS, έχουν αναπτυχθεί διάφορα εργαλεία (Types) τα οποία στοχεύουν στην ακριβή προσομοίωση των ΥΑΦ, όταν αυτά ενσωματώνονται σε δομικά υλικά [16-20]. Στη παρούσα μελέτη παρουσιάζεται μια νέα προσέγγιση η οποία βασίζεται στη σύνδεση κώδικα MATLAB στην πλατφόρμα του TRNSYS. Για λόγους πληρότητας παρόλα' αυτά, παρουσιάζονται και αξιολογείται η υπολογιστική ικανότητα των υπόλοιπων Types του TRNSYS με εφαρμογή σε απλή γεωμετρία. Για να είναι δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση όλων των μοντέλων και να αναδειχθούν τα προτερήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας, είναι απαραίτητη η επαλήθευση των μοντέλων σε απλή περίπτωση που έχει επιλεγεί.

4.1. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

Το ευέλικτο και επεκτάσιμο υπολογιστικό περιβάλλον του TRNSYS δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής νέων μοντέλων που μπορεί να κατασκευάσει ο ίδιος ο χρήστης ή άλλοι προγραμματιστές χρησιμοποιώντας κοινές γλώσσες προγραμματισμού. Επιπλέον, το TRNSYS μπορεί να συνδεθεί εύκολα με πολλές άλλες εφαρμογές για επεξεργασία πριν, μετά ή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (εν προκειμένω το MATLAB) [21]. Η απλότητα αυτής της διασύνδεσης είχε ως αποτέλεσμα τη σύνδεση των αρχείων m-files του MATLAB στο περιβάλλον του TRNSYS.

Στην παρούσα εργασία το μοντέλο MATLAB συνδέεται με την πλατφόρμα TRNSYS, με σκοπό την παροχή πληροφοριών σχετικά με την επίδραση των ΥΑΦ στα ετήσια ψυκτικά φορτία των δωματίων. Αυτή η προσέγγιση έχει το πλεονέκτημα ότι αντιμετωπίζει τα προβλήματα που συνδέονται με τη μη – γραμμική φύση των φαινομένων αλλαγής φάσης και αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία δεν μπορεί να διαχειριστεί το TRNSYS. Η συγχώνευση των δύο διαφορετικών υπολογιστικών μοντέλων παρέχει ένα αποτελεσματικό εργαλείο που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα και των δύο λογισμικών: με την πλατφόρμα TRNSYS εισάγονται λεπτομερείς πληροφορίες για την πολύπλοκη γεωμετρία του κτιρίου καθώς και ακριβείς προβλέψεις για τη χρήση συστημάτων HVAC, ενώ με το μοντέλο MATLAB γίνεται ακριβής υπολογισμός της πιθανής επίδρασης των ΥΑΦ που βρίσκονται στις γυψοσανίδες.

4.2. ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕ ΑΛΛΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ

Η μεθοδολογία που προτάθηκε και ο κώδικας που περιγράφηκε παραπάνω, καθιστά απαραίτητη την επαλήθευση και την επικύρωση του μοντέλου σε συγκεκριμένη, απλή περίπτωση για την οποία είναι διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις.

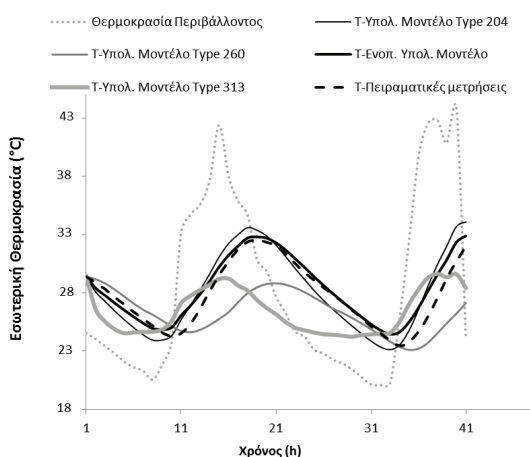
Εξετάζεται σειρά πιλοτικών οικίσκων, οι οποίοι παρουσιάζονται στην Εικόνα 6 και έχουν χτιστεί σε εξωτερικό χώρο της περιοχής Alicante, της Ισπανίας [22]. Η κατασκευή των πιλοτικών οικίσκων περιλαμβάνει τέσσερα πλευρικά τοιχώματα (στο δυτικό τοίχωμα υπάρχει πόρτα) δάπεδο και οροφή, δηλαδή επτά σύνθετα μέρη - τμήματα. Οι ιδιότητες της πόρτας, τα υλικά που απαρτίζουν το κέλυφος της κατασκευής, καθώς και το πάχος αυτών αναφέρονται στο [23]. Στα πλευρικά τοιχώματα (εκτός της πόρτας) υπάρχουν ενσωματωμένα ΥΑΦ.

Τα υπολογιστικά αποτελέσματα δείχνουν ότι οι θερμοκρασίες του αέρα στο εσωτερικό ακολουθούν τις αντίστοιχες πειραματικές (βλ. Εικόνα 7). Αποδεικνύεται ότι το υπολογιστικό μοντέλο καταφέρνει να ακολουθήσει την επίδραση των ΥΑΦ.

Για μια πιο ολοκληρωμένη διερεύνηση των υπολογιστικών εργαλείων που αφορούν το TRNSYS πραγματοποιείται στην ίδια εφαρμογή πιλοτικών οικίσκων, συγκριτική αξιολόγηση του μοντέλου MATLAB-TRNSYS με άλλα "PCM Types" που έχουν προταθεί στο TRNSYS. Σε κάθε μοντέλο προσομοίωσης εισάγονται, ως εξωτερικά αρχεία, η μετρούμενη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και η ηλιακή ακτινοβολία, ενώ αρχική τιμή της θερμοκρασίας, με βάση τις διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις θεωρείται η 29,41 °C. Τα "PCM Types", τα οποία θα μελετηθούν στην παρούσα φάση είναι τα: Type 204, Type 313, Type 260 [15-19]. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα δείχνουν ότι όλα τα μοντέλα καταφέρνουν να αναπαράγουν τις θερμοκρασίες του αέρα στο εσωτερικό, ακολουθώντας τις αντίστοιχες πειραματικές καμπύλες. Από την Εικόνα 7 φαίνεται ότι το Type 204 και το Ενοποιημένο Μοντέλο MATLAB-TRNSYS προσεγγίζουν καλύτερα τις πειραματικές τιμές, ενώ τα υπόλοιπα δύο μοντέλα παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις.



Εικόνα 6: Πρότυποι οικίσκοι στην περιοχή Alicante στην Ισπανία



Εικόνα 7: Διακύμανση εσωτερικής θερμοκρασίας των ΥΑΦ οικίσκων με χρήση των μοντέλων: Type 204, Type 313, Type 260 και Ενοποιημένο Μοντέλο MATLAB-TRNSYS

Πιο συγκεκριμένα, για το Type 204, φαίνεται να υπάρχει μια υπερ-εκτίμηση των μεγίστων τιμών της θερμοκρασίας σε σχέση με τις αντίστοιχες πειραματικές. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι το μοντέλο αντιμετωπίζει την αλλαγή φάσης μέσω σταθερής τιμής της ειδικής θερμοχωρητικότητας. Όσον αφορά το Type 313, σε γενικές γραμμές ακολουθεί την τάση της μεταβολής της θερμοκρασίας και καταφέρει να υπολογίσει τις ελάχιστες τιμές της θερμοκρασίας, ωστόσο, παρατηρούνται πολλές αποκλίσεις κατά τη διάρκεια των δύο κύκλων. Το Type 313 αναπτύχθηκε και επικυρώθηκε για την μοντελοποίηση ενεργητικών συστημάτων με ΥΑΦ, χωρίς όμως να αποκλείεται η εφαρμογή του και για παθητικά συστήματα. Επίσης, η διαδοχή των στρωμάτων του τοιχώματος έτσι όπως ορίζεται στο μοντέλο, δημιουργεί αρκετές ασάφειες, καθώς αντιμετωπίζει την επιφάνεια που καλύπτεται από ΥΑΦ στο σύνολό της [24]. Σχετικά με το Type 260, οι θερμοκρασίες του εσωτερικού αέρα, που υπολογίζονται, αναπαράγουν καλά τη διακύμανση των πειραματικών δεδομένων. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του μοντέλου, όπως η αδυναμία του μοντέλου να προσομοιώσει την αλλαγή φάσης όταν το ΥΑΦ είναι ενσωματωμένο σε μικροκάψουλες[19].

Τέλος, το ενοποιημένο μοντέλο MATLAB-TRNSYS δίνει την καλύτερη προσέγγιση των πειραματικών τιμών της θερμοκρασιακής διακύμανσης. Αποκλίνει κυρίως κατά την τήξη του ΥΑΦ, οφείλονται ενδεχομένως στις υποθέσεις που έχουν γίνει για τις θερμο-φυσικές ιδιότητες των υλικών, καθώς και ανακρίβειες που σχετίζονται με τις τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και τους συντελεστές που έχουν υιοθετηθεί. Έχει βρεθεί ότι τα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούν τη μέθοδο της ειδικής θερμοχωρητικότητας (Type 204, Type 260 και το ενοποιημένο μοντέλο) δίνουν πιο ακριβή αποτελέσματα, τα οποία προσεγγίζουν τα πειραματικά δεδομένα, ειδικά όταν η θερμοκρασία τήξεως έχει επαρκώς περιγραφεί.

5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΚΑΤΟΙΚΙΑΣ

Για την υπολογιστική διερεύνηση της πιλοτικής κατοικίας, χρησιμοποιείται το επαληθευμένο πλέον εργαλείο MATLAB-TRNSYS. Η οικία μοντελοποιείται ως ένα κτίριο πολλών ζωνών. Συγκεκριμένα, το κτίριο χωρίζεται σε έξι θερμικές ζώνες. Τα δομικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στην πιλοτική κατοικία είτε πρόκειται για εμπορικά προϊόντα, των οποίων οι θερμο-φυσικές ιδιότητες είναι γνωστές, είτε για στοιχεία των οποίων οι ιδιότητες έχουν μετρηθεί στο εργαστήριο των Ετερογενών Μιγμάτων και συστημάτων Καύσης, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Υλικά για τα οποία δεν υπάρχουν διαθέσιμες πληροφορίες, για την θερμική τους προσομοίωση στο μοντέλο, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον KENAK [25]. Περαιτέρω πληροφορίες για όλα τα δομικά στοιχεία, τις ιδιότητες τους και τη καμπύλη θερμοχωρητικότητας των χρησιμοποιούμενων ΥΑΦ βρίσκονται στην βιβλιογραφία [10].

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

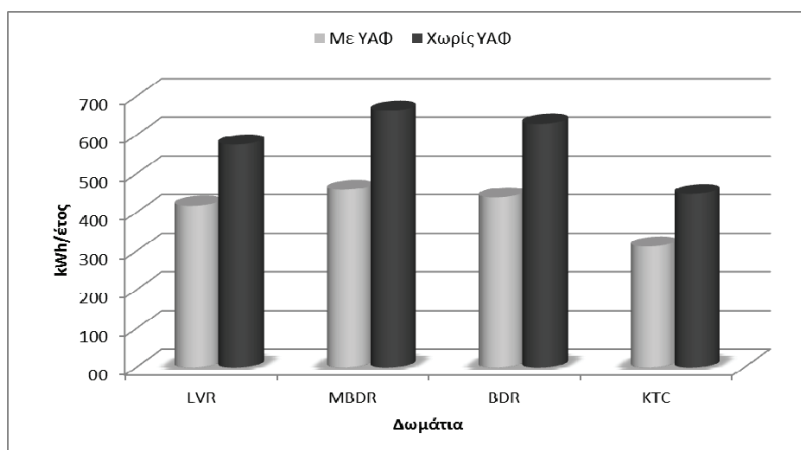
Για να γίνει αντιληπτή η επίδραση των γυψοσανίδων ΥΑΦ στις θερμικές ανάγκες και απαιτήσεις της κατοικίας, είναι απαραίτητη η γνώση των θερμικών αναγκών της ίδιας κατοικίας, όταν οι γυψοσανίδες των εσωτερικών τοίχων και των χωρισμάτων είναι απλές, χωρίς δηλαδή να εμπεριέχουν ΥΑΦ. Το μοντέλο προσομοίωσης για την περίπτωση του βασικού σεναρίου αναφοράς παραμένει το ίδιο με μόνη διαφορά ότι οι γυψοσανίδες δεν περιέχουν ΥΑΦ. Η διάρκεια της προσομοίωσης είναι ένα έτος και το χρονικό βήμα που χρησιμοποιείται είναι 10 λεπτά.

Προκειμένου να εκτιμηθεί η ετήσια ζήτηση ψύξης της πιλοτικής οικίας, ορίζεται η θερμοκρασία ενεργοποίησης της ψύξης κατά την θερινή περίοδο στους 26 °C ενώ θεωρείται απεριόριστη ψυκτική ισχύ για όλο το χρόνο για τα δωμάτια: κρεβατοκάμαρα-MBDR, υπνοδωμάτιο -BDR, σαλόνι -LVR, και κουζίνα -KTC. Οι τιμές αναφέρονται στην τρέχουσα κατάσταση της οικίας, η οποία είναι άδεια και χωρίς εσωτερικά θερμικά κέρδη. Η υπολογιζόμενη συνολική ετήσια ζήτηση ψύξης για όλο το σπίτι, στο βασικό σενάριο αναφοράς είναι 25,37 kWh / m², ενώ όταν έχουν εγκατασταθεί γυψοσανίδες με ΥΑΦ είναι

17,88 kWh / m² έτος (βλ. Πίνακα 1). Η ετήσια εξοικονόμηση ενέργειας ανέρχεται σε 29% (για ψύξη) και είναι το αποτέλεσμα της λανθάνουσας αποθήκευσης θερμότητας των ΥΑΦ, η οποία αυξάνει την θερμική μάζα του τοίχου αποτελεσματικά.

Μήνας	Χωρίς ΥΑΦ (Βασικό σενάριο)	Με ΥΑΦ (Τρέχουσα κατάσταση)
Ιανουάριος-Απρίλιος	0	0
Μάιος	77,18 kWh	5,54 kWh
Ιούνιος	467,35 kWh	199,32 kWh
Ιούλιος	855,71 kWh	591,2 kWh
Αύγουστος	1546,73 kWh	1195,32 kWh
Σεπτέμβριος	832,54 kWh	694,56 kWh
Οκτώβριος - Δεκέμβρης	102,04 kWh	49,09 kWh
Ετήσιο Ψυκτικό φορτίο	25,37 kWh/m² έτος	17,88 kWh/m² έτος

Στην Εικόνα 8, παρουσιάζεται η μηνιαία κατανομή της ζήτησης ψυκτικού φορτίου για την περίπτωση με ή χωρίς γυψοσανίδες ΥΑΦ για τα τέσσερα δωμάτια: σαλόνι (LVR), master bedroom (MBDR), υπνοδωμάτιο (BDR) και κουζίνα (KTC). Οι μήνες κατά τους οποίους δεν υπάρχει ανάγκη ψύξης, παραλείπονται. Η υψηλότερη ζήτηση αναμένεται τον Αύγουστο για όλα τα δωμάτια, και ακολουθείται από τους μήνες Ιούλιο και Σεπτέμβριο. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζεται το απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο για τα τέσσερα δωμάτια για τις δύο περιπτώσεις. Σε κάθε περίπτωση, η εξοικονόμηση στο ψυκτικό φορτίο κυμαίνεται από 29-31% ανάλογα με το δωμάτιο στο οποίο αναφερόμαστε.



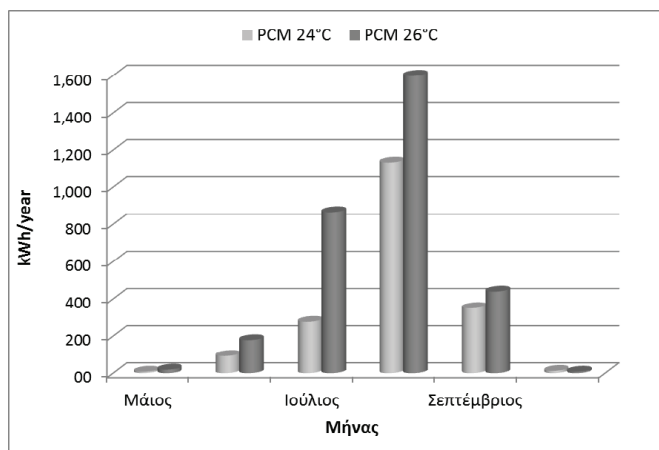
Εικόνα 8: Ψυκτικό φορτίο σεναρίου αναφοράς κατά τη διάρκεια του έτους

	Ετήσιο Ψυκτικό Φορτίο (kWh)			
	LVR	MBDR	BDR	KTC
Με ΥΑΦ	417.7	458.9	439.1	312.4
Χωρίς ΥΑΦ	576.0	663.5	628.9	448.0

Για να αναδειχθεί η σημασία της σωστής επιλογής της θερμοκρασίας λειτουργίας των ΥΑΦ που εγκαθίστανται σε μια οικία, διεξάγεται παραμετρική μελέτη της πιλοτικής κατοικίας με διαφορετικό εύρος θερμοκρασιών αλλαγής φάσης του ΥΑΦ: η θερμοκρασία αλλαγής φάσης των γυψοσανίδων με ΥΑΦ, οι οποίες έχουν εγκατασταθεί στην πιλοτική κατοικία, είναι στους 24 °C, ενώ η νέα περίπτωση, η οποία θα μελετηθεί, αφορά γυψοσανίδες με θερμοκρασία αλλαγής φάσης στους 26 °C, ενώ το θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας είναι 23 °C-28 °C. Η προσομοίωση της γυψοσανίδας με ΥΑΦ στους 26 °C γίνεται με τον ίδιο τρόπο, όπως στο βασικό σενάριο.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3, δίνουν μια πρώτη αξιολόγηση της επιλογής του ΥΑΦ, το οποίο εγκαταστάθηκε στην πιλοτική κατοικία. Το φορτίο ψύξης για την περίπτωση κατά την οποία το ΥΑΦ είχε θερμοκρασία αλλαγής φάσης στους 26 °C είναι σημαντικά αυξημένο. Η αύξηση των αναγκών είναι συνυφασμένη με τις κλιματικές συνθήκες που επικρατούν. Όπως προαναφέρθηκε, η επίδραση του ΥΑΦ με αλλαγή φάσης στους 24 °C είναι εντονότερη κατά τους μήνες Μάιο-Ιούνιο και Σεπτέμβρη-Οκτώβρη, καθώς οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος τότε είναι κοντά σε αυτή τη θερμοκρασία. Η επίδραση του ΥΑΦ για τους μήνες Ιούλιο-Αύγουστο είναι μικρότερη, καθώς το ΥΑΦ ενδεχομένως δεν λειτουργεί σωστά. Με γνώμονα αυτές τις συνθήκες, η αλλαγή του θερμοκρασιακού εύρους για την αλλαγή φάσης του ΥΑΦ μέσα στις γυψοσανίδες, από 24 °C στους 26 °C ευνοεί τους θερινούς μήνες Ιούλιο-Αύγουστο. Παρόλ' αυτά, επειδή οι ημερήσιες θερμοκρασίες για αυτούς τους μήνες ξεπερνούν κατά πολύ τους 26 °C, πάλι παρατηρείται μη σωστή λειτουργία του ΥΑΦ, οδηγώντας σε υψηλή απαίτηση ψύξης. Από τα δυο σενάρια που μελετήθηκαν, η επιλογή γυψοσανίδων, οι οποίες εμπεριέχουν ΥΑΦ με αλλαγή φάσης στους 24 °C θεωρείται η ιδανική για την περίπτωση της Αμφιλοχίας. Στην Εικόνα 9, παρουσιάζεται η σύγκριση του απαιτούμενου ψυκτικού φορτίου για τις δυο περιπτώσεις των ΥΑΦ που μελετώνται. Η μελέτη αυτή είναι σημαντικό να γίνεται εκ των προτέρων, κατά τη φάση της ενεργειακής μελέτης, ώστε η επιλογή να οδηγήσει στη μεγαλύτερη εξοικονόμηση για τις δεδομένες συνθήκες.

Μήνας	ΥΑΦ 24 °C	ΥΑΦ 26 °C
	(kWh)	
Μάιος	5,5	5,7
Ιούνιος	199,3	307,7
Ιούλιος	591,2	707,5
Αύγουστος	1195,3	1339,4
Σεπτέμβριος	694,6	814,7
Οκτώβριος	49,1	55,6
Ετήσιο Ψυκτικό φορτίο	17,88 kWh/m² έτος	21,11 kWh/m² έτος



Εικόνα 9: Ετήσιο απαιτούμενο ψυκτικό φορτίο, σύγκριση για γυψοσανίδες με ΥΑΦ στους 24 °C και στους 26 °C αντίστοιχα.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για πρώτη φορά, μελετάται η θερμική συμπεριφορά κτηρίου ελαφριάς κατασκευής, το οποίο φέρει γυψοσανίδες με Υλικά Αλλαγής Φάσης, τόσο με πειραματικές μετρήσεις, όσο και με υπολογιστική προσομοίωση, στην περιοχή της Μεσογείου. Η πιλοτική κατοικία, η οποία είναι κατασκευασμένη στην περιοχή της Αμφιλοχίας, αποτελεί άριστο παράδειγμα κτηρίου χαμηλής κατανάλωσης, συνδυάζοντας παθητικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας (όπως είναι τα ΥΑΦ) με αποδοτικά συστήματα θέρμανσης/ψύξης ή ΑΠΕ. Η θερμική συμπεριφορά της πρότυπης κατοικίας παρακολουθείται και αξιολογείται διαρκώς από το τέλος του 2010 μέχρι σήμερα. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται πειραματική και υπολογιστική διερεύνηση της ενεργειακής συμπεριφοράς της οικίας με έμφαση στη μελέτη ενεργοποίησης των ΥΑΦ και μείωση των ψυκτικών φορτίων κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών. Παρουσιάζονται οι μέσες, μηνιαίες τιμές εσωτερικής θερμοκρασίας του σαλονιού που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια της διετίας 2011-2012 (διάστημα κατά το οποίο το σπίτι παρέμεινε κλειστό και ακατοίκητο). Καταδεικνύεται ότι η επίδραση των ΥΑΦ γίνεται εντονότερη τους μήνες Μάιο, Ιούνιο, Σεπτέμβριο και Οκτώβριο ενισχύοντας τη θερμική μάζα της τοιχοποιίας και οδηγώντας σε μείωση του συντελεστή μείωσης (ΣΜ) κατά 30-40%.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης με τη χρήση του υπολογιστικού εργαλείου MATLAB-TRNSYS, τα ΥΑΦ καταφέρνουν επιτυχώς να μειώσουν τα ψυκτικά φορτία της οικίας κατά ένα μέσο όρο 29%. Το ποσοστό αυτό αφορά την κατοικία κενή (χωρίς ενόικους και πρόσθετα θερμικά κέρδη). Η παραμετρική μελέτη ως προς τη θερμοκρασία αλλαγής φάσης των γυψοσανίδων με ΥΑΦ, αναδεικνύει την ανάγκη σωστής επιλογής ΥΑΦ σε σχέση με τις κλιματικές συνθήκες. Παρολ' αυτά, η ενεργειακή προσομοίωση μιας οικίας ή ενός κτηρίου επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Αυτοί οι παράγοντες μπορεί να αφορούν τις ιδιότητες του ΥΑΦ, τις συνθήκες λειτουργίας και χρήση του κτηρίου και τέλος το τοπικό κλίμα. Μια πιο εμπειριστατωμένη μελέτη θα περιλαμβάνει την αξιολόγηση της επίδρασης στην εξοικονόμηση ενέργειας όλων των προαναφερθέντων παραμέτρων. Τέλος, είναι σημαντική η εξέταση της συγκεκριμένης πιλοτικής κατοικίας, καθώς θα μπορούσε να αποτελεί πρότυπο για την αναβάθμιση του κτηριακού τομέα που προωθείται από την Εθνική Οδηγία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Farid, M., Khudhair, A., Razack, S., and Al-Hallaj, S., 2004, "A review on phase change energy storage: materials and applications," *Energy Conversion and Management*, 45, pp. 1597-1615.
- [2] Zhu, N., Ma, Z., and Whang, S., 2009, "Dynamic Characteristics and Energy Performance of Buildings Using Phase Change Materials," *Energy Conversion and Management*, 50, pp. 3161-3181.
- [3] Cabeza, L., Castell, A., Barreneche, C, de Gracia, A., and Fernandez, A., 2011, "Materials Used as PCM in Thermal Energy Storage in Buildings: A Review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1675-1695.
- [4] Tatsidjoudong, P., Le Pierrès, N., and Luo, L., 2013, "A review of potential materials for thermal energy storage in building applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, pp. 327-349
- [5] AL-Saadi, S.N., and Zhai, Z. (John), 2013, "Modeling phase change materials embedded in building enclosure: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, pp. 659-673.
- [6] Jin, X., Medina, M.A., and Zhang, X., 2013, "On the importance of the location of PCMs in building walls for enhanced thermal performance," *Applied Energy*, 106, pp. 72-78.
- [7] I-SSB -the official web site of the I-SSB Project: The Integrated Safe& Smart Built Concept [internet]. A collaborative research project partly funded by the European Commission, under the 6th Framework Programme - Priority III - NMP4.- Available at: < <http://www.issb-project.com/>>.[accessed 15.09.2014].
- [8] MESSIB - the official web site of the MESSIB Project: Multi-source Energy Storage System Integrated in Buildings [internet]. A research - Large-scale integrating project funded by the European Commission, under the 7th Framework Programme - FP7-NMP-2007-LARGE-1. - Available at: < <http://www.messib.eu/>> . [accessed 15.09.2014].
- [9] FC-District - the official web site of the FC-District Project [internet]. A co-financed project based on grant agreement no. 260105, under the 7th Framework Programme - EeB.NMP.2010-2.- Available at: < <http://fc-district.eu/>>.[accessed 15.09.2014].
- [10] Mandilaras, I., Stamatiadou, M., Katsourinis, D., Zannis, G., and Founti, M., 2013, "Experimental thermal characterization of a Mediterranean residential building with PCM gypsum board walls," *Building and Environment*, 61, pp. 93-103.
- [11] Darkwa, K., and O'Callaghan, P., 2006, "Simulation of phase change drywalls in a passive solar building," *Applied Thermal Engineering*, 26 (8-9), pp. 853-858.
- [12] Zhou, G., Zhang, Y., Lin, K., and Xiao, W., 2008, "Thermal analysis of a direct-gain room with shape-stabilized PCM plates," *Renewable Energy*, 33 (6), pp.1228-1236.
- [13] Halford, C., and Boehm, R., 2007, "Modelling of phase change material peak load shifting," *Energy and Buildings*, 39 (3), pp. 298-305.
- [14] Dutil, Y., Rousse, D.R., Salah, N.B., Lassue, S., and Zalewski, L., 2011, "A review on phase-change materials: Mathematical modeling and simulations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, pp. 112-130.
- [15] Dutil, Y., Rousse, D., Lassue, S., Zalewski, L., Joulin, A., Virgone, J., Kuznik, F., Johannes, K., Dumas, J.-P., Bédécarrats, J.-P., Castell, A., and Cabeza, L.F., 2014 "Modeling phase change materials behavior in building applications: Comments on material characterization and model validation.," *Renewable Energy*, 61, pp. 132-135.
- [16] Ahmad, M., Bontemps, A., Salle, H., and Quenard, D., 2006, "Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum

- isolation panels and phase change material,” *Energy and Buildings*, 38 (6), pp. 673–681.
- [17] Ibanez, M., Lazaro, A., Zalba, B., Cabeza, L.F., 2005, “An approach to the simulation of PCM in building applications using TRNSYS,” *Applied Thermal Engineering*, 25 (11-12), pp. 1796–1807.
- [18] Schranzhofer, H. Puschnig, P., Heinz, A., and Streicher, W., “Validation of a TRNSYS simulation model for PCM energy storages and PCM wall construction elements, in: (internet) Available at: <http://intranet.stockton.edu/eyos/energy_studies/content/docs/FINAL_PAPERS/11B-4.pdf> [accessed 15.09.2014], 2004.
- [19] Personal Communication with Dr. Hermann Schranzhofer, Institute of Thermal Engineering, Graz University of Technology (email date 24/09/2009)
- [20] Riederer, P., Keilholz, W., Ducreux, V., 2009 “Coupling of TRNSYS with SIMULINK - A Method to automatically export and use TRNSYS models with Simulink and vice versa” Proc. of 11th International IBPSA Conference, Building Simulation, Glasgow, Scotland, 2009
- [21] Kuznik, F., Virgone, J., and Johannes, K., 2010, “Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM”, *Energy and Buildings*, 42, pp. 1004-1009.
- [22] Romero-Sánchez, M.D., Founti, M., Guillem-López, C., and López-Buendía, A.M, 2009, “Thermal energy storage in natural stone treated with PCM,” *Proceedings of Effstock 2009 – 11th International Conference on thermal energy storage*, Stockholm, Sweden, 2009.
- [23] Katsourinis, D., Stamatiadou, M., Founti, M., Romero-Sánchez, M.D., and López-Buendía, A., 2010, “Experimental and Numerical Investigation of Thermal Energy Storage in Natural Stone Treated with PCMs,” *TG66-Special Track 18th CIB World Building Congress*, Salford, United Kingdom. pp. 83.
- [24] Bontemps, A., Ahmad, M., Johannès, K., and Sallée, H., 2011, “Experimental and modelling study of twin cells with latent heat storage walls,” *Energy and Buildings*, 43, pp. 2456–2461.
- [25] T.O.T.E.E. 20701-1/2010 [WWW Document], Website URL <http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tptee/totee/TOTEE-20701-1-Final-%D4%C5%C5-2nd.pdf> (accessed 15/09/2014).

BIOMAZA

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΥΣΗΣ ΠΛΑΤΥΦΥΛΛΩΝ ΔΑΣΙΚΩΝ ΕΙΔΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΑΙ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΦΛΟΙΟΥ

I. Μπαρμπούτης^{1*}, Χ. Λυκίδης²

¹ Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, ΑΠΘ, 54124 Θεσσαλονίκη,
e-mail: jbarb@for.auth.gr

² Ινστιτούτο ΜΔΟ & Τεχνολογίας Δασικών Προϊόντων, ΕΛΓΟ «Δήμητρα»

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σημαντικό μέρος της δασικής βιομάζας που παράγεται στα δάση της Ελλάδας χρησιμοποιείται παραδοσιακά για ενεργειακούς σκοπούς υπό τη μορφή καυσόξυλων ή ξυλοκάρβουνων. Η χρήση της εν λόγω βιομάζας υπό τη μορφή σύμπηκτων (pellets) παρουσιάζει πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους ενεργειακής αξιοποίησης καθώς βελτιώνει την ποιοτική εκμετάλλευση της βιομάζας και επιπλέον μειώνει τον όγκο και το κόστος μεταφοράς της. Λόγω διαφορών στη χημική τους δομή, το ξύλο και ο φλοιός παρουσιάζουν διαφορές στα χαρακτηριστικά καύσης τους. Στην παρούσα έρευνα προσδιορίστηκε η υψηλή θερμαντική αξία (HHV) και η περιεχόμενη τέφρα του ξύλου και του φλοιού από τα παρακάτω δασικά είδη αειφύλλων πλατυφύλλων που φύονται στην περιοχή της Χαλκιδικής: *Quercus coccifera*, *Quercus ilex*, *Arbutus unedo*, *Phillyrea latifolia* και *Erica arborea*). Για λόγους σύγκρισης ίδιου προσδιορισμός έγινε και για δυο φυλλοβόλλα πλατύφυλλα της ίδιας περιοχής που επίσης χρησιμοποιούνται παραδοσιακά για θερμική χρήση: *Fagus sylvatica* και *Ostrya carpinifolia*. Για όλα τα παραπάνω είδη έγινε προσδιορισμός της διαμέτρου της ξυλείας, του πάχους φλοιού και της αναλογίας φλοιού-ξύλου. Τα αποτελέσματα των προσδιορισμών έδειξαν ότι ο φλοιός της *Quercus coccifera* έδειξε τις υψηλότερες τιμές περιεχόμενης τέφρας ενώ το ξύλο της *Erica arborea* παρουσίασε τις υψηλότερες τιμές υψηλής θερμαντικής αξίας. Όλα τα δοκιμασθέντα αειφύλλα παρουσίασαν υψηλότερα ποσοστά περιεχόμενης τέφρας φλοιού και μικρότερη περιεχόμενη τέφρα ξύλου. Αντίστοιχα, όλα τα δοκιμασθέντα αειφύλλα εκτός από το *Phyllirea latifolia* παρουσίασαν υψηλότερες τιμές θερμαντικής αξίας ξύλου και μικρότερες τιμές για το φλοιό. Η συσχέτιση των τιμών περιεχόμενης τέφρας με τη θερμαντική αξία των δοκιμασθέντων υλικών ήταν αδύναμη. Ο φλοιός των αειφύλλων πλατυφύλλων θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή σύμπηκτων αρκεί η χρήση τους να γίνει σε τέτοιες αναλογίες που θα διατηρούν τα ποσοστά περιεχόμενης τέφρας κάτω από τα όρια που τίθενται από τα σχετικά ευρωπαϊκά πρότυπα.

Λέξεις Κλειδιά: Αειφύλλα πλατύφυλλα, φλοιός, ξύλο, τέφρα, θερμαντική αξία

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διαρκής αναζήτηση για νέες πηγές ενέργειας αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό του σύγχρονου πολιτισμού. Στις μέρες μας, υπό την επίδραση του «φαινομένου του θερμοκηπίου» η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχει αποκτήσει εξέχουσα σημασία στον αγώνα για κάλυψη των ενεργειακών αναγκών σε πολλές περιοχές της υφελίου. Η χρήση ξυλώδους βιομάζας για την παραγωγή ενέργειας αποτελεί μια αξιόλογη επιλογή που συνάδει με την ως άνω απαίτηση καθώς υπάρχουν πολυάριθμες πηγές τέτοιων υλικών. Παράλληλα η συμπύκνωση βιομάζας και η παραγωγή σύμπηκτων παρουσιάζει επιπλέον πλεονεκτήματα που απορρέουν από τη μεγάλη διαθεσιμότητα και τον περιορισμό του όγκου της [1]. Διάφορες εναλλακτικές πηγές βιομάζας έχουν προταθεί ή ήδη χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βιοκαυσίμων όπως απορρίμματα δευτερογενούς επεξεργασίας ξύλου (ξύλοσκη και άλλα υπολείμματα), αγροτικά υπολείμματα, ενεργειακές καλλιέργειες αλλά και δασική βιομάζα [2][3][4][5][6]. Η συγκομιδή και χρήση της δασικής βιομάζας Μεσογειακών δασών έχει αναγνωριστεί όχι μόνο ως μέσο για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών αλλά για την προστασία που παρέχει από δασικές πυρκαγιές [7]. Στην Ελλάδα πολλά δάση αειφύλλων πλατυφύλλων είναι πρεμνοφυή με μικρό περίοτρο χρόνο (25-30 χρόνια) και υλοτομούνται αποψιλωτικά για την παραγωγή ξυλοκάρβουνου και καυσόξυλων. Παρόλα αυτά η εν λόγω διεύρυνση των πηγών πρώτων υλών για ενεργειακή χρήση παράλληλα με τις ευκαιρίες που παρουσιάζει, αυξάνει και την ανάγκη για λεπτομερή ανάλυση και βαθύτερη γνώση των προτεινόμενων εναλλακτικών πηγών βιομάζας. Η ανάγκη αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στην περίπτωση της δασικής βιομάζας (υπολείμματα υλοτομιών, πυροπροστατευτικοί καθαρισμοί κ.α.) η οποία περιλαμβάνει πλήθος διαφορετικών ειδών βλάστησης με διαφορετικά χαρακτηριστικά και χημική σύσταση και επομένως διαφορετικές θερμικές ιδιότητες και εν γένει απαιτήσεων χειρισμού της. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της ως άνω μεταβλητότητας είναι η παρουσία φλοιού, ο οποίος παρουσιάζει σημαντικές διαφορές (πχ κατά κανόνα μεγαλύτερα ποσοστά περιεχόμενης τέφρας) από το ξύλο. Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την παραδοσιακή παραγωγή ξυλοκάρβουνου, ο φλοιός απομακρύνεται παθητικά και κατά συνέπεια δε χρησιμοποιείται ενώ με την συμπύκνωση και την παραγωγή σύμπηκτων, ο φλοιός, κατά κανόνα, παραμένει και συμμετέχει στην παραγωγή τους.



Εικόνα 1: Περιοχή μετά την υλοτομία αειφύλλων πλατυφύλλων



Εικόνα 2: Ξυλώδης βιομάζα από δάση αειφύλλων πλατυφύλλων για παραγωγή κάρβουνου

Σε ότι αφορά τα μεσογειακά δασικά είδη πλατυφύλλων έχουν δημοσιευθεί σχετικές εργασίες [8][9][10] αλλά υπάρχουν περιορισμένα στοιχεία για τις διαφορές θερμικών χαρακτηριστικών ξεχωριστά για το φλοιό και το ξύλο των ειδών αυτών. Σχετικά με την επίδραση του φλοιού στην ποιότητα των βιοκαυσίμων ο Filbakk και οι συνεργάτες του αναφέρουν ότι επιφέρει αύξηση της τάσης εμφάνισης θερμικής συσσωμάτωσης (sintering) κατά την καύση και επομένως συσχετίζεται με προβλήματα καύσης [11]. Σχετικά με την παρουσία τέφρας ο Lehtikangas αναφέρει ότι αυξημένα ποσοστά περιεχόμενης τέφρας επιφέρουν χαμηλότερη θερμαντική αξία του βιοκαυσίμου, αυξάνουν τον κίνδυνο θερμικής συσσωμάτωσης και γενικά έχουν αρνητική επίδραση στον εξοπλισμό παραγωγής σύμπηκτων (πέλετ, μπρικετες) [12]. Για το λόγο αυτό στο πρόσφατο σχετικό ευρωπαϊκό πρότυπο προβλέπεται μέγιστη τιμή περιεχόμενης τέφρας στα βιοκαύσιμα ίση με 3% [13] [14].

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν ο προσδιορισμός της θερμαντικής αξίας και της περιεχόμενης τέφρας του ξύλου και του φλοιού Μεσογειακών δασικών ειδών πλατυφύλλων όπως και η σχέση των δυο αυτών θερμικών ιδιοτήτων για τα εξετασθέντα είδη.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας, πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία ξυλώδους βιομάζας από τα αειφύλλα πλατύφυλλα δασικά είδη: *Arbutus unedo* (κουμαριά), *Quercus ilex* (αριά), *Quercus coccifera* (πρίνος - πουρνάρι), *Erica arborea* (ερείκι) and *Phillyrea latifolia* (φιλικί). Η δειγματοληψία πραγματοποιήθηκε από δάση της ανατολικής Χαλκιδικής και το δείγμα αποτελούσαν από κορμίδια διαμέτρου έως 10cm, τα οποία προερχόταν από υλικό υλοτομίας για παραγωγή καυσοξύλων. Για συγκριτικούς λόγους έγινε επιπλέον δειγματοληψία κορμών από οξιά (*Fagus sylvatica*) και όστρια (*Ostrya carpinifolia*) καθώς τα εν λόγω είδη φύονται στην Χαλκιδική και το ξύλο τους παραδοσιακά χρησιμοποιείται για καυσόξυλα. Όλα τα ανωτέρω δείγματα θρυμματίστηκαν με φορητό θρυμματιστή και ακολούθως ελήφθησαν μικρότερα δείγματα

μάζας περίπου 0,5Kg από έκαστο με τη μέθοδο δημιουργίας κώνου και λήψης τεταρτημόριου (coning and quartering). Ακολούθως τα δείγματα ξηράθηκαν ελεύθερα στον αέρα, κονιοποιήθηκαν με μύλο τύπου Wiley σε διαστάσεις μικρότερες από 0,7mm και υπέστησαν ήπια ξήρανση μέχρι σταθερής μάζας σε φούρνο υπό θερμοκρασία $60\pm 1^{\circ}\text{C}$ για χρονικό διάστημα 2 εβδομάδων. Το ποσοστό περιεχόμενου φλοιού υπολογίστηκε ως το πηλίκιο της επιφάνειας του φλοιού σε μια εγκάρσια επιφάνεια κορμιδίου προς τη συνολική επιφάνεια τομής αυτής. Πραγματοποιήθηκαν 30 επαναλήψεις της ως άνω μέτρησης για κάθε υλικό της παρούσας έρευνας.

Για τον προσδιορισμό της περιεχόμενης τέφρας εφαρμόστηκε η μεθοδολογία που περιγράφεται στο ευρωπαϊκό πρότυπο EN 14775:2004 [15]. Δείγματα μάζας τουλάχιστον 1g ζυγίστηκαν με ανάλυση 0.1mg σε προζυγισμένα χωνευτήρια πορσελάνης και μεταφέρθηκαν σε κρύο κλίβανο αποτέφρωσης τύπου Heraeus MR 170 με ρυθμό ανανέωσης αέρα περίπου 5 φορές το λεπτό. Η θερμοκρασία του κλίβανου αυξήθηκε στους 250°C μέσα σε χρονικό διάστημα 50min και διατηρήθηκε σε αυτό το επίπεδο για 60min. Στη συνέχεια η θερμοκρασία αυξήθηκε με σταθερό ρυθμό στους 550°C μέσα σε χρονικό διάστημα 60min και διατηρήθηκε σε αυτό το επίπεδο για 3h. Έπειτα τα χωνευτήρια μεταφέρθηκαν σε κενό ξηραντήριο (desiccator) χωρίς καπάκι για 5min και με αεροστεγώς κλειστό καπάκι για 15min και μετά ζυγίστηκαν. Για να διασφαλιστεί η πλήρης αποτέφρωση των δειγμάτων, τα χωνευτήρια επανατοποθετήθηκαν στον κλίβανο για διαστήματα των 30min στους 550°C και επαναζυγίστηκαν έως ότου οι μεταβολή μάζας και κάθε ένα από αυτά να μην είναι μεγαλύτερη από 0.2mg. Η περιεχόμενη τέφρα (επί της ξηρής μάζας δείγματος) υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$Ad = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100$$

όπου:

m_1 : Η μάζα (g) του κενού χωνευτηρίου

m_2 : Η μάζα (g) του χωνευτηρίου και του ξηρού δείγματος

m_3 : Η μάζα (g) του χωνευτηρίου και της τέφρας

Οι προσδιορισμοί τέφρας πραγματοποιήθηκαν σε 3 επαναλήψεις για κάθε υλικό. Η θερμογόνος δύναμη εκφράστηκε με τον προσδιορισμό της υψηλής θερμαντικής αξίας (Higher Heating Value, HHV). Η υψηλή θερμαντική αξία αποτελεί το απόλυτο μέτρο της ειδικής θερμότητας καύσης εκφραζόμενο σε θερμίδες ανά μονάδα μάζας στερεού βιοκαυσίμου το οποίο καίγεται σε θερμιδόμετρο οβίδας υπό καθορισμένες συνθήκες. Η υψηλή θερμαντική αξία προσδιορίστηκε με θερμιδόμετρο τύπου Parr 1261 σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στο ευρωπαϊκό πρότυπο CEN/TS 14918:2005 [16]. Χρησιμοποιώντας υδραυλική πρέσα και κατάλληλη μήτρα δημιουργήθηκαν εργαστηριακά σύμπηκτα μάζας $1.0\pm 0.1\text{g}$ και διαμέτρου 13mm με εφαρμογή φορτίου περίπου 7tn για χρονικό διάστημα 1min. Τα σύμπηκτα ζυγίστηκαν με ανάλυση 0,0001g σε κάψα από ανοξείδωτο χάλυβα τέθηκαν σε επαφή με καλώδιο ανάφλεξης και ακολούθως τοποθετήθηκαν σε οβίδα τύπου Paar 1108. Η οβίδα συμπίεστηκε με οξυγόνο καθαρότητας τουλάχιστον 99.7% στα $30\pm 2\text{bar}$ και εμβαπτίστηκε σε κάδο από ανοξείδωτο χάλυβα ο οποίος περιείχε 2000.0ml απεσταγμένου νερού θερμοκρασίας $33\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Για την ελαχιστοποίηση θερμικών απωλειών ο μανδύας του θερμιδόμετρου ρυθμίστηκε σε θερμοκρασία 35°C με διακίνηση νερού. Για κάθε υλικό έγιναν 6 επαναλήψεις της ως άνω μεθόδου. Τα αποτελέσματα εκφράστηκαν σε cal/g. Δεν έγιναν διορθώσεις θείου και

χλωρίου διότι τα εν λόγω στοιχεία απαντώνται σε χαμηλές συγκεντρώσεις σε ξυλώδη βιοκαύσιμα [12]. Πριν από τις μετρήσεις έγινε βαθμονόμηση του θερμιδόμετρου με βενζοϊκό οξύ.

Οι μέσοι όροι υψηλής θερμαντικής αξίας των υλικών της παρούσας έρευνας συγκρίθηκαν με τη μέθοδο ANOVA ($\alpha=0,95$, LSD) χρησιμοποιώντας το στατιστικό πακέτο SPSS 18.0.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα των προσδιορισμών της παρούσας έρευνας παρουσιάζονται στους Πίνακες 1-2 και τις Εικόνες 3-5.

Πίνακας 1: Διάμετρος κορμών, πάχος φλοιού και αναλογία ξύλου:φλοιού για δοκιμασθέντα είδη				
Είδος	Διάμετρος κορμού ^a (cm)	Πάχος φλοιού ^a (mm)	Φλοιός (%)	Ξύλο (%)
<i>Quercus coccifera</i>	6.2 (2.3)	1.7 (0.20)	10.7	89.3
<i>Quercus ilex</i>	7.5 (1.6)	1.5 (0.19)	7.8	92.2
<i>Phillyrea latifolia</i>	6.8 (1.3)	2.0 (0.28)	11.4	88.6
<i>Arbutus unedo</i>	6.4 (2.1)	1.3 (0.15)	7.9	92.1
<i>Erica arborea</i>	4.1 (0.9)	1.7 (0.22)	15.9	84.1
<i>Fagus sylvatica</i>	15.7 (3.2)	3.5 (0.34)	8.7	91.3
<i>Ostrya carpinifolia</i>	8.8 (1.9)	2.4 (0.41)	10.5	89.5

^a: Αριθμητικός μέσος 30 επαναλήψεων, τυπική απόκλιση σε παρένθεση

Από τον Πίνακα 2 προέκυψε ότι σχετικά με τη θερμαντική αξία, όλα τα βιοκαύσιμα που δοκιμάστηκαν στην παρούσα έρευνα κάλυψαν τις απαιτήσεις του ευρωπαϊκού προτύπου EN 14961-2 (ελάχιστες επιτρεπόμενες τιμές: κλάση ENplus- A1 = 3940.96 cal/g, κλάση ENplus - A2 = 3893.19 cal/g, κλάση EN-B = 3821.53 cal/g). Σε σχέση με τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών [10], οι τιμές τέφρας και θερμαντικής αξίας για τα κοινώς εξετασθέντα είδη δεν παρουσίασαν μεταξύ τους μεγάλες διαφορές. Οι υψηλότερες τιμές υψηλής θερμαντικής αξίας παρουσιάστηκαν από το ξύλο του *Erica arborea* (4751.48 cal/g) και το φλοιό του *Phyllirea latifolia* (4956.91 cal/g). Τις χαμηλότερες τιμές υψηλής θερμαντικής αξίας ξύλου παρουσίασαν το *Quercus coccifera* (4454.56 cal/g) και το *Quercus ilex* χωρίς στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Σε ότι αφορά στον φλοιό, το *Quercus ilex* (4121.77 cal/g) παρουσίασε την χαμηλότερη θερμαντική αξία.

Με εξαίρεση το *Phyllirea latifolia*, όλα τα είδη της παρούσας έρευνας παρουσίασαν υψηλότερη θερμαντική αξία για το ξύλο από ότι για το φλοιό τους (στατιστικά σημαντικές διαφορές) ενώ για το *Erica arborea* οι διαφορές θερμαντικής αξίας μεταξύ ξύλου και φλοιού δεν ήταν στατιστικά σημαντικές ($\alpha=0.05$). Το *Erica arborea* ήταν το μόνο είδος μεταξύ των εξετασθέντων στην παρούσα έρευνα που παρουσίασε υψηλότερη θερμαντική αξία ξύλου από τα *Fagus sylvatica* και *Ostrya carpinifolia*.

Πίνακας 2: Αποτελέσματα προσδιορισμών και περιγραφικά στατιστικά μεγέθη τέφρας και υψηλής θερμαντικής αξίας (HHV) για τα υλικά της έρευνας

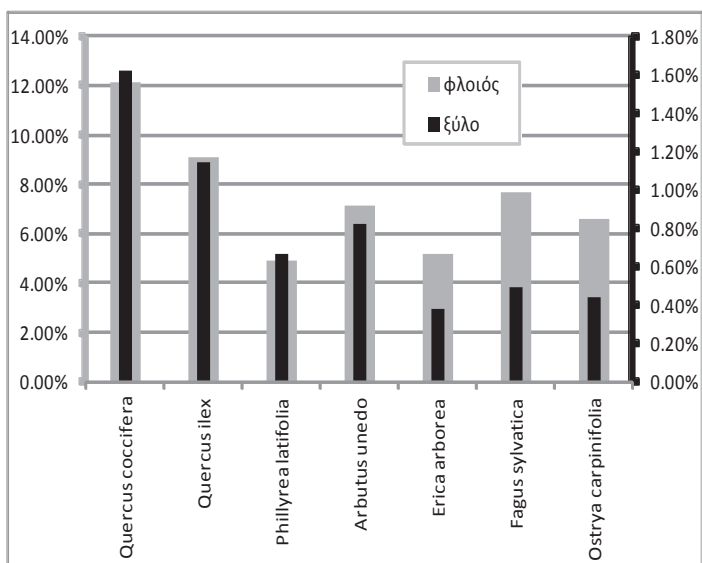
		<i>Quercus coccifera</i>		<i>Quercus ilex</i>		<i>Phillyrea latifolia</i>		<i>Arbutus unedo</i>		<i>Erica arborea</i>		<i>Fagus sylvatica</i>		<i>Ostrya carpinifolia</i>	
		ξύλο φλοιός		ξύλο φλοιός		ξύλο φλοιός		ξύλο φλοιός		ξύλο φλοιός		ξύλο φλοιός		ξύλο φλοιός	
Τέφρα (%)	MO ^a	1.62%	12.18%	1.14%	9.15%	0.67%	4.97%	0.83%	7.16%	0.39%	5.24%	0.50%	7.73%	0.44%	6.63%
	SD ^b	0.06%	0.09%	0.03%	0.11%	0.05%	0.12%	0.06%	0.14%	0.04%	0.13%	0.07%	0.53%	0.09%	0.01%
	CV ^c	3.53%	0.78%	2.25%	1.21%	7.96%	2.40%	6.99%	1.89%	9.55%	2.49%	14.43%	6.92%	20.69%	0.22%
	n ^d	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
HHV (cal/g)	MO	4455	4228	4468	4122	4583	4957	4575	4335	4751	4764	4590	4443	4589	4382
	SD	18.3	10.2	10.8	15.2	7.8	30.8	14.5	2.9	15.0	21.6	9.62	1.9	12.3	3.9
	CV	0.41%	0.24%	0.24%	0.37%	0.17%	0.62%	0.32%	0.07%	0.31%	0.45%	0.21%	0.04%	0.27%	0.09%
	n	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6

^a: Αριθμητικός μέσος

^b: Τυπική απόκλιση

^c: Συντελεστής διακύμανσης

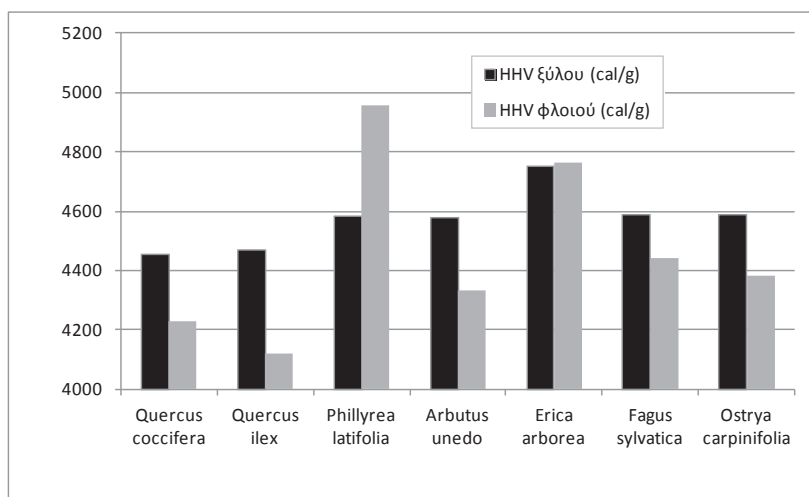
^d: πλήθος δοκιμών



Εικόνα 3: Περιεχόμενη τέφρα φλοιού (αριστερός κατακόρυφος άξονας) και ξύλου (δεξιός αριστερός κατακόρυφος άξονας) για τα υλικά της έρευνας

Αντίστοιχα σε ότι αφορά τη θερμαντική αξία του φλοιού, υψηλότερες τιμές από τα *Fagus sylvatica* και *Ostrya carpinifolia* παρουσίασαν τα *Erica arborea* και *Phyllirea latifolia*. Άξιο αναφοράς είναι και το γεγονός ότι το *Erica arborea*, αν και εμφάνισε τη χαμηλότερη διάμετρο και το μεγαλύτερο ποσοστό φλοιού, είχε την υψηλότερη θερμαντική αξία ξύλου και τη 2^η υψηλότερη του φλοιού μεταξύ όλων των ειδών.

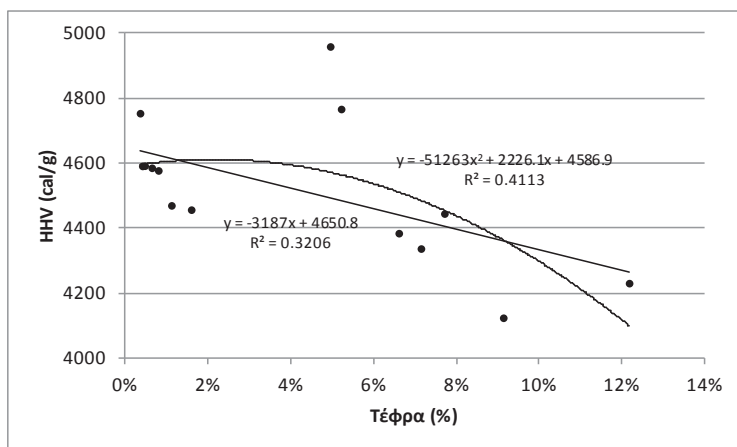
Σχετικά με το ποσοστό φλοιού στα εξετασθέντα είδη, αυτό κυμάνθηκε από 7.8% για το *Quercus ilex* έως 15.9% για το *Erica arborea*. Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2 και την Εικόνα 3, οι τιμές περιεχόμενης τέφρας για τα βιοκαύσιμα της παρούσας έρευνας κυμάνθηκε μεταξύ 0.39 και 12.18% ενώ οι τιμές υψηλής θερμαντικής αξίας κυμάνθηκαν μεταξύ 4121.77 - 4956.91 cal/g. Μεταξύ όλων των εξετασθέντων ειδών, τις υψηλότερες τιμές περιεχόμενης τέφρας παρουσίασε τόσο για το φλοιό (12.18%) όσο και για το ξύλο (1.62%) το *Quercus coccifera* ενώ οι χαμηλότερες παρατηρήθηκαν για το ξύλο του *Erica arborea* (0.39%) και το φλοιό του *Phyllirea latifolia* (4.97%). Επιπροσθέτως, το *Erica arborea* ήταν το μοναδικό είδος αειφύλλου πλατυφύλλου που παρουσίασε χαμηλότερες τιμές περιεχόμενης τέφρας ξύλου από τα *Fagus sylvatica* και *Ostrya carpinifolia*. Σε ότι αφορά την περιεχόμενη τέφρα του φλοιού, το *Erica arborea* και το *Phyllirea latifolia* ήταν τα μοναδικά που παρουσίασαν χαμηλότερες τιμές από τα *Fagus sylvatica* και *Ostrya carpinifolia*. Πρέπει επιπλέον να αναφερθεί ότι ο φλοιός όλων των εξετασθέντων ειδών, αν και έδωσαν επαρκείς τιμές υψηλής θερμαντικής αξίας, το ποσοστό της τέφρας σε κανένα από αυτά δεν βρίσκεται σε επίπεδα κάτω του 3% και επομένως δεν καλύπτει το πρότυπο EN 14961-2. Κατά συνέπεια, σε ότι αφορά την περιεχόμενη τέφρα και τη θερμογόνο δύναμη, ο φλοιός των αειφύλλων πλατυφύλλων μπορεί να συμπεριληφθεί στην παραγωγή σύμπηκτων αρκεί η χρήση τους να γίνει σε τέτοιες αναλογίες που θα διατηρούν τα ποσοστά περιεχόμενης τέφρας κάτω από τα όρια του ως άνω προτύπου.



Εικόνα 4: Υψηλή θερμαντική αξία του φλοιού και του ξύλου για υλικά της έρευνας

Στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται ένα γράφημα διασποράς των τιμών υψηλής θερμαντικής αξίας σε σχέση με τις τιμές περιεχόμενης τέφρας για τα βιοκαύσιμα της παρούσας

έρευνας. Επιπροσθέτως έχουν υπολογιστεί και παρασταθεί και οι εξισώσεις παλινδρόμησης 1^{ου} και 2^{ου} βαθμού όπως επίσης και οι αντίστοιχοι συντελεστές προσδιορισμού (R^2). Είναι προφανής η αρνητική επίδραση της περιεχόμενης τέφρας στην θερμαντική αξία των βιοκαυσίμων. Παρόλα αυτά οι συντελεστές προσδιορισμού για τα δυο μοντέλα που υπολογίστηκαν είναι χαμηλοί ($R^2 = 0.32$ για την ευθεία γραμμή προσαρμογής και $R^2 = 0.41$ για τη γραμμή 2^{ου} βαθμού), κάτι που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η περιεχόμενη τέφρα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεμονωμένα ως μέσο για την πρόβλεψη της θερμαντικής αξίας και ότι προφανώς πρέπει να ληφθούν υπόψη επιπλέον παράγοντες (π.χ. χημική σύσταση) κατά την κατασκευή σχετικών μοντέλων.



Εικόνα 5: Γράφημα διασποράς τιμών τέφρας και υψηλής θερμαντικής αξίας και καμπύλες/εξισώσεις παλινδρόμησης 1^{ου} και 2^{ου} βαθμού

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παρούσα έρευνα συμπεραίνεται ότι σε ότι αφορά την περιεχόμενη τέφρα και την θερμαντική αξία, το ξύλο των αειφύλλων πλατυφύλλων δασικών ειδών *Quercus coccifera*, *Quercus ilex*, *Arbutus unedo*, *Phillyrea latifolia* και *Erica arborea* όπως και αυτό των *Fagus sylvatica* και *Ostrya carpinifolia* μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πρώτη ύλη για την παραγωγή σύμπηκτων για μη βιομηχανικές χρήσεις καθώς καλύπτουν τις απαιτήσεις του ευρωπαϊκού προτύπου EN 14961-2 και για τις 3 κλάσεις ποιότητας. Από την άλλη πλευρά, ο φλοιός των ανωτέρω ειδών, αν και παρέχει επαρκείς τιμές θερμαντικής αξίας, το ποσοστό της περιεχόμενης τέφρας σε κανένα από αυτά δεν βρίσκεται σε επίπεδα κάτω του 3% και κατά συνέπεια δεν καλύπτει το ως άνω πρότυπο. Ως εκ τούτου ο φλοιός των αειφύλλων πλατυφύλλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή σύμπηκτων αρκεί η χρήση των πρώτων υλών να γίνεται σε τέτοιες αναλογίες που θα διατηρούν τα ποσοστά περιεχόμενης τέφρας των σύμπηκτων κάτω από τα όρια που τίθενται από τα σχετικά ευρωπαϊκά πρότυπα. Τέλος, για την κατασκευή μοντέλων πρόβλεψης της θερμαντικής αξίας, η περιεχόμενη τέφρα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί μεμονωμένα ως μέσο πρόβλεψης και πρέπει να ληφθούν υπόψη επιπλέον παράγοντες (π.χ. χημική σύσταση).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Telmo, C., Lousada, J., 2011. "Heating values of wood pellets from different species". *Biomass and Bioenergy*, 35 (7), pp. 2634-2639.
- [2] Haberl H, Geissler S. Cascade, 2000. "Utilization of biomass: strategies for a more efficient use of a scarce resource". *Ecol Eng*;16:S111-21.
- [3] Hoogwijk M, Faaij A, van den Broek R, Berndes G, Gielen D, Turkenburg W., 2003. "Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy". *Biomass Bioenergy*;25: 119-33.
- [4] Perlack, R.D. et al., 2005. "Biomass as Feedstock for a Bioenergy and Bioproducts Industry: The Technical Feasibility of a Billion-ton Annual Supply, DOE/GO-102005-2135". Prepared by Oak Ridge National Laboratory for the U.S. Department of Energy and U.S. Department of Agriculture, Washington, DC.
- [5] Demirbas A, 2007. "Modernization of biomass energy conversion facilities". *Energy Sources Part B*, 29:227-35.
- [6] Φιλίππου Ι., 2014. "Χημεία Και Χημική Τεχνολογία Ξύλου", εκδόσεις Γιαχούδη.
- [7] Viana, H., Vega-Nieva, D.J., Ortiz Torres, L., Lousada, J., Aranha, J., 2012. "Fuel characterization and biomass combustion properties of selected native woody shrub species from central Portugal and NW Spain". *Fuel*, 102, pp. 737-745.
- [8] Voulgaridis E., Passialis C., 1995. "Characteristics and technological properties of the wood of mediterranean evergreen hardwoods" *Valorisation*. XVI, n° I, pp 3-12.
- [9] Dimitrakopoulos, A., Panov, P., 2001. "Pyric properties of some dominant Mediterranean vegetation species". *International Journal of Wildland Fire*, 10, pp. 23–27.
- [10] Siafaca, L., Adamandiadou, S., Margaris, N., 1980. "Caloric Content in Plants Dominating Maquis Ecosystems in Greece". *Oecologia (Berl.)* 44, pp. 276-280.
- [11] Filbakk, T., Jirjis, R., Nurmi, J., Høibø, O., 2011. "The effect of bark content on quality parameters of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) pellets". *Biomass and Bioenergy*, 35 (8), pp. 3342-3349.
- [12] Lehtikangas P., 2001. "Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark", *Biomass and Bioenergy* 20, pp 351–360.
- [13] EN 14961-2: 2011. Solid biofuels. Fuel specification and classes - Part 2: Wood pellets for non-industrial use.
- [14] European Pellet Council, 2013. "Handbook for the certification of wood pellets for heating purposes". <http://www.enplus-pellets.eu> (Last accessed on 26/04/2014).
- [15] EN 14775:2009. Solid biofuels. Determination of ash content.
- [16] CEN/TS 14918:2005. Solid biofuels. Method for the determination of calorific value.

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΔΑΣΙΚΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΗ ΣΥΜΒΟΛΗ

Ι. Λ. Φιλίππου

Τμήμα Δασολογίας & Φυσικού Περιβάλλοντος, ΑΠΘ
54124 Θεσσαλονίκη, e-mail : jfilippo@for.auth.gr

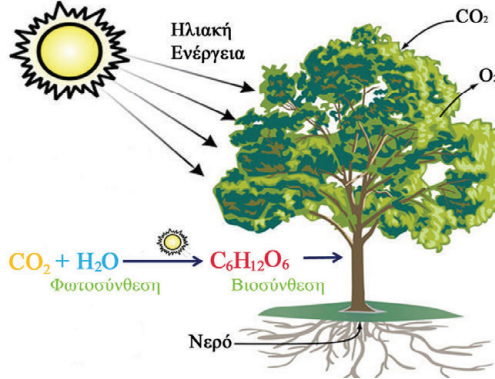
ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η προβλεπόμενη εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και κυρίως η αυξανόμενη ανησυχία για τις εκπομπές CO₂ και τις επιπτώσεις στη κλιματική αλλαγή έχουν στρέψει το παγκόσμιο ενδιαφέρον στη βιομάζα και ιδιαίτερα στη δασική βιομάζα για παραγωγή ενέργειας. Η δασική βιομάζα ως πηγή ενέργειας αποκτά επίσης ολοένα και περισσότερο οικονομικό και αναπτυξιακό ενδιαφέρον, ιδιαίτερα για την Ελλάδα. Στην παρούσα εργασία γίνεται μία ανασκόπηση των διαφόρων ειδών δασικής βιομάζας, των συστημάτων μετατροπής της στις διάφορες μορφές καύσιμων υλικών (στερεών, υγρών, αερίων) και μορφών ενέργειας, αναλύονται οι δυνατότητες παραγωγής και αξιοποίησης δασικής βιομάζας στην Ελλάδα για παραγωγή ενέργειας και τονίζεται η συμβολή της στην περιφερειακή ανάπτυξη της χώρας. Τέλος, γίνονται τεκμηριωμένες προτάσεις για τη πληρέστερη και ορθολογικότερη παραγωγή και αξιοποίηση της δασικής βιομάζας όπως εισαγωγή σύγχρονων μεθόδων διαχείρισης των δασών και των δασικών εκτάσεων και νέων προτύπων αξιοποίησης της συνολικής ξυλώδους δασικής βιομάζας που παράγεται σε αυτά, δημιουργία κέντρων διακίνησης, εφοδιασμού και εμπορίας στερεών βιοκαυσίμων, ανάπτυξη ενός σύγχρονου πληροφοριακού συστήματος αξιοποίησης και ελέγχου της αλυσίδας παραγωγής και διακίνησης των δασικών βιοκαυσίμων, εφαρμογή των διεθνών τεχνικών και ποιοτικών προδιαγραφών παραγωγής και ελέγχου της ποιότητας των στερεών βιοκαυσίμων.

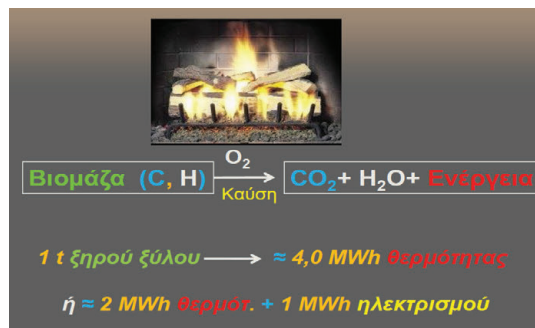
Λέξεις κλειδιά: Μορφές δασικής βιομάζας, μέθοδοι παραγωγής ενέργειας, στερεά, υγρά και αέρια βιοκαύσιμα, περιβαλλοντική συμβολή, αναπτυξιακή συμβολή.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η προβλεπόμενη εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και κυρίως η αυξανόμενη ανησυχία για τις εκπομπές CO₂ και τις επιπτώσεις στη κλιματική αλλαγή έχουν στρέψει το παγκόσμιο ενδιαφέρον στη βιομάζα και ιδιαίτερα στη δασική βιομάζα για παραγωγή ενέργειας. Η βιομάζα παρουσιάζει το μεγάλο πλεονέκτημα ότι είναι ανανεώσιμη φυσική ύλη. Αναπαράγεται συνεχώς με δέσμευση ηλιακής ενέργειας και CO₂ μέσω της φωτοσύνθεσης (Σχήμα 1). Υπολογίζεται ότι η φωτοσύνθεση ανανεώνει τη βιομάζα στον κόσμο με σχηματισμό περίπου 150 δισεκατομμυρίων τόνων άνθρακα ετησίως. Η πηγή αυτή άνθρακα αντιπροσωπεύει περίπου 50 φορές περισσότερη ενέργεια από την παγκόσμια ετήσια κατανάλωση. Ορθολογική μετατροπή ενός μικρού μέρους της βιομάζας αυτής σε ενέργεια (Σχήμα 2) θα ήταν δυνατό να καλύψει ένα μεγάλο μέρος των αναγκών του ανθρώπου σε ενέργεια.



Σχήμα 1. Δέσμευση ηλιακής ενέργειας μέσω φωτοσύνθεσης



Σχήμα 2. Απελευθέρωση ηλιακής ενέργειας από τη βιομάζα

Ιστορικά η βιομάζα, ειδικότερα το ξύλο, έχει υπηρετήσει, ως πηγή ενέργειας τον άνθρωπο από τότε που ανακαλύφθηκε η φωτιά. Συνεχίζει και σήμερα να χρησιμοποιείται σε μεγάλες ποσότητες για την κάλυψη πολλών αναγκών σε ενέργεια, τόσο σε οικιακή όσο και σε βιομηχανική κλίμακα. Περίπου 50% της παγκόσμιας ετήσιας ποσότητας συγκομιζόμενου ξύλου (περί τα 3.500.000.000 m³) χρησιμοποιείται σήμερα ως καύσιμη ύλη. Υπάρχουν όμως αναξιοποίητες μεγάλες ποσότητες δασικής βιομάζας που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για ενέργεια καθώς και μεγάλες δυνατότητες να αυξηθεί η παραγωγή δασικής βιομάζας [1,2,3,4,5,6]. Η παραγωγή ενέργειας από δασική βιομάζα μπορεί να δημιουργήσει θέσεις εργασίας και να τονώσει την οικονομική ανάπτυξη κυρίως της υπαίθρου.

2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στον Πίνακα 1 δίνονται συνοπτικά τα συστήματα παραγωγής ενέργειας και στο Σχήμα 3 οι θερμολυτικές μέθοδοι μετατροπής της δασικής βιομάζας σε ενέργεια.

Πίνακας 1: Συστήματα παραγωγής ενέργειας από δασική βιομάζα [7]

Μορφές δασικής βιομάζας	Επεξεργασία	Μορφή καυσίμου	Μορφές Ενέργειας
<ul style="list-style-type: none"> - Καυσόξυλα <ul style="list-style-type: none"> - Ξύλο θρυμματισμού - Υπολείμματα κατεργασίας - Υπολείμματα υλοτομιών - Χρησιμοποιημένο ξύλο - Βιομάζα από ενεργειακές φυτείες - Άλλες 	<p>Μηχανική</p> <ul style="list-style-type: none"> - Κοπή - Θρυμματισμός - Παραγωγή πελλετών, μπριγκέτων <p>Άμεση καύση</p> <p>Πυρόλυση</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ανθρακοποίηση - Ξηρή απόσταξη - Υγροποίηση - Αεριοποίηση <p>Βιολογική - Ζύμωση</p>	<p>Στερεά καύσιμα</p> <ul style="list-style-type: none"> - Καυσόξυλα - Ξυλοτεμαχίδια - Βιοάνθρακας - Πελλέτες - Μπριγκέτες <p>Υγρά καύσιμα</p> <ul style="list-style-type: none"> - Βιοέλαιο - Fiesher-Troesch Ντίζελ - Βιοαιθανόλη - Βιομεθανόλη <p>Αέρια καύσιμα</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ξυλαέριο - Συνθετικό αέριο - Βιοϋδρογόνο 	<p>Θέρμανση με καύση</p> <ul style="list-style-type: none"> - Οικιακή θέρμανση, μαγειρική - Κεντρική θέρμανση - Τηλεθέρμανση <p>Ηλεκτρισμός-Θέρμανση (ΣΗΘ)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Με ατμοστρόβιλους - Με αεριοστρόβιλους - Με μηχανές καύσης - Με τον οργανικό κύκλο Rankle <p>Μεταφορές</p> <ul style="list-style-type: none"> - Μηχανές εσωτερικής καύσης - Κυψέλες καυσίμων

2.1. ΔΑΣΙΚΗ ΒΙΟΜΑΖΑ

Η δασική βιομάζα ως πρώτη ύλη για παραγωγή ενέργειας απαντά σε διάφορες μορφές όπως καυσόξυλα, υπολείμματα βιομηχανικής και βιοτεχνικής κατεργασίας του ξύλου, χρησιμοποιημένα (ανακυκλωμένα) προϊόντα ξύλου και χαρτιού, υπολείμματα υλοτομιών (κορυφές, κλάδοι, φύλλωμα, πρέμνα, ρίζες, φλοιός), δένδρα μικρών διαστάσεων από καλλιεργητικές αραιώσεις, ξύλο και φύλλωμα αειφυλλων πλατυφύλλων και θάμνων, βιομάζα τεχνικών ενεργειακών δασών κ.α.

2.2. ΣΤΕΡΕΑ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ

Τα στερεά βιοκαύσιμα παράγονται επίσης σε διάφορες μορφές όπως καυσόξυλα, ξυλοτεμαχίδια (*chips*), θρύμματα (*hog fuel*), ξυλόσκονη, μπριγκέτες (τεχνητό καυσόξυλο,

wood briquettes) και συμπυκνώματα ή σύμπηκτα ξύλου (πελλέτες, wood pellets), ξυλάνθρακας (biochar), καρβουνομπριγκέτες (charcoal briquettes) (Εικόνα 1). Οι πελλέτες (wood pellets) είναι σχετικά νέα και αναβαθμισμένη μορφή στερεού καυσίμου (επίσημα ονομάζονται *εξευγενισμένα στερεά καύσιμα βιομάζας*). Για τα ξυλώδη στερεά καύσιμα που προορίζονται για παραγωγή ενέργειας σε κατοικίες, εμπορικά και δημόσια κτίρια έχουν εκδοθεί ευρωπαϊκές προδιαγραφές με τη περιγραφή και τα επιτρεπόμενα χαρακτηριστικά όπως το EN 14961-1 με τους ορισμούς και τις ιδιότητες των ξυλωδών πρώτων υλών, το EN 14961-2 για τις πελλέτες, το EN 14961-3 για τις μπριγκέτες, το EN 14961 – 4 για τα ξυλοτεμαχίδια που δεν προορίζονται για βιομηχανική χρήση (wood chips for non-industrial use), το EN 14961-5 για τα καυσόξυλα και το EN 1860 1 έως 4 για το ξυλάνθρακα και τις καρβουνομπριγκέτες.



Εικόνα 1: Στερεά ξυλώδη βιοκαύσιμα [7].

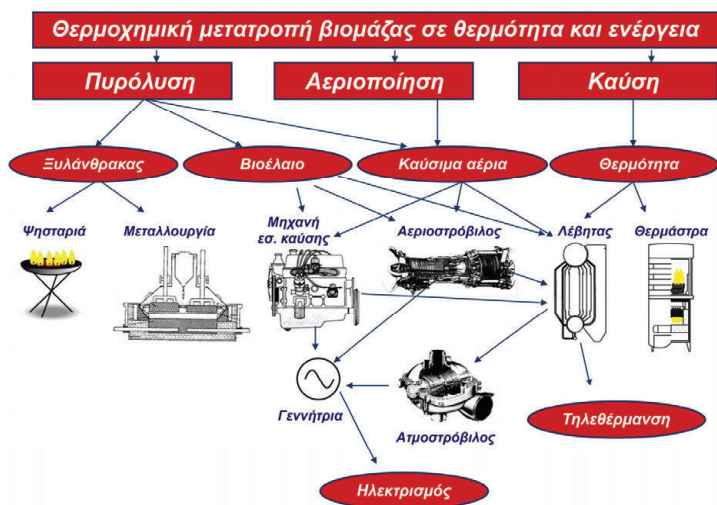
2.3. Καύση - Τεχνικές καύσης

Σήμερα, όπως και στο παρελθόν ο ευκολότερος τρόπος παραγωγής ενέργειας από τη δασική βιομάζα είναι η άμεση καύση του. Καύση ξυλώδους βιομάζας για παραγωγή ενέργειας γίνεται σε τρεις τομείς:

1. στον οικιακό τομέα όπου χρησιμοποιείται για μαγείρεμα, θέρμανση χώρων και νερού.
2. σε πολυκατοικίες ή άλλα μεγάλα κτιριακά συγκροτήματα όπως νοσοκομεία, σχολεία, δημοτικά κτίρια ή ολόκληρα οικιστικά συγκροτήματα με τηλεθέρμανση (*district heating plants*) για θέρμανση χώρων και νερού
3. σε βιομηχανίες, κυρίως επεξεργασίας ξύλου, για ξήρανση, άτμιση, θέρμανση ή/και παραγωγή ηλεκτρισμού ή σε ανεξάρτητες μονάδες παραγωγής ηλεκτρισμού, θερμότητας ή συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Σε κατοικίες η καύση γίνεται σε τζάκια και σόμπες. Τα πατροπαράδοτα ή τυπικά τζάκια έχουν πολύ μικρή απόδοση που κυμαίνεται μεταξύ 10 και 20%. Η ημιτελής καύση του ξύλου στα τζάκια, και λιγότερο σε συμβατικές σόμπες, έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή CO₂, αιωρούμενων μικροσωματιδίων, αιθάλης και μιας αποκρουστικής οσμής που μολύνουν τόσο το εξωτερικό περιβάλλον όσο και τον εσωτερικό χώρων οικιών. Σύγχρονα τζάκια, τα καλούμενα *ενεργειακά τζάκια*, καίνε κυρίως καυσόξυλα και πελλέτες, διαθέτουν θάλαμο δευτερογενούς καύσης των καυσαερίων, εκπέμπουν πολύ λίγα καυσαέρια και η απόδοση τους κυμαίνεται μεταξύ 80 και 85%. Οι τυπικές ή συμβατικές σόμπες καίνε κυρίως καυσόξυλα (*ξυλόσομπες*), έχουν απόδοση που κυμαίνεται από 35-60% και παράγουν πολλά καυσαέρια. Οι σύγχρονες σόμπες καίνε πελλέτες (*pellet stoves*), έχουν δυνατότητα ρύθμισης της καύσης και έχουν μεγάλη απόδοση (80-90%) και πολύ χαμηλό επίπεδο καυσαερίων. Είναι επίσης δυνατό να συνδεθούν με λέβητα και να ζεσταίνουν νερό για θέρμανση άλλων χώρων όπως και τα ενεργειακά τζάκια.

Ξύλο χρησιμοποιείται για θέρμανση μεγάλων οικιστικών συγκροτημάτων (πολυκατοικίες, νοσοκομεία κ.λ.π.) σε καυστήρες-λέβητες κεντρικής θέρμανσης. Το κύριο πρόβλημα της χρησιμοποίησης καυσόξυλων είναι η απαίτηση μεγάλων αποθηκευτικών χώρων (το ξύλο



Σχήμα 3: Εναλλακτικές μέθοδοι παραγωγής ενέργειας από δασική βιομάζα [Διασκευή από 8]

έχει μικρή πυκνότητα και πολύ μικρή χωρική πυκνότητα) και η αδυναμία αυτόματης τροφοδοσίας του καυστήρα. Σύγχρονοι όμως καυστήρες χρησιμοποιούν ξυλοτεμαχίδια (*chips*), θρύμματα (*hog fuel*) και κυρίως συμπυκνώματα (*pellets*) που έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα, απαιτούν μικρότερους αποθηκευτικούς χώρους και διευκολύνουν την αυτόματη τροφοδοσία (Σχήμα 4). Σύγχρονοι καυστήρες έχουν απόδοση 80-90%.

Ξύλο χρησιμοποιείται σε βιομηχανικό επίπεδο με καύση για παραγωγικές διεργασίες όπως για ξήρανση, για παραγωγή ατμού για άτμιση, θέρμανση και άλλες βιομηχανικές ανάγκες ή/και για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην αξιοποίηση του αυτή το ξύλο χρησιμοποιείται κυρίως σε μορφή μικρών διαστάσεων (ξυλοτεμαχίδια-chips, ξυλόσκηνη ή πελλέτες) και καίγεται σε ειδικούς καυστήρες (φούρνους-*furnaces*). Στις βιομηχανίες κατεργασίας ξύλου και παραγωγής χαρτοπολτού για παραγωγή της απαιτούμενης βιομηχανικής ενέργειας χρησιμοποιούνται κυρίως τα υπολείμματα τους.

Γενικά, το ξύλο μπορεί να καεί σε μικρής κλίμακας μοντέρνους λέβητες ατμού για σκοπούς θέρμανσης ή σε μεγαλύτερους λέβητες για τη παραγωγή τηλεθέρμανσης, ηλεκτρικής ενέργειας ή για συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΘ, CHP). Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για ταυτόχρονη καύση με μαζούτ. Στους σύγχρονους λέβητες ατμού η αξιοποίηση της θερμαντικής αξίας του ξύλου κυμαίνεται από 80 έως 90% και υπάρχουν συστήματα καθαρισμού των καυσαερίων ώστε να περιορίζεται στο ελάχιστο η μόλυνση του περιβάλλοντος.



Σχήμα 4: Αυτόματη τροφοδοσία λέβητα κεντρικής θέρμανσης με *wood pellets*.

2.4. ΠΥΡΟΛΥΣΗ

Πυρόλυση δασικής βιομάζας λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες 300-900 °C και δίνει ξυλάνθρακα, μίγμα υγρών και μίγμα αερίων προϊόντων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή ενέργειας ή/και χημικών προϊόντων. Ανάλογα με το κύριο (επιθυμητό) προϊόν, τις συνθήκες και τις τεχνητές παραγωγής, η πυρόλυση διακρίνεται σε *ανθρακοποίηση* (*carbonization*), σε *αργή πυρόλυση* (*slow pyrolysis*) και *ταχεία πυρόλυση* (*fast pyrolysis*). Ανθρακοποίηση σε χαμηλές θερμοκρασίες ονομάζεται *καβούρντισμα* του ξύλου (*wood torrefaction*) και το παραγόμενο προϊόν *καβουρντισμένο ξύλο* (*torrefied wood*).

2.4.1. ΑΝΘΡΑΚΟΠΟΙΗΣΗ

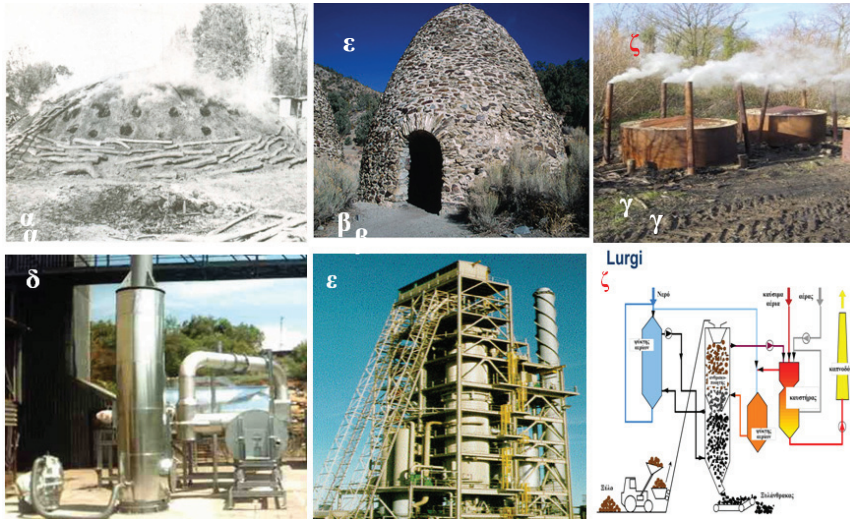
Ο όρος ανθρακοποίηση χρησιμοποιείται κυρίως όταν το παραγόμενο προϊόν είναι ξυλάνθρακας (*charcoal* ή *biochar*). Βασικός σκοπός της ανθρακοποίησης είναι ο εμπλουτισμός του υλικού σε άνθρακα με την απομάκρυνση των άλλων συστατικών του. Η απομάκρυνση των υγρών και αερίων συστατικών επιτρέπει την αύξηση της θερμαντικής αξίας και μια καθαρότερη καύση με λίγο ή καθόλου καπνό και φλόγα.

Η παραγωγή ξυλάνθρακα είναι σχετικά απλή, γίνεται σε θερμοκρασία 400-500 °C και διαρκεί ανάλογα με την επιθυμητή ποιότητα του ξυλάνθρακα, το είδος της δασικής βιομάζας, το ποσοστό υγρασίας του και τον τύπο της εγκατάστασης παραγωγής του από λίγες ώρες έως 7 ημέρες. Υπάρχουν διάφοροι τύποι εγκαταστάσεων παραγωγής ξυλάνθρακα [9,10] (Εικόνα 2). Ο πατροπαράδοτος τύπος είναι τα ανθρακοκάμινια (*earth mound kiln*, *earth pit kiln*, *charcoal kilns*), τα μεταλλικά (σταθερά ή φορητά). Σε νεότερους τύπους εγκαταστάσεων (*retort furnaces*) η παραγωγή ξυλάνθρακα είναι συνεχής, οικογενειακή ή βιομηχανική. Στα καμίνια γίνεται ανθρακοποίηση κυρίως καυσόξυλων ενώ στις νεότερες εγκαταστάσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλα τα είδη δασικής βιομάζας. Ο ξυλάνθρακας μπορεί να μετατραπεί σε καρβουνομπριγκέτες (*charcoal briquettes*) και να χρησιμοποιηθεί ως βελτιωμένο καύσιμο (βλ. Εικόνα 1).

Το *καβούρντισμα* (*φρύξη*, *torrefaction*) του ξύλου είναι μια ήπια μορφή ανθρακοποίησης του και λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες μεταξύ 200 και 320 °C και ατμοσφαιρική πίεση. Το καβουρντισμένο ξύλο (*torrefied wood*) είναι βελτιωμένο καύσιμο σε σχέση με το ξύλο. Για τη παραγωγή καβουρντισμένου ξύλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες οι μορφές ξυλώδους βιομάζας (*torrefied biomass*) [11].

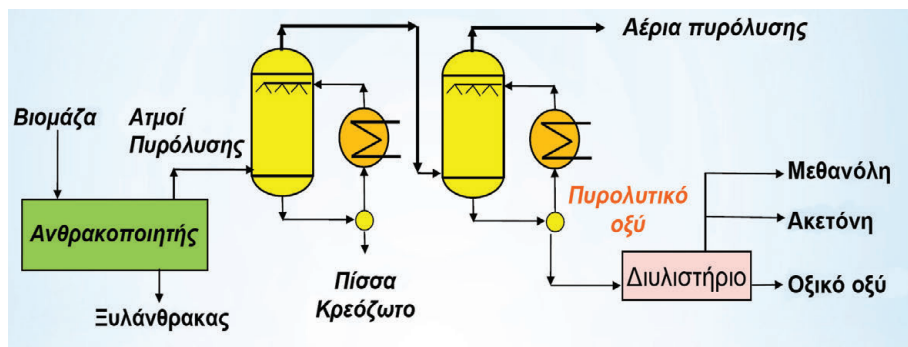
2.4.2. ΑΡΓΗ ΠΥΡΟΛΥΣΗ (SLOW PYROLYSIS)

Με την *αργή πυρόλυση* επιδιώκεται εκτός από την παραγωγή ξυλάνθρακα, η αξιοποίηση των υγρών και αερίων προϊόντων της πυρόλυσης είτε ως καυσίμων υλικών είτε ως βάση για την παραγωγή χημικών προϊόντων (Σχήμα 5). Η αργή πυρόλυση είναι επίσης γνωστή και ως καταστρεπτική απόσταξη του ξύλου (*destructive distillation of wood*). Η καταστρεπτική απόσταξη του ξύλου ήταν το πρώτο βιοδιυλιστήριο του ανθρώπου. Είναι γνωστό ότι κλασματική απόσταξη ξύλου γινόταν στην αρχαία Κίνα. Οι αρχαίοι Αιγύπτιοι,



Εικόνα 2: Τεχνολογίες παραγωγής ξυλάνθρακα: α. καμίνι εδάφους, β. πετρώκτιστο καμίνι, γ. μεταλλικό καμίνι. δ. σύγχρονο μεταλλικό μικρής συνεχούς παραγωγής, ε. βιομηχανική μονάδα παραγωγής (σύστημα *Lambiotte*), ζ. Απλοποιημένο διάγραμμα βιομηχανικής παραγωγής ξυλάνθρακα με το σύστημα *Lurgi* [7].

Έλληνες και Ρωμαίοι χρησιμοποιούσαν την πυρόλυση για παραγωγή ξυλάνθρακα και παράλληλα χρησιμοποιούσαν τα υγρά της πυρόλυσης (κυρίως τη πίσσα) στην ναυπηγική. Μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα το ξύλο (κυρίως πλατυφύλλων) αποτελούσε την κύρια πρώτη ύλη για παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων μεθανόλης, οξικού οξέος και ακετόνης.



Σχήμα 5: Διάγραμμα αργής πυρόλυσης δασικής βιομάζας [12]

2.4.3. ΥΓΡΟΠΟΙΗΣΗ–ΤΑΧΕΙΑ ΠΥΡΟΛΥΣΗ

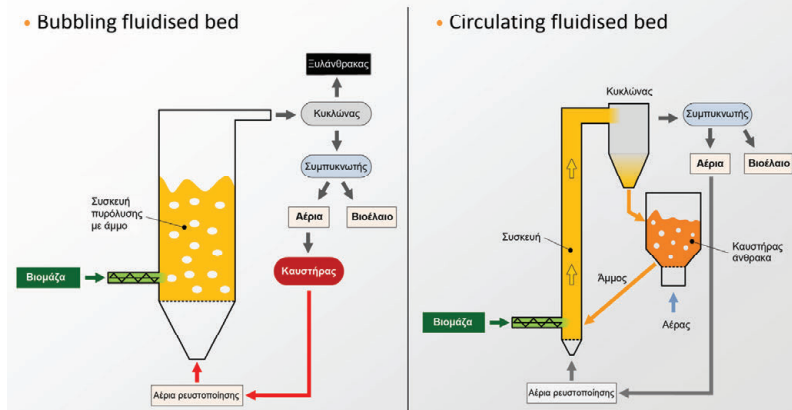
Η θερμική υγροποίηση (*thermal liquefaction*) γίνεται με ταχεία πυρόλυση (*fast pyrolysis*) και αποβλέπει στη μετατροπή του ξύλου και γενικότερα της φυτικής βιομάζας σε υγρά (*πυρολυτικό λάδι ή βιοέλαιο*) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα υψηλής θερμαντικής αξίας ή/και ως χημική πλατφόρμα για την παραγωγή πολύτιμων χημικών προϊόντων.

Ταχεία πυρόλυση λαμβάνει χώρα όταν το ξύλο θερμαίνεται με μεγάλη ταχύτητα στους 450-700 °C (για 1-3 δευτερόλεπτα), απουσία αέρα. Πολλές παραλλαγές της βασικής μεθόδου ταχείας πυρόλυσης έχουν αναπτυχθεί (*Circulating Fluidized Bed Pyrolysis, Bubbling Fluidized Bed Pyrolysis, Rotating Cone, Entrained Flow, Moving Bed or Auger Pyrolysis, Ablative pyrolysis* κλπ) και η τεχνολογία εξελίσσεται γρήγορα [13,14]. Οι μέθοδοι διαφέρουν κυρίως στο τύπο του αντιδραστήρα πυρόλυσης, στις συνθήκες πυρόλυσης και στον τρόπο χειρισμού των παραγομένων αερίων και του ξυλάνθρακα. Στο Σχήμα 6 δίνονται ενδεικτικά διαγράμματα ροής δύο μεθόδων.

Θεωρικά, το 75 % της δασικής βιομάζας μπορεί να μετατραπεί σε βιοέλαιο, αλλά στη πράξη η απόδοση είναι χαμηλότερη. Το βιοέλαιο αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό χημικών ενώσεων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο ή να αποτελέσει πρώτη ύλη *βιοδιυλιστηρίου* για διύλιση του σε διάφορα χημικά όπως και το αργό πετρέλαιο [15]. Ως καύσιμο μπορεί να αντικαταστήσει το μαζούτ σε λέβητες οικιακής, κεντρικής και τηλεθέρμανσης, σε λέβητες ατμού, σε αεριοστρόβιλους για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θέρμανσης ή να αεριοποιηθεί για να παραχθούν καύσιμα μηχανών εσωτερικής ή χημικά. Σήμερα καταβάλλονται πολλές βιομηχανικές προσπάθειες για την αναβάθμιση του βιοελαίου (by *hydrotreating, hydrocracking*) ώστε να καταστεί κατάλληλο ως καύσιμο σε κινητήρες εσωτερικής καύσης [16]. Υπάρχουν μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις υγροποίησης του ξύλου, αλλά και μικρές μονάδες σταθερές ή μετακινούμενες. Οι δεύτερες μπορούν να μεταφερθούν σε δασοπλατείες ή δασοδρόμους [17].

Fast pyrolysis

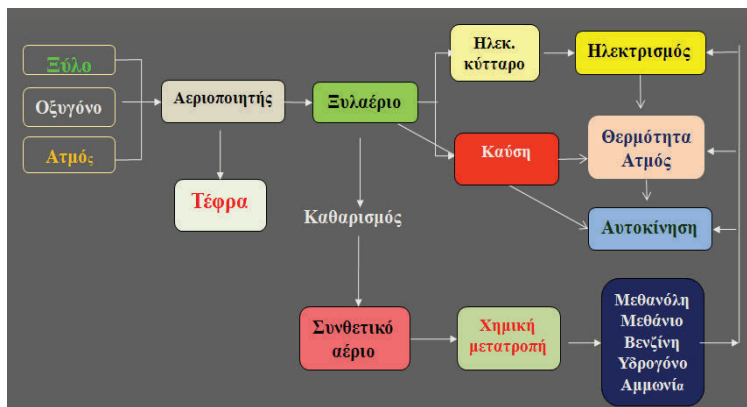
Forebiom Workshop 2013



Σχήμα 6: Ταχεία πυρόλυση ξύλου: Α. με τεχνολογία *Bubbling Fluidized Bed Pyrolysis*, Β. *Circulating Fluidized Bed Pyrolysis*. Στην Α μέθοδο ο παραγόμενος ξυλάνθρακας αποχωρίζεται και χρησιμοποιείται για παραγωγή ενέργειας ή για άλλες χρήσεις. Στη Β μέθοδο παράγεται μόνο βιοέλαιο, ο άνθρακας επανακυκλώνεται και καίγεται στο σύστημα [14].

2.5. ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ

Με την αεριοποίηση της δασικής βιομάζας επιδιώκεται η μετατροπή όλης της οργανικής ύλης σε αέρια (ξυλαέριο) τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή ενέργειας με άμεση καύση ή να μετατραπούν σε καύσιμα υγρά και αέρια με υψηλότερη θερμαντική αξία ή σε χημικά προϊόντα (Σχήμα 7). Για τον σκοπό αυτό η αεριοποίηση γίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες (1000-1400°C) παρουσία περιορισμένης και ελεγχόμενης ποσότητας αέρα ή οξυγόνου ώστε τα κύρια προϊόντα να είναι μονοξειδίο του άνθρακα και υδρογόνο (συνθετικό αέριο). Αεριοποίηση παρουσία ατμού σε θερμοκρασία 900 -1000 °C ή/και παρουσία καταλυτών σε χαμηλότερες θερμοκρασίες (500 -700 °C)



Σχήμα 7: Σχήμα αεριοποίησης ξύλου για παραγωγή ενέργειας και χημικών[7].

αυξάνει σημαντικά το ποσοστό του υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα στο μίγμα των αερίων και ανάλογα την θερμαντική αξία του. Η απόδοση σε συνθετικό αέριο κυμαίνεται μεταξύ 70-80%. Η αεριοποίηση της δασικής βιομάζας μπορεί να γίνεται σε μεγάλες βιομηχανικές ή μικρές εγκαταστάσεις για παραγωγή ηλεκτρισμού, θερμότητας ή για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (Εικόνα 3.). Μικρές μονάδες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θέρμανση καυστήρων κεντρικής θέρμανσης ή για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας για τη κάλυψη μικρών αγροτικών αναγκών. Οι ξυλοαεριοποιητές μπορεί να έχουν και πολύ μικρό

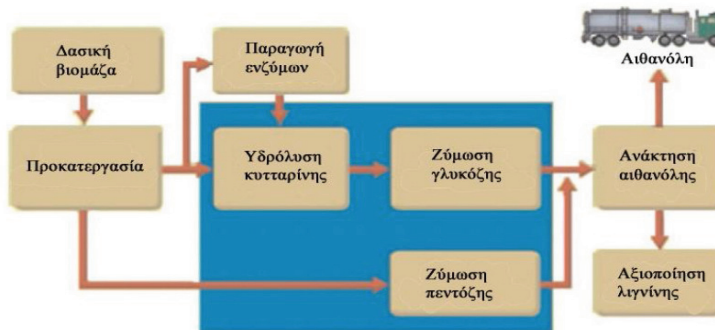


Εικόνα 3: Μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θέρμανσης με αεριοποίηση υπολειμμάτων κατεργασίας ξύλου (δυναμικότητα 150 kWh ηλεκτρισμού και 300 kWh θερμότητας, 1 Kg ξηρού ξύλου = 1 kWh ηλεκτρισμού + 2 kWh θερμότητας)

μέγεθος. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση των ξυλοαεριοποιητών που χρησιμοποιούνται για κίνηση αυτοκινήτων [18]. Η χρησιμοποίηση αεροποιητών ξύλου για κίνηση αυτοκινήτων ήταν ευρύτατη πριν και κατά τη διάρκεια του δεύτερου παγκοσμίου πολέμου. Χρησιμοποιούνται και σήμερα για τη κίνηση αυτοκινήτων κυρίως σε αγροτικές περιοχές [19].

2.6. ΥΔΡΟΛΥΣΗ - ΖΥΜΩΣΗ

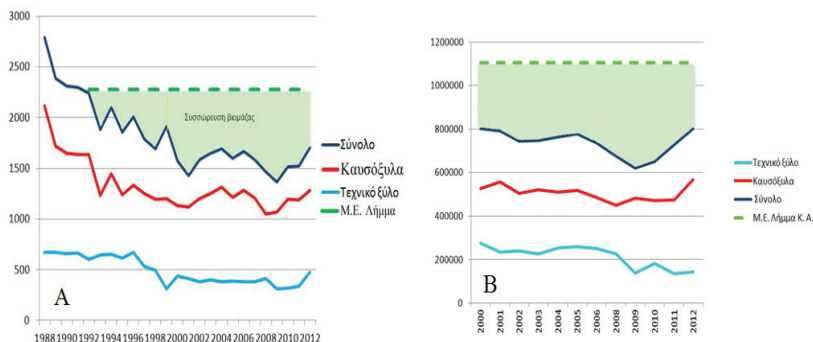
Στις μεθόδους παραγωγής ενέργειας από το ξύλο περιλαμβάνεται και η *υδρόλυση/ζύμωση* με την οποία παράγεται η αιθανόλη ως καύσιμο μηχανών εσωτερικής καύσης (Σχήμα 8). Τα σάκχαρα που παράγονται με υδρόλυση του ξύλου και της βιομάζας γενικότερα μετατρέπονται με αλκοολική ζύμωση σε αιθανόλη. Αιθανόλη και μεθανόλη παράγονται επίσης και με απ' ευθείας ενζυματική αποικοδόμηση του ξύλου [21]. Η αιθανόλη και μεθανόλη μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνες τους ή σε μίξη με βενζίνη (*gasohol*) για την κίνηση αυτοκινήτων.



Σχήμα 8: Απλοποιημένο διάγραμμα παραγωγής αιθανόλης από δασική βιομάζα [20]

3. ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΔΑΣΙΚΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η πολιτική διαχείρισης των ελληνικών δασών που εφαρμόζεται από τη δεκαετία 1960-1970 προέβλεπε μια συντηρητική απόληψη λήμματος από τα δάση με σκοπό την ποσοτική και ποιοτική ανόρθωση του ξυλοποθέματος. Το επιτρεπόμενο ετήσιο λήμμα ήταν και είναι 55-60% της ετήσιας αύξησης της βιομάζας. Αυτό έχει οδηγήσει σε μεγάλη συσσώρευση βιομάζας τα τελευταία 50 έτη.



Σχήμα 9: Ετήσια παραγωγή προϊόντων ξύλου: Α. Στο σύνολο της χώρας, Β. Από τα δάση της Αποκεντρωμένης Διοίκησης Μακεδονίας-Θράκης [Επεξεργασία από 22].

Τα στοιχεία των Σχημάτων 9Α και 9Β δείχνουν ότι υπάρχει ακόμη μεγαλύτερη συσσώρευση της βιομάζας στα δάση μας. Από τα στοιχεία αυτά διαπιστώνουμε ότι η κάρπωση προϊόντων από τα δάση μας μειώνεται συνεχώς τη τελευταία 20ετία και ιδιαίτερα τη τελευταία 10ετία, και ότι υπολείπεται από το προβλεπόμενο λήμμα κατά μ.ο. κατά 30% περίπου σε επίπεδο χώρας, και κατά 34% περίπου σε επίπεδο Αποκεντρωμένης Διοίκησης Μακεδονίας Θράκης. Στα δάση της Κεντρικής Μακεδονίας το ποσοστό αυτό ανέρχεται σε 36%. Αν λάβουμε υπόψη το προβλεπόμενο λήμμα και τη μη απόληψη όλου του λήμματος διαπιστώνουμε ότι από τα ελληνικά δάση παίρνουμε μόνο το 35-40% της ετήσιας προσαύξεσης του ξυλαποθέματος. Η συσσωρευμένη αυτή βιομάζα πρέπει να συγκομιστεί (σταδιακά) για το καλό του δάσους, αλλά και της εθνικής οικονομίας.

Σημαντικές ποσότητες δασικής βιομάζας μπορούν να αξιοποιηθούν για παραγωγή ενέργειας και από τις παρακάτω πηγές (Εικόνα 5):



Εικόνα 5: Διαθέσιμες πηγές δασικής βιομάζας: 1. Υπολείμματα υλοτομιών, 2,3. Βιομάζα καλλιεργητικών αραιώσεων, 4. Υπότροφος κωνοφόρων, 5. Βιομάζα αείφυλλων πλατύφυλλων, 6,7. Ενεργειακές φυτείες, 8. Αγροδασοπονία, 10,11. Ανακύκλωση ξύλου, 12. Γεωργικά υπολείμματα.

1. **Υπολείμματα υλοτομίας.** 20% περίπου της βιομάζας του δένδρου παραμένει ως υπόλειμμα μετά την υλοτομία του στο δάσος. Η βιομάζα αυτή αποτελείται από πρέμνα, κορυφές, κλαδιά, φλοιό, διάφορα εξακρίδια και φύλλωμα
2. **Καλλιεργητικές αραιώσεις.** Οι καλλιεργητικές αραιώσεις αποτελούν σημαντικό Δασοκομικό και Διαχειριστικό μέσο. Από τις αραιώσεις προκύπτουν σημαντικές ποσότητες βιομάζας. Στην Ελλάδα οι καλλιεργητικές αραιώσεις έχουν σήμερα σχεδόν ξεχαστεί.
3. **Υπόροφος κωνοφόρων.** Σημαντικές ποσότητες βιομάζας μπορούν να αξιοποιηθούν με καθαρισμό και συγκομιδή της βιομάζας του υπορόφου των εύφλεκτων δασών χαλεπίου και τραχείας πεύκης και παράλληλα να περιοριστούν οι καταστρεπτικές πυρκαγιές.
4. **Αείφυλλα πλατύφυλλα.** Το 48% περίπου των δασικών εκτάσεων της Ελλάδας (3.154.000 εκτάρια) καλύπτονται με αείφυλλα πλατύφυλλα. Λιγότερο από 10% των εκτάσεων αυτών βρίσκεται υπό δασική διαχείριση. Ένα μέρος των εκτάσεων αυτών αξιοποιούνταν στη αιγοτροφία. Σήμερα όμως η αιγοτροφία τείνει να εκλείψει. Μεγάλες ποσότητες βιομάζας μπορούν να αξιοποιηθούν από τις απέραντες εκτάσεις των αείφυλλων πλατύφυλλων που σήμερα παραμένουν αναξιοποίητες.
5. **Ενεργειακές φυτείες.** Η Ελλάδα και ιδιαίτερα η Μακεδονία και η Θράκη διαθέτουν πολλές εκτάσεις που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν με την ίδρυση ενεργειακών φυτειών
6. **Αγροδοσοπονία.** Η εφαρμογή της ευρωπαϊκής πολιτικής για την Αγροδοσοπονία θα συνεισφέρει επίσης σημαντικές ποσότητες ξυλώδους βιομάζας
7. **Υπολείμματα κατεργασίας.** Ένα μεγάλο ποσοστό (30-60%) του τεχνικού ξύλου που παράγεται ή εισάγεται στην Ελλάδα μετατρέπεται κατά τη βιομηχανική ή βιοτεχνική κατεργασία του σε υπολείμματα. Ένα μέρος των υπολειμμάτων αυτών αξιοποιείται σήμερα στις βιομηχανίες για παραγωγή ενέργειας. Είναι εφικτά δυνατή η πλήρης αξιοποίησή τους.
8. **Ανακύκλωση προϊόντων ξύλου.** Συστηματική ανακύκλωση των προϊόντων ξύλου μπορεί να συμβάλλει επίσης σημαντικά στην αύξηση της διαθέσιμης ξυλώδους βιομάζας.
9. **Αγροτικά υπολείμματα.** Ένα αναπτυξιακό πλαίσιο με βάση τη δασική βιομάζα θα μπορούσε να συμπεριλάβει και την αξιοποίηση της ξυλώδους βιομάζας από αγροτικά υπολείμματα

Οι παραπάνω ποσότητες της δασικής βιομάζας που παραμένουν αναξιοποίητες σε συνδυασμό και με την εφαρμογή νέων και καινοτόμων τεχνολογιών μετατροπής της σε βιοκαύσιμα μπορούν να αποτελέσουν την βάση:

1. για μια σημαντική αύξηση % του ΑΠΕ (Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας) της Ελλάδας,
2. για ένα πλαίσιο περιφερειακής ανάπτυξης με δημιουργία νέων (κυρίως μικρών) επιχειρήσεων (συγκομιδής, παραγωγής πελλετών, ξυλάνθρακα, υγροποίησης και αεριοποίησης, κέντρων εφοδιασμού και διακίνησης στερεών βιοκαυσίμων) και νέων θέσεων εργασίας.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Υπάρχουν πολλές δυνατότητες παραγωγής και συγκομιδής δασικής βιομάζας στα ελληνικά δάση και στις δασικές εκτάσεις για παραγωγή διαφόρων μορφών ενέργειας.

Έχουν αναπτυχθεί νέες τεχνολογίες μετατροπής της δασικής βιομάζας σε στερεά, υγρά και αέρια βιοκαύσιμα και μετατροπής τους σε ενέργεια. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον

παρασιάζουν μικρές κυρίως μονάδες παραγωγής όπως πελλετών, τυποποιημένου ξυλάνθρακα και καβουρντισμένου ξύλου, πυρόλυσης και αεριοποίησης που μπορούν να εγκατασταθούν κοντά ή μέσα στα δάση.

Η παραγωγή, συγκομιδή και μετατροπή της σε ενέργεια δημιουργεί νέες θέσεις εργασίας και μπορεί να συμβάλει στην περιφερειακή ανάπτυξη.

Η δασική βιομάζα ως πηγή ενέργειας αποκτά ολοένα και περισσότερο περιβαλλοντικό, οικονομικό και αναπτυξιακό ενδιαφέρον, ιδιαίτερα για τη χώρα μας (Εικόνα 6). Η αναγνώριση αυτή θα πρέπει να οδηγήσει :

1. σε ένα νέο πλαίσιο διαχείρισης των δασών μας και σε νέα πρότυπα αξιοποίησης της συνολικής ξυλώδους δασικής βιομάζας που παράγεται σε αυτά, και
2. σε ένα οργανωμένο σύγχρονο σύστημα αξιοποίησης και ελέγχου της αλυσίδας παραγωγής και διακίνησης των δασικών βιοκαυσίμων.



Εικόνα 6: Συμβολή της δασικής βιομάζας στο περιβάλλον και στην περιφερειακή ανάπτυξη.

5. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Το ΥΠΕΚΑ θα πρέπει να ξεκινήσει άμεσα ένα αναπτυξιακό πρόγραμμα αξιοποίησης της δασικής βιομάζας για παραγωγή ενέργειας. Ένα τέτοιο πρόγραμμα θα μπορούσε να συμπεριλάβει συνοπτικά τα παρακάτω:

1. Εισαγωγή σύγχρονων μεθόδων διαχείρισης των δασών και δασικών εκτάσεων με στόχο τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης βιομάζας στα πλαίσια των αρχών της αειφορείας. Εφαρμογή για αυτό των ευρωπαϊκών κριτηρίων και δεικτών αειφόρου διαχείρισης των δασών και των δασικών εκτάσεων.
2. Ανάπτυξη συστήματος ορθολογικής και πληρέστερης αξιοποίησης όλων των παραγόμενων προϊόντων του δάσους με την εισαγωγή νέων συστημάτων και των διεθνών τεχνικών και ποιοτικών προδιαγραφών συγκομιδής και διακίνησης τους.
3. Δημιουργία κέντρων διακίνησης, εφοδιασμού και εμπορίου στερεών βιοκαυσίμων, όπως γίνεται σχεδόν σε όλες τις ευρωπαϊκές χώρες.
6. Εφαρμογή των διεθνών τεχνικών και ποιοτικών προδιαγραφών παραγωγής και ελέγχου της ποιότητας των στερεών βιοκαυσίμων. Ίδρυση για το σκοπό αυτό Κέντρων Ποιοτικού Ελέγχου Στερεών Βιοκαυσίμων
7. Εισαγωγή ενός συστήματος καταγραφής και ελέγχου της διακίνησης και της εμπορίας των παραγόμενων, αλλά και των εισαγόμενων καυσίμων βιομάζας.

8. Ανάπτυξη σε επίπεδο περιφέρειας ενός ολοκληρωμένου πληροφοριακού συστήματος διαχείρισης της παραγωγής, της διακίνησης και του ελέγχου των δασικών βιοκαυσίμων. Το σύστημα αυτό θα μπορούσε στη συνέχεια να αναβαθμιστεί και να εφαρμοστεί σε επίπεδο χώρας.

Τα δάση, οι δασικές εκτάσεις και ο ήλιος της Ελλάδας μπορούν να αξιοποιηθούν για την ευημερία του ελληνικού λαού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] FAO. 2014. State of the World's Forests. Enhancing the socioeconomic benefits from forests. FAO, Rome. <http://www.fao.org/3/a-i3710e.pdf>.
- [2] Becker, D. R., et al. 2011. The conventional wisdoms of woody biomass utilization. *Journal of Forestry*;109(4):208-218.
- [3] WWF, 2011. The energy Report. 100% Renewable Energy by 2050. assets.panda.org/downloads/101223_energy_report_final_print_2.pdf
- [4] White, E. M. 2010. Woody Biomass for Bioenergy and Biofuels in the United States-A Briefing Paper. USDA, Forest Service, Forest Service, General Technical Report PNW-GTR-825
- [5] Smeets, E.M. and A.P. Faaij. 2007. Bioenergy potentials from forestry in 2050. *Clim Change* 2007;81:353-390.
- [6] Ladanai, S and J. Vinterbäck. 2009. Global Potential of Sustainable Biomass for Energy . SLU, Institutionen för energi och teknik Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Energy and Technology, Report 013 ISSN 1654-9406, Upsala.
- [7] Φιλίππου, Ι.Λ. 2014. Χημεία και Χημική Τεχνολογία Ξύλου. (κεφ.11. Ενέργεια). Εκδόσεις Γιαχούλη, Θεσσαλονίκη.
- [8] Kauriinoja, A. 2010. Small- scale biomass- to- energy solutions for northern peripheral areas. Ph.D. Thesis. Department of Process and Environmental Engineering. University of Oulu.
- [9] Grønli, M. 2011. Pyrolysis and charcoal. Department of Energy and Process and Engineering. Norwegian University of Science and Technology (NTNU).
- [10] Garcia-Perez, M., T. Lewis and C. E. Cruger. 2010. Methods for producing biochar and advanced biofuels in Washington State. Part.I. Literature review of pyrolysis reactors. Depart. of Biological Systems Engineering and the Center for Sustainable Agriculture and Natural Resources, Washington State University, Pullman, WA.
- [11] James, J. 2008. Using torrefied wood for electricity, briquette and pellet production.
- [12] Westerhof, R. 2013. Fast pyrolysis and upgrading of biomass pyrolysis products. Western Institute for Chemicals and Fuels from Alternative Resources-ICFAR. http://www.ceurer2013.com.br/download/ROEL_WESTERHOF.pdf.
- [13] San Miguel,G, J. Makibar, and A.R. Fernández-Akarregi. 2011. Conversion of wood into liquid fuels: A review of the science and technology behind the fast pyrolysis of biomass. In *Advanced in Energy Research*, Vol.7. (Ed. Acosta, M. J.). Nova Science Publishers.
- [14] Ronsse, F, D. Dickinson, R. Nachenius and W. Prins. 2013. Biomass pyrolysis and biochar characterization. 1st FOREBIOM Workshop, 4/4/13 – Vienna.
- [15] De Wild, P. J, H. Reith and H. J. Heeres. 2011. Biomass pyrolysis for chemicals. *Biofuels*. 2 (2): 185 – 208.
- [16] Jones, S. B. et al. 2009. Production of gasoline and diesel from biomass via fast pyrolysis, hydrotreating and hydrocracking. PNNL, Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Wa.
- [17] AGRI-THERM. Mobile Pyrolysis Systems. <http://agri-therm.com/technology/mps100-agri-therm-mobile-pyrolysis-system/>
- [18] Mikkonen, V. 2013. Wood Gas for Mobile Applications . <http://www.ekomobiili.fi/Tekstit/Bookbrochure.pdf>.
- [19] <http://driveonwood.com/>.
- [20] Lucia, L. A. et al. 2007. Chemicals and energy from biomass. A review. In *Chemicals and Energy from Forest Biomass*. (Ed: Argyropoulos, D.S.) ACS Symposium Series number No. 954. Oxford University Press.
- [21] Yang, B. et all. .2011. Enzymatic hydrolysis of cellulosic biomass. *Biofuels* 2(4): 421–450 .
- [22] ΥΠΕΚΑ .2014. Στατιστικά στοιχεία. Ειδική Γραμματεία Δασών. Αθήνα.

ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΥΛΟΤΟΜΙΩΝ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Φιλίππου, Β¹, Ι. Α. Φιλίππου²

¹Δασολόγος-Περιβαλλοντολόγος, ΠΜΣ

²καθηγητής*

Τμήμα Δασολογίας & Φυσικού Περιβάλλοντος, ΑΠΘ
54124 Θεσσαλονίκη, e-mail: jfilippo@for.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει προσελκύσει η αξιοποίηση των υπολειμμάτων που παραμένουν αναξιοποίητα στα δάση μετά τις υλοτομίες των για παραγωγή βιοενέργειας και βιοχημικών. Στο παρελθόν τα υπολείμματα υλοτομίας δεν αξιοποιούνταν κυρίως διότι η συγκομιδή και μεταφορά τους ήταν τεχνικά δύσκολη και οικονομικά ασύμφορη. Σήμερα έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες συγκομιδής και μεταφοράς που σε συνδυασμό με την αύξηση της τιμής των πετρελαιοειδών καθιστούν οικονομική την εκδάσωση τους. Έχουν επίσης αναπτυχθεί νέες τεχνολογίες μετατροπής της βιομάζας σε ενέργεια σε μικρές μονάδες ή μετατροπής της σε εξευγενισμένα στερεά βιοκαύσιμα (πελλέτες, wood pellets) που μπορούν να εγκατασταθούν κοντά ή μέσα στα δάση και περιορίζουν ακόμη περισσότερο το κόστος αξιοποίησής τους. Στην παρούσα εργασία γίνεται μία συγκριτική ανασκόπηση των διαφόρων μεθόδων συγκομιδής των υπολειμμάτων υλοτομίας που χρησιμοποιούνται σε άλλες χώρες και των νέων τεχνολογιών που έχουν αναπτυχθεί και γίνεται εκτίμηση-αξιολόγηση των δυνατοτήτων χρησιμοποίησής τους στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ελληνικών δασών.

Λέξεις Κλειδιά: Υπολείμματα υλοτομιών, παραγωγή ενέργειας, πελλέτες, συστήματα, μέθοδοι συγκομιδής δασικών υπολειμμάτων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Με την αυξανόμενη ανησυχία για την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού αλλά και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, στις μέρες μας όλο και μεγαλύτερη εφίσταται η προσοχή για τη χρήση της βιοενέργειας. Μια από τις πηγές βιοενέργειας είναι η ξυλώδης βιομάζα προερχόμενη είτε από συμβατικά δάση είτε από φυτείες. Η βιοενέργεια προερχόμενη από ξυλώδη βιομάζα έχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα. Είναι ανανεώσιμη και με ουδέτερο ισοζύγιο άνθρακα, δηλαδή οι καθαρές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι κοντά στο μηδέν. Η παραγωγή ενέργειας από δασική βιομάζα μπορεί να δημιουργήσει θέσεις εργασίας και να τονώσει την οικονομική ανάπτυξη κυρίως της υπαίθρου[1,2,3].

Τα τελευταία χρόνια ενδιαφέρον έχει προσελκύσει η αξιοποίηση των υπολειμμάτων που παραμένουν αναξιοποίητα στα δάση μετά τις υλοτομίες (Εικόνα 1) για παραγωγή βιοενέργειας, βιοχημικών [4,5,6,7,8]. Το μεγαλύτερο μέρος της συγκομισμένης ξυλείας δημιουργεί ένα μεγάλο ποσοστό υπολειμμάτων τα οποία θα μπορούσαν να ανακτηθούν και να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή βιοενέργειας ή και για άλλους σκοπούς.



Εικόνα 1: Αποκλάδωση κορμού ελάτης, 2. Υπολείμματα υλοτομιών ελάτης (χονδρά-λεπτά κλαδιά, και βελόνες), 3. Υπολείμματα υλοτομίας ελάτης στοιβαγμένα πάνω σε αποφλοιωμένο κορμό ελάτης. 4. Φλοιός ελάτης, 5. Υλοτομιμένος κορμός πέυκης. 6. Υπολείμματα υλοτομίας οξιάς, 7. Υπολείμματα ολόκληρων Κλαδιών οξιάς. 8. Υπολείμματα υλοτομίας οξιάς (χονδρά-λεπτά κλαδιά) . 9. Υπολείμματα υλοτομίας ερυθρελάτης.

Τα υπολείμματα υλοτομιών (συχνά ονομάζονται και δασικά υπολείμματα) αποτελούνται από τη βιομάζα που παραμένει στο δάσος μετά την υλοτομία και την απομάκρυνση των κύριων δασικών προϊόντων (δηλ της τεχνικής ξυλείας, του ξύλου θρυμματισμού και των καυσόξυλων) (Εικόνα 1). Η δασική αυτή βιομάζα περιλαμβάνει πρέμνα, κορυφές, κλαδιά, φλοιό, διάφορα εξακρίδια και φύλλωμα ή βελόνες. Στα δασικά υπολείμματα περιλαμβάνονται

επίσης δένδρα μικρών διαστάσεων που σπάνε κατά την ρίψη δένδρων, ξηρά δένδρα και δένδρα χαμηλής εμπορικής αξίας ή δένδρα μη εμπορεύσιμων δασικών ειδών. Συχνά στη διεθνή βιβλιογραφία ως δασικά υπολείμματα θεωρούνται επίσης και η βιομάζα που προκύπτει από καλλιεργητικές αραιώσεις ή καθαρισμό των δασών [4,5,6,9].

Το ενδιαφέρον αξιοποίησης των υπολειμμάτων υλοτομίας έχει οδηγήσει σε ποσοτικούς προσδιορισμούς των διαθέσιμων ποσοτήτων τους σε δασικά οικοσυστήματα διαφόρων χωρών και των αναμενόμενων εξ' αυτών ποσοτήτων ενέργειας [10,11]. Το ποσοστό των δασικών υπολειμμάτων (% συνολικού ξηρού βάρους υλοτομημένων δένδρων) που αναφέρονται στη βιβλιογραφία κυμαίνεται από 15-40% ανάλογα με το δασοπονικό είδος, τη σύσταση τους και τη μέθοδο υπολογισμού. Οι περισσότερες έρευνες εστιάζονται στον προσδιορισμό των συνολικών υπολειμμάτων κυρίως σε δάση όπου εφαρμόζεται εντατική δασοπονία και αποψιλωτικές υλοτομίες. Στην Ελλάδα έρευνες για τους προσδιορισμούς των διαθέσιμων υπολειμμάτων υλοτομίας δεν υπάρχουν.

Τα δασικά υπολείμματα υλοτομίας εμφανίζονται σαν μια ελκυστική πηγή καυσίμου, αλλά κατά την εκδάσωση τους θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, και οι απώλειες των πολύτιμων θρεπτικών συστατικών που περιλαμβάνονται στα υπολείμματα [12,13,14]. Η αειφόρος παραγωγή και αξιοποίηση των υπολειμμάτων προσφέρει μια πολύτιμη πηγή πρώτων υλών για την παραγωγή βιοκαυσίμων.

Στο παρελθόν τα υπολείμματα υλοτομίας δεν αξιοποιούνταν, κυρίως διότι η συγκομιδή και μεταφορά τους ήταν τεχνικά δύσκολη και οικονομικά ασύμφορη. Σήμερα έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες συγκομιδής και μεταφοράς που σε συνδυασμό με την αύξηση της τιμής των πετρελαιοειδών καθιστούν σε πολλές περιπτώσεις οικονομική την εκδάσωση τους [15,15,17,18,19]. Έχουν επίσης αναπτυχθεί νέες τεχνολογίες μετατροπής της βιομάζας σε ενέργεια σε μικρές μονάδες ή μετατροπής της βιοκαύσιμα που μπορούν να εγκατασταθούν κοντά ή μέσα στα δάση και να περιορίσουν ακόμη περισσότερο το κόστος αξιοποίησης τους [20,21].

Στη παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι κυριότερες μέθοδοι συγκομιδής των δασικών υπολειμμάτων και οι δυνατότητες εφαρμογής τους στα ελληνικά δάση.

2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ

2.1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΞΥΛΟΥ

Για τη συγκομιδή του ξύλου χρησιμοποιούνται τρεις κυρίως μέθοδοι [22,23]:

Μέθοδος «Μικρά μήκη» (shortwood, cut-to-length method): Τα δέντρα υλοτομούνται, αποκλαδώνονται, αποκορυφώνονται, (αποφλοιώνονται) τεμαχίζονται σε κορμοτεμάχια προκαθορισμένου μήκους, ανάλογα με τον προορισμό χρήσης τους, στην περιοχή της ρίψης των δένδρων (κοντά στο πρέμνο) και στη συνέχεια μετατοπίζονται στην άκρη του δασόδρομου ή σε δασοπλατεία. Η μετατόπιση των κορμοτεμαχίων γίνεται συνήθως από ένα ειδικά εξοπλισμένο αρθρωτό ελκυστήρα ή σπανιότερα με σύρση με συρματόσχοινο. Στην Ελλάδα, σε ορισμένα δάση χρησιμοποιούνται και ζώα για τη μετατόπιση των κορμοτεμαχίων. Τα υπολείμματα υλοτομίας παραμένουν στον τόπο ρίψης του δένδρου.

Μέθοδος «Μήκους δένδρου» (tree length method): Το δέντρο υλοτομείται, αποκλαδώνεται, αποκυφώνεται και μετατοπίζεται ολόκληρος ο κορμός στο δασόδρομο ή στη δασοπλατεία. Στο δασόδρομο ή τη δασοπλατεία ο κορμός (αποφλοιώνεται), τεμαχίζεται σε κορμοτεμάχια ή μεταφέρεται στα εργοστάσια κατεργασίας ολόκληρος. Στη μέθοδο αυτή τα υπολείμματα υλοτομίας επίσης παραμένουν στο υλοτόμιο.

Μέθοδος «ολόκληρου κορμού» (full-tree method): τα δέντρα υλοτομούνται και μεταφέρονται ολόκληρα με τα κλαδιά στο δασόδρομο. Εκεί γίνεται η αποκλάδωση και αποκορύφωση (σε ορισμένες περιπτώσεις και η αποφλοίωση). Ο κορμός τεμαχίζεται ή

συνήθως μεταφέρεται ολόκληρος στο εργοστάσιο επεξεργασίας του. Στην περίπτωση αυτή τα υπολείμματα παραμένουν στο δασόδρομο.

Μέθοδος «πλήρους δένδρου» (whole tree method): Τα δένδρα εκριζώνονται και είτε αποκλάδωνονται, αποκορυφώνονται και αποριζώνονται στο υλοτόμιο ή μεταφέρονται στο δασόδρομο όπου γίνονται οι υπόλοιπες εργασίες συγκομιδής.

Η ρίψη, αποκλάδωση, αποκορύφωση, αποφλοιώση και τεμαχισμός στην Ελλάδα γίνεται χειρωνακτικά. Σε άλλες χώρες έχει προχωρήσει σημαντικά η μηχανοποίηση όλων των εργασιών συγκομιδής. Χρησιμοποιούνται μηχανήματα που κάνουν τη ρίψη, αποκλάδωση και πολλές φορές και τον τεμαχισμό των δέντρων σε μια δίοδο του κορμού μέσα από τα μηχανήματα [23,24]. Ειδικές κεφαλές και εξαρτήματα τοποθετούνται συχνά σε γεωργικά μηχανήματα, τρακτέρ ή εκσκαφείς και τα μετατρέπουν σε μηχανήματα συγκομιδής. Για την μετατόπιση κορμοτεμαχίων, ολόκληρων κορμών ή δένδρων στους δασόδρομους ή στις δασοπλατείες χρησιμοποιούνται τροχοφόροι αρθρωτοί ελκυστήρες με συρματόσχοινα και σύρση (skidders), ή με αρπάγη και σύρση (grapple skidder) [23,25].

Η συγκομιδή του ξύλου στο δάσος μπορεί να είναι αποφιλική, κατά λωρίδες, κατά λόγγες ή επιλεκτική [22, 26]. Η χρησιμοποίηση του ενός ή άλλου συστήματος συγκομιδής εξαρτάται από τη μορφή του δάσους (ομήλικο, κηπευτό, υποκηπευτό), τη κλίση του εδάφους, το είδος του προϊόντος, το είδος και τη διαθεσιμότητα των μηχανημάτων μετατόπισης, την απόσταση μετατόπισης και μεταφοράς, τις επιπτώσεις στο εναπομένον δάσος, το κόστος κ.α. [23,26,27,28].

Τα υπολείμματα των παραπάνω υλοτομιών αν δεν προορίζονται για παραπέρα χρήση αφήνονται στα υλοτόμια. Όταν όμως προορίζονται ως πρώτη ύλη για παραγωγή ενέργειας συγκομίζονται και μεταφέρονται στους τόπους χρήσης τους.

2.2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΥΓΚΟΜΙΔΗΣ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΥΛΟΤΟΜΙΑΣ

Για τη συγκομιδή των υπολειμμάτων χρησιμοποιούνται συνήθως τρεις μέθοδοι [7,29,30,31,32]:

- Απλή μετατόπιση τους στους δασοδρόμους, φόρτωση σε φορτηγά και μεταφορά.
- Δεματοποίηση στο υλοτόμιο, στο δασόδρομο ή στη δασοπλατεία, φόρτωση σε φορτηγά και μεταφορά.
- Θρυμματοποίηση στο υλοτόμιο, στο δασόδρομο ή στη κορμοπλατεία, φόρτωση σε φορτηγά και μεταφορά.

2.2.1. ΑΠΛΗ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΚΑΙ ΧΥΔΗΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑ

Ο απλούστερος τρόπος συγκομιδής των υπολειμμάτων υλοτομίας είναι η μετατόπιση σε χύδην μορφή στο δασόδρομο και από εκεί φόρτωση σε φορτηγά για τη μεταφορά. (Εικόνα 2.). Η συλλογή και μετακίνηση μπορεί να γίνει με προσθήκη ειδικών κεφαλών και εξαρτημάτων σε τρακτέρ ή εκσκαφείς που μετατρέπονται σε μηχανήματα συγκομιδής (Εικόνα 3) ή με χρήση ελκυστήρα με συρματόσχοινα και σύρση [18,19,31,33]. Το σύστημα αυτό περιορίζεται από τη μη αξιοποίηση του ωφέλιμου φορτίου του οχήματος και είναι προτιμότερη μόνο σε κοντινές αποστάσεις [29,34].

Η ξυλώδης βιομάζα, με τη μορφή κλαδιών, κορυφών, κλπ, μπορεί να εξαχθεί σε κάποιο μέρος με τη χρήση skidder ή διαβιβαστή [18,1928,,33] και τα χύδην υπόλειμμα μπορούν εν συνεχεία να παραδοθούν στους καταναλωτές μέσω φορτηγών. Το σύστημα αυτό περιορίζεται από τη μη αξιοποίηση του ωφέλιμου φορτίου του οχήματος και είναι προτιμότερη μόνο σε κοντινές αποστάσεις (29)



Εικόνα 2: Μεταφορά και εκφόρτωση υπολειμμάτων χύδην μορφή [32]



Εικόνα 3: (2). Δεματοποιητές δασικών υπολειμμάτων
[<http://www.afo.eu.com/default.asp?SivulD=27327..>, 28]

2.2.2. ΔΕΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ

Η δεματοποίηση των υπολειμμάτων υλοτομίας και μεταφορά τους στους χώρους αξιοποίησης τους (Εικόνα 4 και 5) είναι νεότερη μέθοδος. Η δεματοποίηση είναι μέθοδος δημιουργίας ενός συμπαγούς συμπιεσμένου και ομοιόμορφου για τη διακίνηση δέματος από υπολείμματα υλοτομιών και άλλων μικρών διαστάσεων δασικής βιομάζας (όπως υλικό αραιώσεων, κ.τ.λ.). Τα δέματα έχουν συνήθως διάμετρο 50-100 cm και μήκος 3- μέτρα. Ένα πρότυπο δέσμη έχει 3,5 m μήκος, 0,8 m διαμέτρου, και ζυγίζει 400-500 κιλά, ανάλογα με το δασοπονικό είδος και την υγρασία. Τα δέματα μπορούν εύκολα να μεταφερθούν από κοινούς μετατοπιστές, να στοιβαχτούν και αποθηκευθούν στην άκρη του δρόμου ή να φορτοθούν σε φορτηγά και αποθηκευθούν στους χώρους αξιοποίησης τους. Με την κατάλληλη συμπίεση, οι δέσμες μπορούν να μετατραπούν σε πλήρη ωφέλιμα φορτία για τα φορτηγά και ο χειρισμός τους, όπως η φόρτωση και η επεξεργασία να γίνει πιο αποδοτική. Για τη δεματοποίηση έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μέθοδοι και μηχανήματα [35,36,37]. Ένα μηχάνημα κάνει τη ρίψη και αποκλάδωση των δέντρων και αμέσως μετά δεματοποιεί τα υπολείμματα επί τόπου. Άλλοι δεματοποιητές εισέρχονται στο υλοτόμιο συλλέγουν, δεματοποιούν και μεταφέρουν τα δέματα ως το δασόδρομο, ενώ άλλοι δεματοποιούν τα

υπολείμματα στο δασόδρομο και τα φορτώνουν σε φορτηγά. Υπάρχουν και διάφοροι συνδυασμοί των παραπάνω δυνατοτήτων σε διάφορα μηχανήματα.



Εικόνα 4: Α. Συλλογή υπολειμμάτων από γερανό, δεματοποίηση και φόρτωση σε μετατοπιστή. Β. Φόρτωση και εκφόρτωση δεσμών υπολειμμάτων με τη χρήση βραχίονα με αρπάγη. <http://www.amandlaresources.com/renewable-energy.php>
http://article.wn.com/view/2014/07/31/China_adopts_stricter_pesticide_residue_standard



Εικόνα 5: Δεματοποιημένα υπολείμματα σε εργοστάσιο συμπαραγωγής θερμότητας [32].

2.2.3. ΘΡΥΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

Ο θρυμματισμός είναι μέθοδος μετατροπής του ξύλου και των υπολειμμάτων υλοτομίας σε ξυλοτεμαχίδια (θρύμματα, chips) (Εικόνα 6). Τα ξυλοτεμαχίδια είναι σχετικά ομοιόμορφο καύσιμο, με βελτιωμένη τη φαινομενική (χύδη) πυκνότητα και τα άλλα χαρακτηριστικά διακίνησης από το δάσος στο εργοστάσιο.

Ο θρυμματισμός μπορεί να γίνεται στο δασόδρομο ή στη δασοπλατεία και μέσα στο υλοτόμιο κυρίως στις περιπτώσεις αποψιλωτικών υλοτομιών (Εικόνα 7). Ο επιτόπου θρυμματισμός μέσα στο υλοτόμιο απαιτεί μια καλά οργανωμένη συγκομιδή της στρογγυλής ξυλείας. Θέλει προσοχή έτσι ώστε τα διατεταγμένα υπολείμματα να μην γεμίσουν με χώμα γιατί καθιστά πολύ δύσκολο το θρυμματισμό τους. Ο επιτόπου θρυμματισμός στην περιοχή απαιτεί είτε ένα έδαφος με καλή αντοχή ή ένα χαλί από κλαδιά. [38].



Εικόνα 6: Ξυλοτεμαχίδια (θρύμματα) Α. υπολειμμάτων υλοτομίας, Β, καθαρού ξύλου



Εικόνα 7. Θρυμματιστές υπολειμμάτων: Α και Β στο δασόδρομο, Γ. σε δασοπλατεία και Δ μέσα στο υλοτόμιο. <http://www.canadianbiomassmagazine.ca/content/view/1129/132/> <http://biomassmagazine.com/articles/5089/harvesting-forestry-and-logging-waste-profitably>

Υπάρχουν διάφοροι τύποι θρυμματιστών [39,40]. Ένας θρυμματιστής μπορεί να αποτελείται από μια αυτοκινούμενη βάση με καμπίνα, θρυμματιστή και γερανό τοποθετημένα στο εμπρός τμήμα της μηχανής. Στο πίσω άκρο της βάσης της μηχανής είναι τοποθετημένη μια καρότσα μεγάλης ανατροπής. Υπάρχουν όμως και μικρότεροι θρυμματιστές που εφαρμόζονται σε γεωργικούς ελκυστήρες που είναι εξοπλισμένοι και με ρυμουλκούμενα καρότσα]. Τα μηχανήματα θρυμματισμού έχουν ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία 20 χρόνια και η παραγωγικότητά τους κυμαίνεται από 80 έως 600 m³ δασικά θρύμματα (chips) ανά ημέρα. Οι θρυμματιστές μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες: θρυμματιστής δισκός, θρυμματιστής τυμπάνου, αλλά και θρυμματιστής βιδός. Οι διαφορές τους είναι μόνο στον τρόπο θρυμματισμού. Όλοι οι θρυμματιστές είναι εξοπλισμένοι με έναν ανεμιστήρα για να διώχνει τα chips έξω από το περίβλημα θρυμματιστή και τα στέλνει μέσω ενός κεκλιμένου αγωγού μέσα στη καρότσα [36]. Τα chips μεταφέρονται με κάδους οδικής μεταφοράς, και σπανιότερα με άλλα φορτηγά οχήματα [37].

Στις Σκανδιναβικές και Βαλτικές χώρες συχνά τα υπολείμματα υλοτομίας μεταφέρονται στην άκρη του δρόμου και μένουν εκεί σε ένα μεγάλο σωρό για να ξηραθούν και στη συνέχεια

δεματοποιούνται ή θρυμματίζονται [31]. Η περιοχή υλοτομίας γίνεται άμεσα διαθέσιμη για την ανασύστασή και αναδάσωση της. Συνήθως οι σωροί των υπολειμμάτων καλύπτονται με ειδικό χαρτί στη κορυφή της σωρού (Εικόνα 8). Το χαρτί κατά το θρυμματισμό τεμαχίζεται και καίγεται ως καύσιμο



Εικόνα 8: Υπολείμματα υλοτομιών στοιβαγμένα στην άκρη του δρόμου για ξήρανση πριν το θρυμματισμό ή τη δεματοποίηση σε δάσος της Λετονίας.

2.2.4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΩΝ

Η δεματοποίηση αποτελεί μια καλή μέθοδο βελτίωσης της εφοδιαστικής δυνατότητας δασικής καύσιμης ύλης [29]. Με την κατάλληλη συμπίεση, οι δέσμες μπορούν να μετατραπούν σε πλήρη ωφέλιμα φορτία για τα φορτηγά και ο χειρισμός τους, όπως η φόρτωση και η επεξεργασία, να γίνει πιο αποδοτική. Τα δέματα μπορούν να μεταφερθούν στα εργοστάσια με τον ίδιο τρόπο που μεταφέρονται και τα προϊόντα ξύλου (στρογγύλια, καυσόξυλα, κ.τ.λ.). Ενώ τα θρύμματα απαιτούν τη κατασκευή ειδικών κάδων οδικής μεταφοράς (road load containers) [37]. Επίσης τα δέματα έχουν και άλλα πλεονεκτήματα όπως καλό αερισμό, φυσική ξήρανση, καλή αποθήκευση κ.τ.λ.

Κύριο πλεονέκτημα του θρυμματισμού είναι ότι βελτιώνει τη χύδην πυκνότητα και το χειρισμό των πρώτων υλών που συγκομίζουμε από το δάσος [37]. Το βασικό μειονεκτήματα του θρυμματισμού σχετίζεται κυρίως με την αποθήκευση των ξυλοτεμαχιδίων (chips). Εάν τα ξυλοτεμαχίδια είναι υγρά (που συνήθως είναι) υπάρχει κίνδυνος κατά την αποθήκευση να αναπτυχθούν μικροοργανισμοί και να προκαλέσουν προβλήματα υγείας, απώλεια ενέργειας, πρόκληση πυρκαγιάς. Ο θρυμματισμός των υπολειμμάτων ως μέρος της συγκομιδής ή των αραιώσεων για παραγωγή βιομάζας είναι δαπανηρό σύστημα συγκομιδής δασικών υπολειμμάτων [30,32]. Παρέχεται όμως η δυνατότητα σε πολλά συμβατικά συστήματα συγκομιδής του ξύλου η προσθήκη και εξοπλισμού θρυμματισμού με σημαντικά μικρότερο κόστος.

Το κόστος συλλογής και μεταφοράς των υπολειμμάτων έχει μεγάλη επίδραση στο τελικό κόστος παραγωγής ενέργειας. Μια έρευνα [37] έδειξε ότι το κόστος μεταφοράς των δεμάτων (ιδιαίτερα όταν είναι ξερά) είναι μικρότερο από των θρυμμάτων (chips) όταν χρησιμοποιούνται για παραγωγή ηλεκτρισμού. Υπάρχουν όμως διαφοροποιήσεις στα ευρήματα άλλων ερευνητών, ανάλογα με το δασοπονικό, είδος τη κατάσταση του δάσους, τον τρόπο μεταφοράς και τον τρόπο χρησιμοποίησής τους [18,19, 28,29,30, 39,40].

2.2.5. ΣΥΓΚΟΜΙΔΗ ΔΑΣΙΚΩΝ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Στην Ελλάδα δεν έχουν διαμορφωθεί συστήματα συγκομιδής δασικών υπολειμμάτων και τούτο γιατί δεν προβλέπεται στη διαχείριση των ελληνικών δασών η συγκομιδή και αξιοποίησή τους. Τα όποια δασικά υπολείμματα που συλλέγονται ατελώς ως καυσόξυλα ή

από καλλιεργητικές αραιώσεις συλλέγονται χειρονακτικά και μετατοπίζονται στο δασόδρομο κυρίως με ζώα και σπανιότερα με τροχοφόρους ελκυστήρες με ή χωρίς συρματόσχοινο. Οι μέθοδοι συγκομιδής δασικών υπολειμμάτων που περιγράφηκαν παραπάνω, εφαρμόζονται εκτεταμένα σε άλλες χώρες σε δάση όπου γίνονται αποφιλωτικές υλοτομίες ή υλοτομίες κατά λωρίδες και σπανιότερα σε υλοτομίες κατά ομάδες.

Στην Ελλάδα για συντηρητικούς (κατά τη γνώμη μας) δασοκομικούς λόγους, αλλά και λόγω των μεγάλων κλίσεων εφαρμόζονται υλοτομίες κατά επιλογή και σπανιότερα κατά ομάδες. Αποφιλωτικές υλοτομίες εφαρμόζονται μόνο σε λευκοκαλλιέργειες και σε λίγες διαχειριζόμενες εκτάσεις αείφυλλων πλατυφύλλων. Η αναγνώριση όμως και στη χώρα μας της μεγάλης περιβαλλοντικής, αλλά και οικονομικής, σημασίας που έχει η αξιοποίηση της δασικής βιομάζας για παραγωγή ενέργειας θα πρέπει να οδηγήσει σε ένα νέο πλαίσιο αειφορικής διαχείρισης των δασών μας και σε νέα πρότυπα πληρέστερης αξιοποίησης της παραγόμενης ή δυναμένης να παραχθεί ξυλώδους βιομάζας [21]. Ένα τέτοιο πλαίσιο διαχείρισης των δασών και των δασικών εκτάσεων θα πρέπει να οδηγήσει και σε υλοτομίες κατά λωρίδες, όπου το δασοπονικό είδος και η κλίση του εδάφους το επιτρέπουν, ώστε να διευκολύνεται η μηχανοποίηση των εργασιών και να μειώνεται το κόστος συγκομιδής. Σήμερα υπάρχουν νέα μηχανήματα συγκομιδής του ξύλου και των υπολειμμάτων υλοτομίας που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στα ελληνικά δάση. Υπάρχουν π.χ. μηχανήματα θρυμματισμού δασικών υπολειμμάτων μικρού μεγέθους και κόστους που εφαρμόζονται σε γεωργικούς ελκυστήρες που εύκολα μπορούν να μεταφερθούν στους δασοδρόμους των ελληνικών δασών.

Χρειάζονται έρευνα και τεχνικοοικονομικές μελέτες ανάπτυξης, εισαγωγής και εφαρμογής νέων συστημάτων συγκομιδής του ξύλου και υπολειμμάτων στις συνθήκες των ελληνικών δασών και αξιοποίησης των δασικών υπολειμμάτων για ενέργεια. Το πρώτο βήμα έγινε. Το Πράσινο Ταμείο χρηματοδοτεί σήμερα ερευνητικό πρόγραμμα μελέτης των δυνατοτήτων αξιοποίησης της ξυλώδους βιομάζας των υπολειμμάτων υλοτομίας ελάτης και οξιάς (βλ Εικόνα 1), που παραμένουν σήμερα αναξιοποίητα στα δάση, για παραγωγή εξευγενισμένων στερεών βιοκαυσίμων (πελλετών, wood pellets) [41].

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Τα υπολείμματα υλοτομιών που παραμένουν αναξιοποίητα στα δάση έχουν προκαλέσει μεγάλο ενδιαφέρον ως πηγή παραγωγής βιοενέργειας. Έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες συγκομιδής και μεταφοράς τους που σε συνδυασμό και με την αύξηση της τιμής των πετρελαιοειδών καθιστούν οικονομική την εκδάσωση τους.
- Έχουν επίσης αναπτυχθεί νέες τεχνολογίες μετατροπής της βιομάζας σε ενέργεια σε μικρές μονάδες ή μετατροπής της σε εξευγενισμένα στερεά βιοκαύσιμα (όπως πελλέτες, wood pellets) που μπορούν να εγκατασταθούν κοντά ή μέσα στα δάση και να περιορίζουν ακόμη περισσότερο το κόστος αξιοποίησης τους.
- Στην Ελλάδα δεν έχουν διαμορφωθεί συστήματα συγκομιδής δασικών υπολειμμάτων και τούτο γιατί δεν προβλέπεται στη διαχείριση των ελληνικών δασών η συγκομιδή και αξιοποίηση τους.
- Η αξιοποίηση της παραγόμενης ή δυναμένης να παραχθεί βιομάζας από τα ελληνικά δάση και τις δασικές εκτάσεις για παραγωγή ενέργειας μπορεί να συμβάλει στην περιβαλλοντική προστασία και στην περιφερειακή ανάπτυξη και επιβάλλεται να αποτελέσει αντικείμενο ενός νέου αειφορικού πλαισίου διαχείρισης των ελληνικών δασών.
- Πολλές από τις νέες μεθόδους συγκομιδής του ξύλου και των υπολειμμάτων υλοτομίας θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στα ελληνικά δάση. Χρειάζονται όμως έρευνα και τεχνικοοικονομικές μελέτες ανάπτυξης, εισαγωγής και εφαρμογής νέων συστημάτων συγκομιδής του ξύλου και υπολειμμάτων στις συνθήκες των ελληνικών δασών.

Η εργασία αποτελεί μέρος χρηματοδοτούμενου έργου από το Πράσινο Ταμείο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] FAO. 2014. State of the World's Forests. Enhancing the socioeconomic benefits from forests. FAO, Rome. <http://www.fao.org/3/a-i3710e.pdf>
- [2] Becker, D. R., et al 2011. The conventional wisdoms of woody biomass utilization. *Journal of Forestry*;109(4):208-218.
- [3] WWF, 2011. The energy Report. 100% Renewable Energy by 2050. assets.panda.org/downloads/101223_energy_report_final_print_2.pdf
- [4] Bouriaud, o., G. Stefan and M. Flocea. 2013. Predictive models of forest logging residues in Romanian spruce and beech forests. *Biomass and Bioenergy* 54: 5 9-6 6.
- [5] Gan, J. and C. T. Smith. 2009. Availability of logging residues and potential for electricity production and carbon displacement in the USA. *Biomass Bioenergy* 30:1011–1020. Gan, J. and C. T. Smith. 2007. Co-benefits of utilizing logging residues for bioenergy production. *Biomass and Bioenergy* 31:623–630.
- [6] Malinen, J. et al. 2010. Potential harvest for wood fuels (energy wood) from logging residues and first thinnings in Southern Finland. *Biomass Bioenergy* 20:189-196.
- [7] Nurmi, J. 2007. Recovery of logging residues for energy from spruce (*Picea abies*) dominated stands. *Biomass and Bioenergy* 31:375–380.
- [8] Peltola, J., H. Kilpeläinen and A. Asikainen. 2011. Recovery rates of logging residue harvesting in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karsten) dominated stands. *Biomass and Bioenergy* 35(4):1545-1551.
- [9] Verkerk P, Anttila P, Eggers J, Lindner M, Asikainen A. 2011. The realisable potential supply of woody biomass from forests in the European Union. *Forest Ecol Manag.* 261:2007 – 2015
- [10] Haughlin, M. et al. 2012. Estimating potential logging residues in a boreal forest by airborne laser scanning. *Biomass and Bioenergy* 2012:356-365.
- [11] Scarlat, N., V. Blujdea and J-F. Dallemand . 2011. Assessment of the availability of agricultural and forest residues for bioenergy production in Romania. *Biomass and Bioenergy* 35:1995-2005
- [12] Abbas, D. et al. 2011. Guidelines for harvesting forest biomass for energy: a synthesis of environmental considerations. *Biomass and Bioenergy* 2011;35:4538-4546.
- [13] Wall, A. and J. Hytönen. 2011. The long-term effects of logging residue removal on forest floor nutrient capital, foliar chemistry and growth of a Norway spruce stand. *Biomass and Bioenergy* 35:3328-3334.
- [14] McIver, J.D. and L. Starr, 2011. A literature review on the environmental effects of post residues logging. *Western Journal of Applied Forestry* 16, 159–168.
- [15] Kauriinoja, A. 2010. Small- scale biomass- to- energy solutions for northern peripheral areas. Masrer Thesis. Department of Process and Environmental Engineering. University of Oulu.
- [16] Bergseng, E. et al. 2013. Harvest residue potential in Norway – A bioeconomic model appraisal. *Scandinavian Journal of Forest Research* 28:5, 470-480.
- [17] Ledrew, K. M. L. Clark and I.B. Hedin . 2005. Equipment and systems for the recovery, transportation, and processing of woody biomass for energy: synthesis of the literature 1982-2002. *Advantage* 5(10):1-22
- [18] Grushecky S, Wang J, McGill D. 2007. Influence of site characteristics and costs of trucking and extraction on log residue utilization in southern West Virginia. *Forest Prod J* 57(7/8):63–67

- [19] Wang J, Long C, McNeel J, Baumgras J. 2004. Productivity, cost of manual felling and cable skidding in central Appalachian hardwood forests. *Forest Prod J* 54(12):45–51
- [20] Φιλίππου Ι.Λ. 014. Χημεία και Χημική Τεχνολογία Ξύλου. Εκδόσεις Γιαχούδη. Θεσσαλονίκη
- [21] Φιλίππου Ι.Λ. 2014. Αξιοποίηση Δασικής Βιομάζας για Παραγωγή Ενέργειας. Περιβαλλοντική και Αναπτυξιακή Συμβολή. 10^ο Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας 26-27 Νοεμβρίου 2014.
- [22] Sustain & Protect. Types of harvest. <http://oregonforest.org/content/logging>.
- [23] Ευθυμίου Π. 2011 Σημειώσεις Συγκομιδής Δασικών Προϊόντων. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- [24] Kärhä, K. 2006. Whole-tree harvesting in young stands in Finland. *Forestry Studies* 45:118–134.
- [25] WEB-Based forest management guides
www.nrs.fs.fed.us/fmg/nfmg/fm101/silv/p3_harvest.html
- [26] Ντάφης Σ. 1992. Εφημεροσμένη δασοκομική. Εκδόσεις Γιαχούδη. Θεσσαλονίκη.
- [27] Alan J. 2006. Environmentally Sound Forest Harvesting. Institute of Food and Agricultural Sciences
- [28] Wang J, Long C, McNeel J. 2004. Production and cost analysis of a feller-buncher and grapple skidder in central Appalachian hardwood forests. *Forest Prod J* 54(12):159–167
- [29] Spinelli R, Nati C, Magagnotti N. 2007. Recovering logging residue: experiences from the Italian Eastern Alps. *Croat J Forest Eng* 28:1–9
- [30] Johansson J, Liss J, Gullberg T, Björhedenc R. 2006. Transport and handling of forest energy bundles advantages and problems. *Biomass Bioenergy* 30(4):334–341. doi: 10.1016/j.biombioe.2005.07.012
- [31] Serup H., Kofman P. D. et al.. 2005. Wood for Energy Production, Irish edition COFORD, Dublin.
- [32] Hoyne S. Thomas A. Forest residues: Harvesting, storage and fuel value. <http://www.coford.ie/media/coford/content/publications/projectreports/residues.pdf>.
- [33] Li Y, Wang J, Miller G, McNeel J. 2006. Production economics of harvesting small-diameter hardwood stands in central Appalachia. *Forest Prod J* 56(3):81–86
- [34] Angus-Hankin, C., Stokes, B. & Twaddle, A. 1995. The transportation of fuel wood from forest to facility. *Biomass and Bioenergy* 9(1–5): 191–203.
- [35] Hoyne, S. 1996. A Study of the Mechanisation of Forest Residue Handling and the Design of a Bundling System. Masters Thesis, University of Limerick
- [36] Asikainen, A. & Nuutinen, Y. 2007. Forwarding of whole trees after manual and mechanized felling bunching in pre-commercial thinnings. *International Journal of Forest Engineering* 18(2): 29–39.
- [37] Johansson J, Liss J, Gullberg T, Björhedenc R. 2006. Transport and handling of forest energy bundles advantages and problems. *Biomass Bioenergy* 30(4):334–341. doi: 10.1016/j.biombioe.2005.07.012
- [38] Angus-Hankin, C., Stokes, B. & Twaddle, A. 1995. The transportation of fuel wood from forest to facility. *Biomass and Bioenergy* 9(1–5): 191–203.
- [39] Kärhä, K. (2007b). Machinery for forest chip production in Finland in 2007. *Metsätehon tulosalvosarja* 2007/14. 37 p
- [40] Jackson B, Schroeder R, Ashton S, Taylor E. 2010. Chipping woody biomass. http://www.extension.org/pages/Chipping_Woody_Biomass. Accessed 12 May 2010
- [41] Φιλίππου, Ι. 2014. Αξιοποίηση δασικής βιομάζας (υπολείμματα υλοτομιών) για παραγωγή-τυποποίηση εξευγενισμένων στερεών καυσίμων βιομάζας. Επιπτώσεις στο δασικό οικοσύστημα. Ερευνητικό πρόγραμμα. Χρηματοδότηση ΠΡΑΣΙΝΟ ΤΑΜΕΙΟ.

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ ΑΠΟ ΜΙΚΡΟΑΛΓΗ

Π. Καματερού*, Α. Ζαμπανιώτου

Ομάδα Βιομάζας, Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 54124, Θεσσαλονίκη,
e-mail: kamaterou@hotmail.com, azampani@chem.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις μέρες μας, όπου το ενεργειακό πρόβλημα εμφανίζεται να είναι οξύτερο από ποτέ, επιτακτική κρίνεται η ανάγκη για χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια, το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας έχει επικεντρωθεί στην αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων από καύσιμα, προερχόμενα από διάφορες πηγές βιομάζας. Η παραγωγή βιοκαυσίμων από μικροάλγη αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο και ελπιδοφόρο πεδίο έρευνας. Τα μικροφύκη, συγκριτικά με άλλες πηγές βιομάζας, δύναται να περιέχουν εκτός από υδατάνθρακες και πολύ σημαντικές ποσότητες λιπιδίων και πρωτεϊνών. Μία από τις τεχνικές που εφαρμόζονται για την παραγωγή βιοκαυσίμων από μικροάλγη, είναι αυτή της ταχείας πυρόλυσης, της ταχείας δηλαδή θερμικής αποσύνθεσης της οργανικής ύλης (ελεγχόμενη θέρμανση, απουσία οξυγόνου), με σκοπό και την παραγωγή βιοκαυσίμων. Ωστόσο, τα μικροφύκη θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως τροφοδοσία και μετά από κατάλληλη επεξεργασία κατά την οποία αφαιρούνται πολύτιμα συστατικά τους (Πρωτεΐνες, λιπίδια). Στόχος της παρούσας εργασίας είναι να διερευνηθεί η προοπτική παραγωγής βιοκαυσίμων από βιομάζα μικροάλγης καθώς και από τα υπολείμματα που προκύπτουν μετά από εκχύλιση των λιπιδίων ή και άλλων πολύτιμων συστατικών της με πυρόλυση της άλγης.

Λέξεις κλειδιά: Μικροάλγη, Πυρόλυση, Βιο-καύσιμα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με καύσιμα προερχόμενα από διάφορες πηγές βιομάζας αποτελεί ένα από τα φλέγοντα θέματα που απασχολεί την επιστημονική κοινότητα τα τελευταία χρόνια. Μια εναλλακτική πηγή βιομάζας θα μπορούσε να είναι η άλυη ή αλλιώς τα φύκη. Διακρίνονται δύο μεγάλες κατηγορίες άλυης: η μικροάλυη ή αλλιώς τα μικροφύκη και η μακροάλυη ή αλλιώς τα μακροφύκη. Τα μικροφύκη είναι κυρίως μονοκύτταροι ή πολυκύτταροι φωτοσυνθετικοί μικροοργανισμοί, ενώ τα μακροφύκη είναι πολυκύτταροι φωτοσυνθετικοί οργανισμοί που φέρουν χαρακτηριστικό θαλλό [1]. Τα μικροφύκη διακρίνονται στα Μπλε ή Κυανοβακτήρια, Κόκκινα, Πράσινα, Δινοφύκη ή Δινομαστιγωτά, Χρυσά, Πρασινοκίτρινα, Καφέ φύκη και τα Διάτομα ενώ τα μακροφύκη ταξινομούνται στα Χλωρόφυτα (πράσινα μακροφύκη), τα Ροδόφυτα (κόκκινα μακροφύκη) και τα Φαιόφυτα (καφέ μακροφύκη).

Η χρήση της άλυης ως εναλλακτική πηγή ενέργειας πλεονεκτεί σε σχέση με άλλες πηγές βιομάζας. Τα διάφορα είδη άλυης μπορούν να αναπτυχθούν σε θαλασσινό, υφάλμυρο ή καθαρό νερό και για την παραγωγή τους δεν καταλαμβάνονται καλλιεργήσιμα εδάφη. Διακρίνονται για τους υψηλούς ρυθμούς παραγωγικότητας τους, παρά το γεγονός ότι για την ανάπτυξη τους όχι μόνο δεν απαιτούνται μεγάλες ποσότητες θρεπτικών συστατικών αλλά ό,τι χρειάζονται περιορίζεται κυρίως σε CO₂, ηλιακή ακτινοβολία και νερό και μάλιστα ανεξαρτήτως περιβαλλοντικών συνθηκών. Επιπλέον, έχουν την ικανότητα να απομακρύνουν το CO₂ από τις εκπομπές βιομηχανιών και να μειώνουν την εκπομπή των αερίων του θερμοκηπίου κατά την παραγωγή βιο-ντίζελ. Χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία απόβλητων νερών απομακρύνοντας ιόντα NH₄⁺, NO₃⁻, PO₄³⁻ τα οποία τα μικροφύκη τα χρησιμοποιούν ως θρεπτικά συστατικά παρέχοντας έτσι το πλεονέκτημα της βιοαποκατάστασης των λυμάτων[2]. Έχουν πολύ μεγάλη περιεκτικότητα σε πολύτιμα συστατικά, όπως είναι οι πρωτεΐνες, οι υδατάνθρακες και τα λιπίδια που ενδείκνυται στην παραγωγή βιοκαυσίμων. Λόγω της βιοποικιλότητας μεταξύ των διαφόρων ειδών άλυων, ήδη λαμβάνεται από αυτά πληθώρα φυσικών ενώσεων με πολύτιμες και αξιοποιήσιμες ιδιότητες, οι οποίες χρησιμοποιούνται από διάφορους κλάδους της βιομηχανίας, όπως τα καύσιμα, πλαστικά, φαρμακευτικά προϊόντα, υφάσματα, χρώματα, βερνίκια, καλλυντικά και τρόφιμα [3].

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η παραγωγή βιοκαυσίμων από άλυη χρησιμοποιώντας θερμοχημικές τεχνολογίες μετατροπής-οι οποίες πλεονεκτούν σε σχέση με τις βιολογικές τεχνικές μετατροπής ως προς τον χρόνο πραγμάτωσης τους- και πιο συγκεκριμένα, αυτή της πυρόλυσης. Η πυρόλυση είναι η διαδικασία της ελεγχόμενης θέρμανσης απουσία οξυγόνου η οποία οδηγεί στην θερμική αποικοδόμηση της οργανικής ύλης σε αδρανή ατμόσφαιρα [4]. Κατά τη διάρκεια της πυρόλυσης, η βιομάζα αποσυντίθεται σε μέτριες έως υψηλές θερμοκρασίες σχηματίζοντας έτσι σημαντικές ποσότητες εξανθρακώματος, βιο-ελαίου και βιοαερίου (Syngas). Το εξανθράκωμα δύναται να χρησιμοποιηθεί στη γεωργία ως εδαφοβελτιωτικό ή ακόμη και στην παραγωγή ενεργού άνθρακα, τα πυρολυτικά έλαια περιέχουν εκατοντάδες χρήσιμες οργανικές ενώσεις, οπότε εξετάζεται η καταλληλότητα τους ως καύσιμα, ενώ το Syngas χρησιμοποιείται είτε στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είτε στην παραγωγή βιο-καυσίμων.

Στην παρούσα εργασία εξετάζονται τα προϊόντα πυρόλυσης είδους μικροάλυης, πριν και μετά την επεξεργασία της για παραλαβή των λιπιδίων της, ως προς την καταλληλότητα τους ως βιο-καύσιμα.

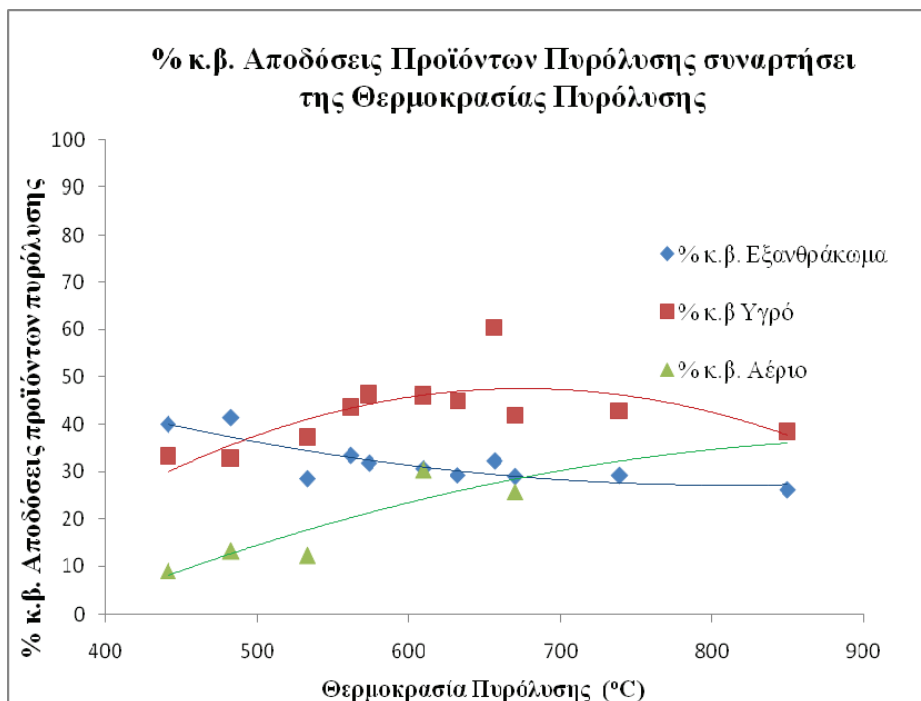
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η ταχεία πυρόλυση μικροάλυης και του υπολείμματος που προκύπτει από αυτή μετά την αφαίρεση των λιπιδίων έλαβε χώρα σε ασυνεχή αντιδραστήρα σταθερής κλίνης (τύπου εγκλεισμού δείγματος) σε εύρος θερμοκρασιών 400-850°C. Ο ρυθμός θέρμανσης ήταν 50°C/s, σε ατμοσφαιρική πίεση και αδρανή ατμόσφαιρα. Η ανάλυση των παραγόμενων

αερίων έλαβε χώρα σε σύστημα αέριας χρωματογραφίας 6890 AgilentTechnologies που συνδυάζεται με δύο χρωματογραφικές στήλες HP-PlotQ και HP-Molsive. Το εξανθράκωμα μελετήθηκε με την τεχνική της υπέρυθρης φασματοσκοπίας FT-IR. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε φασματόμετρο Perkin-ElmerSpectrum 400 Series. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε ανάλυση 4 cm^{-1} στους $4000\text{-}450 \text{ cm}^{-1}$, με 64 scans. Επιπλέον, μελετήθηκε και το πορώδες με συσκευή *TriStar 3000 V6.04 A*. Απαέρωση πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασία δωματίου για 24h. Τέλος, πραγματοποιήθηκε και στοιχειακή ανάλυση με τη μέθοδο LECO- ASDM-D 5291, σε στοιχειακό αναλυτή CHNS-LECO 680.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι αποδόσεις του εξανθρακώματος, των πηητικών και του παραγόμενου αερίου που επιτυγχάνονται από την πυρόλυση του υπολείμματος που προκύπτει μετά από κατάλληλη επεξεργασία της μικροάλγης δίνονται στο διάγραμμα που ακολουθεί (Εικόνα1). Η μέγιστη απόδοση για τα πηητικά είναι 48 % κ.β. κοντά στους $650 \text{ }^\circ\text{C}$. Όπως ήταν αναμενόμενο, με την αύξηση της θερμοκρασίας μειώνεται η απόδοση του εξανθρακώματος και αυξάνεται η απόδοση του παραγόμενου αερίου.



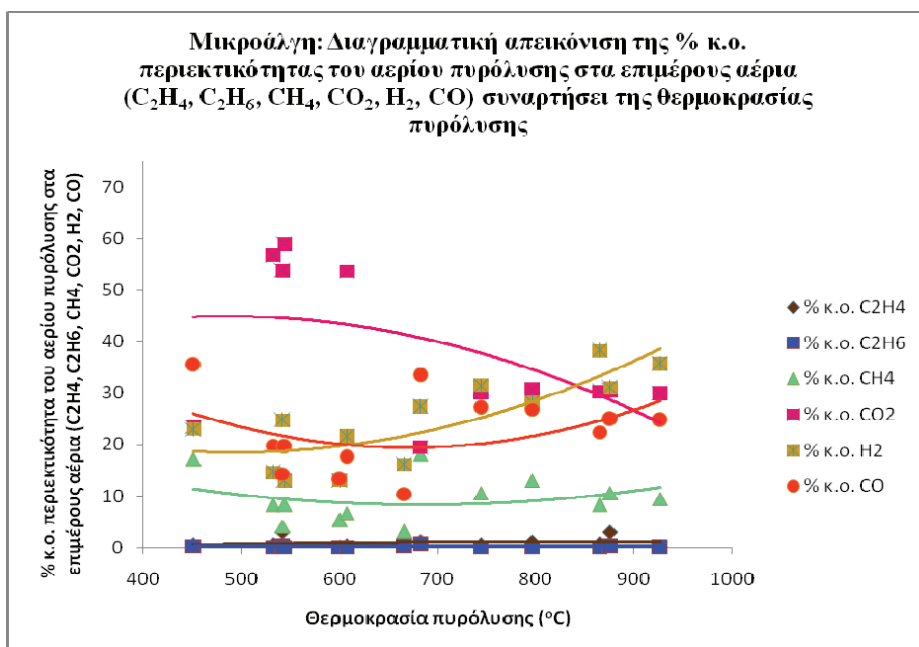
Εικόνα 1: Διαγραμματική απεικόνιση % κ.β. σύστασης σε στερεό, υγρό και αέριο των προϊόντων πυρόλυσης της επεξεργασμένης μικροάλγης συναρτήσει της θερμοκρασίας πυρόλυσης.

Η στοιχειακή ανάλυση του εξανθρακώματος έδειξε ότι περιέχει 37 % κ.β. C, 2,5 % κ.β. H και 6 % κ.β. N. Η φασματοσκοπία υπέρυθρου αποκάλυψε ότι το εξανθράκωμα, που έχει παραχθεί στους $500 \text{ }^\circ\text{C}$, περιέχει πλήθος χρήσιμων ουσιών, όπως αλκοόλες, αρωματικές

ενώσεις, καρβοξυλικές ή/και καρβονυλικές ενώσεις κ.α. Το πορώδες του εξανθρακώματος ήταν ελάχιστο (BETSurfaceArea: 0.0236 m²/g). Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, δεν ενδείκνυται η χρήση του στην παραγωγή ενεργού άνθρακα, ωστόσο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στη γεωργία, ως εδαφοβελτιωτικό.

Όπως έχει μέχρι σήμερα παρατηρηθεί [5,6], τα βιοέλαια που παράγονται από πυρόλυση μικροάλγης είναι σε γενικές γραμμές όξινα, δεν είναι σταθερά και έχουν μεγάλο ιξώδες. Στα μειονεκτήματα τους επίσης συγκαταλέγονται και το ότι περιέχουν στερεά υπολείμματα, χημικά αδιάλυτο νερό όπως επίσης και σημαντικές ποσότητες αζώτου. Για όλους αυτούς τους λόγους, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας στην παραγωγή καυσίμων αλλά απαιτείται πρωτίστως αναβάθμιση τους ώστε να εξασφαλιστεί η καταλληλότητά τους

Το αέριο μίγμα που λαμβάνεται μετά την πυρόλυση του υπολείμματος αποτελείται κυρίως από H₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆, CO και CO₂. Στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 2) απεικονίζεται η σύσταση του αερίου συναρτήσει της θερμοκρασίας πυρόλυσης.



Εικόνα 2: Διαγραμματική απεικόνιση της % κ.ο. περιεκτικότητας του αερίου πυρόλυσης στα επιμέρους αέρια, C₂H₄, C₂H₆, CH₄, CO₂, H₂ και CO συναρτήσει της θερμοκρασίας πυρόλυσης.

Όπως διακρίνεται από το παραπάνω διάγραμμα, οι ποσότητες των H₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆ και CO αυξάνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας, σε αντίθεση με το CO₂ που μειώνεται.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όσον αφορά στα προϊόντα της πυρόλυσης του υπολείμματος της μικροάλγης, το εξανθράκωμα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό, δεδομένου ότι περιέχει N που αποτελεί θρεπτικό συστατικό και ευνοεί την ανάπτυξη των φυτών. Θα μπορούσε να

μελετηθεί η σύσταση του βιο-ελαίου ώστε να αξιολογηθεί η καταλληλότητα του ως βιο-καύσιμο. Παρά το γεγονός ότι η ποσότητα του παραγόμενου αερίου είναι σχετικά μικρή, ωστόσο η σύσταση του είναι καλή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Jung K.A., Lim S.R., Kim Y, Park J.M., 2013, "Potentials of macroalgae as feedstocks for biorefinery", *Bioresource Technology* 135, pp182–190
- [2] Borowitzka, M.A., Siva, C.J., 2007, The taxonomy of the genus *Dunaliella* (Chlorophyta, Dunaliellales) with emphasis on the marine and halophilic species, *J. Appl. Phycol.* 19, 567–590
- [3] Andrade P. B., Barbosa M., Matos R. P., Lopes G., Vinholes J., Mouga T., Valentao P., 2013, "Valuable compounds in macroalgae extracts", *Food Chemistry* 138, pp1819–1828
- [4] Manara P., Zabaniotou A., 2012, "Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion – A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, pp2566– 2582
- [5] Brennan, L., Owende, P., 2010, "Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products", *Renewable Sustainable Energy Review* 14, pp557–577.
- [6] Beneroso, D., Bermidez, J.M., Arenillas, A., Menindez, J.A., 2013, "Microwave pyrolysis of microalgae for high syngas production", *BioresourceTechnology*, 144, pp240–246.

ΑΕΙΦΟΡΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ 2^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ ΜΕΣΩ ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΗΓΑΝΕΛΑΙΩΝ

Σ. Μπεζεργιάννη*, Α. Δημητριάδης, Α.Π. Χρυσικού

Εργαστήριο Περιβαλλοντικών Καυσίμων & Υδρογονανθράκων (ΕΠΚΥ),
Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων (ΙΔΕΠ),
Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ),
6^ο χλμ. Χαριλάου Θέμης, 57001 Θέρμη, Θεσσαλονίκη, email: sbezerg@cperi.certh.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη μελέτη επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη μίας τεχνολογίας παραγωγής ενός νέου βιοντίζελ υψηλών προδιαγραφών χρησιμοποιώντας αποκλειστικά υπολειμματικές πρώτες ύλες, η χρήση του οποίου να μην προσδίδει τεχνικά ή περιβαλλοντικά προβλήματα σε σχέση με το συμβατικό ντίζελ κίνησης. Η προτεινόμενη τεχνολογία στηρίζεται στην καταλυτική υδρογονοεπεξεργασία χρησιμοποιημένων μαγειρικών ελαίων (τηγανέλαια), τα οποία συλλέχθηκαν από διάφορα εστιατόρια και νοικοκυριά της Θεσσαλονίκης. Για την ανάπτυξη της νέας τεχνολογίας εξετάστηκαν τρεις εμπορικοί καταλύτες υδρογονοεπεξεργασίας, καθώς και ένα εύρος θερμοκρασιών αντίδρασης (330^ο-398^οC), πιέσεων, (8.27-9.65MPa), λόγου τροφοδοσίας H₂/τηγανέλαιο (543-890Nm³/m³) και ταχύτητας χώρου αντίδρασης LHSV (0.5-1.5hr⁻¹). Βάσει των ανωτέρω πειραμάτων προσδιορίστηκαν ο καταλύτης και οι λειτουργικές παράμετροι υδρογονοεπεξεργασίας που μεγιστοποιούν την απόδοση μετατροπής σε ντίζελ και την ποιότητα αυτού. Η απόδοση της νέας αυτής τεχνολογίας είναι εντυπωσιακή, καθώς ξεπερνά το 90% κ.ο., ενώ το παραγόμενο νέο βιοντίζελ 2^{ης} γενιάς είναι ένα καύσιμο υψηλών προδιαγραφών και συγκεκριμένα με υψηλό δείκτη κετανίου (77), μηδενική οξύτητα και υψηλή θερμογόνο δύναμη (49MJ/kg). Για την πιλοτική επίδειξη της νέας τεχνολογίας παράχθηκαν 2 τόνοι του νέου βιοντίζελ 2^{ης} γενιάς στο ΕΚΕΤΑ, το οποίο χρησιμοποιήθηκε σε ένα απορριματοφόρο του Δήμου Θες/νίκης. Μάλιστα, λαμβάνοντας υπόψη τις διαθέσιμες ποσότητες τηγανελαιών στην Ελλάδα και την απόδοση της νέας τεχνολογίας, θεωρείται ότι το νέο βιοντίζελ 2^{ης} γενιάς μπορεί να ικανοποιήσει το 9.5% των αναγκών ντίζελ κίνησης της ελληνικής αγοράς. Πρωταρχικός στόχος του έργου ήταν και η αξιολόγηση της αιφορίας παραγωγής του νέου βιοντίζελ 2^{ης} γενιάς, ποσοτικοποιώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε όλα τα επιμέρους στάδια της παραγωγικής διεργασίας και συγκεκριμένα τις εκπομπές θερμοκηπτικών αερίων. Από τα αποτελέσματα της μελέτης διαπιστώθηκε ότι το νέο παραγόμενο βιοντίζελ είναι αιφορικότερο του συμβατικού ντίζελ και του βιοντίζελ 1^{ης} γενιάς γνωστό ως FAME (Fatty Acid Methyl Esters). Για την περαιτέρω βελτίωση της συνολικής αιφορίας της εξεταζόμενης διεργασίας, διερευνήθηκε η ενσωμάτωση H₂ από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) όπως η ηλιακή ενέργεια.

Λέξεις κλειδιά: Τηγανέλαια, υδρογονοεπεξεργασία, περιβάλλον, αιφορία, βιοκαύσιμα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αυξανόμενη ζήτηση και κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων σε συνδυασμό με τη συνεχή εξάντληση των αποθεμάτων τους στον πλανήτη έχει στρέψει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στην αναζήτηση νέων τεχνολογιών παραγωγής καυσίμων. Τα βιοκαύσιμα έρχονται να αναλάβουν αυτόν το νέο ρόλο και να αντικαταστήσουν τα συμβατικά καύσιμα. Πολλές έρευνες έχουν γίνει όσον αφορά τις τεχνολογίες και τον τρόπο παραγωγής τους. Η υδρογονοεπεξεργασία είναι μια διεργασία μετατροπής με καταλυτική προσθήκη υδρογόνου (H_2), στοχεύει στην αύξηση του λόγου H_2 προς άνθρακα (C) (H:C), στη μείωση των ετεροατόμων του θείου, του αζώτου και του οξυγόνου (S, N, O) και στην ελάττωση του σημείου βρασμού. Η υδρογονοεπεξεργασία προτιμάται ως μέθοδος καθώς αποτελεί μία ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία παραγωγής ντίζελ και βενζίνης, υπάρχουν πολυάριθμες βιομηχανικές μονάδες παγκοσμίως, έχει υψηλό βαθμό απόδοσης σαν διεργασία, επιτρέπει ευελιξία στην επιλογή της τροφοδοσίας, δεν παράγει παραπροϊόντα και εφαρμόζεται για την παραγωγή βιοντίζελ από ακατέργαστα φυτικά έλαια.

Η συγκεκριμένη μελέτη επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη μίας τεχνολογίας παραγωγής ενός νέου βιοντίζελ υψηλών προδιαγραφών χρησιμοποιώντας αποκλειστικά υπολειμματικές πρώτες ύλες, η χρήση του οποίου να μην προσδίδει τεχνικά ή περιβαλλοντικά προβλήματα σε σχέση με το συμβατικό ντίζελ κίνησης. Η προτεινόμενη τεχνολογία στηρίζεται στην καταλυτική υδρογονοεπεξεργασία χρησιμοποιημένων μαγειρικών ελαίων (τηγανέλαια), και αναπτύχθηκε βάσει στοχευμένων πειραμάτων που διεξήχθησαν στη μονάδα υδρογονοεπεξεργασίας πιλοτικής κλίμακας VB01 του ΕΠΚΥ/ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ. Για τη μελέτη χρησιμοποιήθηκε τηγανέλαιο, το οποίο συλλέχθηκε από διάφορα εστιατόρια και νοικοκυριά της Θεσσαλονίκης. Ο στόχος ήταν η παραγωγή αρκετής ποσότητας η οποία στη συνέχεια να περάσει από μια μονάδα απόσταξης από όπου θα συλλεχθεί το καθαρό προϊόν που έχει σημείο βρασμού στο εύρος του ντίζελ. Το τελικό βιοκαύσιμο (βιοντίζελ 2^{15} γενιάς) στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για να κινήσει ένα απορριμματοφόρο του Δήμου Θεσσαλονίκης για μερικούς μήνες με σκοπό να μελετηθεί η απόδοσή του κατά τη διάρκεια της χρήσης του σε κινητήρα.

Για την ανάπτυξη της νέας τεχνολογίας εξετάστηκαν τρεις εμπορικοί καταλύτες υδρογονοεπεξεργασίας [1], καθώς και εύρος θερμοκρασιών αντίδρασης (330° - 398° C)[2][3], και πιέσεων (8.27-9.65MPa) [4], λόγου τροφοδοσίας H_2 /τηγανέλαιο (543 - 890 Nm³/m³)[4] και ταχύτητας χώρου αντίδρασης LHSV (0.5 - 1.5 hr⁻¹) [4]. Βάσει των ανωτέρω πειραμάτων προσδιορίστηκαν ο καταλύτης και οι λειτουργικές παράμετροι υδρογονοεπεξεργασίας που μεγιστοποιούν την απόδοση μετατροπής σε ντίζελ και την ποιότητα αυτού.

Στο πλαίσιο της έρευνας πραγματοποιήθηκε και μελέτη αξιολόγησης της αιφορίας της νέας αυτής τεχνολογίας. Για την αποτύπωση της αιφορικότητας των τεχνολογιών παραγωγής βιοκαυσίμων χρησιμοποιείται η ανάλυση κύκλου ζωής (AKZ). Η AKZ ποσοτικοποιεί τις εκπομπές θερμοκηπικών αερίων, αποτελώντας ένα πολύτιμο εργαλείο αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων διαφορετικών τεχνολογιών παραγωγής καυσίμων. Πιο συγκεκριμένα, η AKZ έχει χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της αιφορίας του συμβατικού ντίζελ ορυκτής προέλευσης, καθώς και των βιοκαυσίμων [5][6][7]. Στη συγκεκριμένη εργασία θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της AKZ που πραγματοποιήθηκε για τη νέα τεχνολογία καταλυτικής υδρογονοεπεξεργασίας χρησιμοποιημένων τηγανελαιίων για την παραγωγή βιοντίζελ 2^{15} γενιάς. Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν πειραματικά δεδομένα για να ποσοτικοποιηθούν οι εκπομπές των θερμοκηπικών αερίων, ενώ παράλληλα αξιολογήθηκε και η βελτίωση της συνολικής αιφορικότητας με την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) για την κάλυψη μέρους των ενεργειακών αναγκών της διαδικασίας, όπως το ηλιακό H_2 .

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

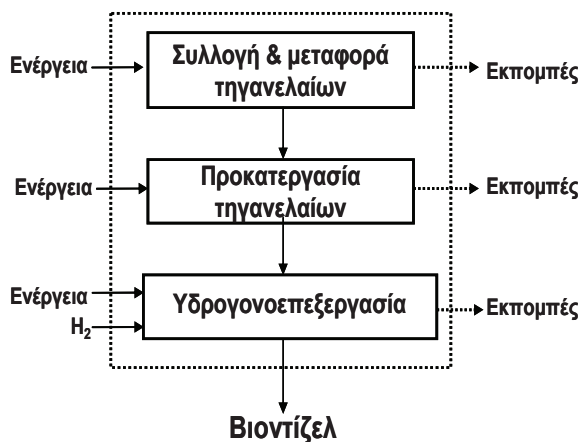
Για την εκπόνηση της παρούσας μελέτης, τα αρχικά πειράματα για την αξιολόγηση των καταλυτών και για την εύρεση των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας [1][2][3][4]

χρησιμοποιήθηκε μια μικρή μονάδα καταλυτικής υδρογονοεπεξεργασίας (VB01) του ΕΠΚΥ/ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ, στην συνέχεια αξιοποιώντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν, η τεχνολογία εφαρμόστηκε σε μια μεγαλύτερη μονάδα καταλυτικής υδρογονοεπεξεργασίας (HDS) του ΕΠΚΥ/ΙΔΕΠ/ΕΚΕΤΑ με στόχο την παραγωγή 2 τόννων βιοκαυσίμου για τη χρήση του στο απορριμματόφορο. Οι μονάδες VB01 και HDS είναι δύο μονάδες καταλυτικής υδρογονοεπεξεργασίας που αποτελούνται από ένα σύστημα αέριας και υγρής τροφοδοσίας από όπου εισέρχεται το αέριο H₂ και η υγρή τροφοδοσία (τηγανέλαιο), περιλαμβάνει το σύστημα συλλογής των υγρών και αέριων προϊόντων, επίσης ένα σύστημα διαχωρισμού των υγρών και αέριων προϊόντων και τέλος ένα σύστημα αντίδρασης.

Η τροφοδοσία προέρχεται από χρησιμοποιημένα τηγανέλαια τα οποία με τη βοήθεια του Δήμου Θεσσαλονίκης συλλέχθηκαν από διάφορα εστιατόρια της πόλης. Τα τηγανέλαια πριν την εισαγωγή τους στη μονάδα φιλτράρονται για να απομακρυνθούν τυχόν υπολείμματα που μπορεί να έχουν παραμείνει μετά το μαγείρεμα. Το προϊόν που παράγεται από τη μονάδα HDS είναι ένα διφασικό μείγμα και περιείχε κάποια ποσότητα νερού. Για την απομάκρυνση του νερού, το προϊόν τοποθετείται σε ένα δοχείο καθίζησης από όπου συλλέγεται το τελικό καθαρό προϊόν. Στη συνέχεια το προϊόν από το δοχείο καθίζησης καθαρό πλέον χωρίς νερό τοποθετείται σε μια μονάδα απόσταξης, όπου χωρίζεται στα διάφορα κλάσματά του. Τα κλάσματα τα οποία βρίσκονται στο σημείο του ντίζελ απομακρύνονται σαν τελικό προϊόν (βιοντίζελ 2^{ης} γενιάς), ενώ τα βαρύτερα κλάσματα απομακρύνονται σαν υπόλειμμα. Η μονάδα της απόσταξης αποτελείται από το δοχείο που βρίσκεται η τροφοδοσία, την αποστακτική στήλη και το δοχείο συλλογής του.

Αναφορικά με τη μελέτη αειφορίας, τα όρια του συστήματος όπου πραγματοποιήθηκε η ΑΚΖ παρουσιάζονται στην Εικόνα 1. Πιο συγκεκριμένα, στη μελέτη ΑΚΖ συμπεριλήφθηκαν τα στάδια της εξεταζόμενης παραγωγικής διαδικασίας, τα οποία είναι τα παρακάτω:

- ✓ Συλλογή χρησιμοποιημένων τηγανελαιών
- ✓ Μεταφορά χρησιμοποιημένων τηγανελαιών στη μονάδα μετατροπής τους
- ✓ Μετατροπή των χρησιμοποιημένων τηγανελαιών σε βιοντίζελ 2^{ης} γενιάς



Εικόνα 1: Όρια συστήματος ΑΚΖ παραγωγής βιοντίζελ 2^{ης} γενιάς

Το πρώτο στάδιο αφορά στη συλλογή τηγανελαιών, το δεύτερο στη μεταφορά τους στα σημεία συλλογής στη μονάδα παραγωγής, και το τρίτο και τελευταίο στάδιο τη θερμοκαταλυτική μετατροπή του τηγανελαιού σε βιοντίζελ 2^{ης} γενιάς. Κάθε ένα από τα στάδια αυτά έχει εισροές (ενέργεια, H₂) και εκροές (εκπομπές), που λαμβάνονται υπόψη στη συνολική ΑΚΖ.

Στην παρούσα μελέτη η λειτουργική μονάδα (functionalunit) που θεωρήθηκε είναι το 1 MJ του νέου προϊόντος, και αποτελεί τη βάση υπολογισμού των θερμοκηπικών αερίων που εκπέμπονται σε κάθε μέρος της παραγωγικής διαδικασίας. Ο περιβαλλοντικός δείκτης που χρησιμοποιήθηκε για την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της εξεταζόμενης παραγωγικής διεργασίας είναι το δυναμικό παγκόσμιας θέρμανσης του πλανήτη (Global Warming Potential, GWP), που εκφράζεται σε ισοδύναμες ποσότητες CO₂ (CO₂ eq-). Το CO₂ eq- περιλαμβάνει τις επιπτώσεις όλων των εκπομπών των θερμοκηπικών αερίων, καθώς υπολογίζεται από την αναγωγή των εκπομπών θερμοκηπικών αερίων (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs και SF₆) σε CO₂ eq- [7].

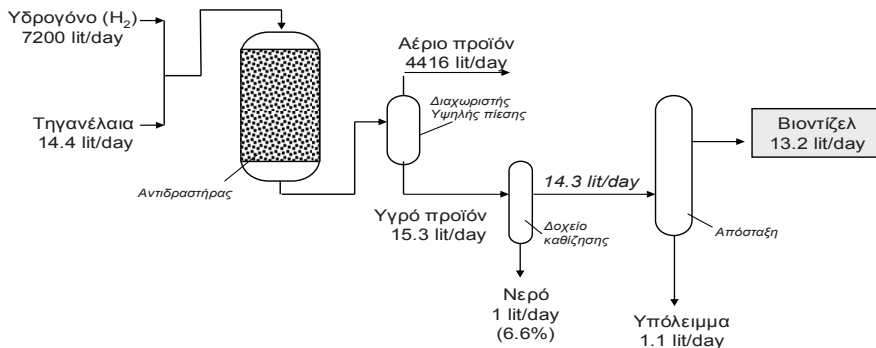
Για τη μελέτη AKZ ελήφθησαν υπόψη οι παρακάτω παραδοχές:

- Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της συλλογής τηγανελαιών θεωρούνται αμελητέες σε σύγκριση με αυτές των υπολοίπων σταδίων παραγωγής, λόγω των μικρών διανυόμενων αποστάσεων. Συγκεκριμένα τα χρησιμοποιημένα τηγανέλαια συλλέχθηκαν από 23 εστιατόρια που συμμετείχαν στο πιλοτικό πρόγραμμα [8], διάσπαρτα σε διάφορα σημεία της Θεσσαλονίκης, καθιστώντας την ενεργειακή κατανάλωση (εισροές) της εντός-ορίων-πόλης συλλογής αμελητέα, όπως έχει ήδη αναφερθεί και σε άλλες παρόμοιες μελέτες [9][10].
- Οι εκπομπές θερμοκηπικών αερίων που συνδέονται με την καταλυτική υδρογονοεπεξεργασία των τηγανελαιών, και ειδικότερα οι ενεργειακές καταναλώσεις, υπολογίστηκαν με βάση βιβλιογραφικά δεδομένα [11].
- Το H₂ που απαιτείται για την καταλυτική υδρογονοεπεξεργασία των τηγανελαιών παράγεται από την καταλυτική αναμόρφωση φυσικού αερίου, η αειφορικότητα του οποίου έχει αξιολογηθεί βάση στοχευμένης AKZ [12].
- Η χρήση ηλιακού H₂ για την κάλυψη των αναγκών καταλυτικής υδρογονοεπεξεργασίας τηγανελαιού μελετήθηκε στο πλαίσιο του ίδιου έργου[8] μέσω μίας μονάδας παραγωγής ηλιακού H₂ ισχύος 10kW_p. Στην περίπτωση ενσωμάτωσης ηλιακού H₂ για την κάλυψη μέρους των αναγκών H₂ της καταλυτικής υδρογονοεπεξεργασίας τηγανελαιών, οι εκπομπές θερμοκηπικών αερίων παραγωγής του ηλιακού H₂ θεωρούνται αμελητέες, καθώς δεν επηρεάζεται καμία μορφή ενέργειας ορυκτής προέλευσης.
- Οι θερμοκηπικές εκπομπές των υλικών για την κατασκευή, εγκατάσταση και απόσυρση όλων των παραγωγικών συστημάτων (αντιδραστήρες, αντλίες, διαχωριστές, δεξαμενές αποθήκευσης, φωτοβολταϊκά, μπαταρίες) δεν λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα μελέτη καθώς αποσκοπεί στην αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, που συνδέονται μόνο με την παραγωγή του νέου βιοντίζελ 2^{ns} γενιάς από τηγανέλαια.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

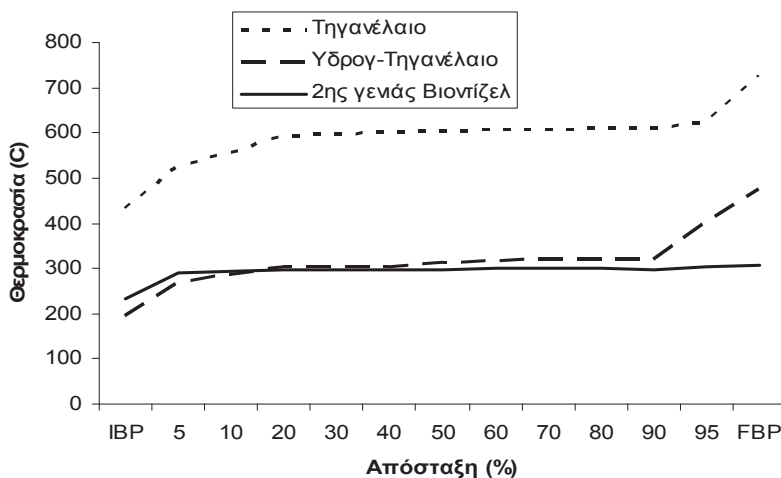
Στη συγκεκριμένη εργασία έγινε μελέτη της συνολικής διεργασίας από την αρχική τροφοδοσία που είναι το τηγανέλαιο μέχρι τη συλλογή του τελικού βιοντίζελ 2^{ns} γενιάς και την εφαρμογή του στον κινητήρα ενός απορριμματοφόρου του Δήμου Θεσσαλονίκης. Στην Εικόνα 2 φαίνεται σχηματικά η συνολική διεργασία. Η τροφοδοσία (τηγανέλαιο) που μπαίνει στην μονάδα την ημέρα είναι 14.4λίτρα/ημέρα ενώ η παροχή H₂ είναι 7200λίτρα/ημέρα. Ύστερα από τις αντιδράσεις υδρογονοεπεξεργασίας το προϊόν που παράγεται είναι 15,3λίτρα/ημέρα, όπως παρατηρείται ο όγκος του τελικού προϊόντος αυξάνεται μετά από τις αντιδράσεις που ακολουθούν και αυτό συμβαίνει γιατί η πυκνότητα του προϊόντος μεταβάλλεται σε σχέση με την αρχική πυκνότητα που έχει η τροφοδοσία. Στη συνέχεια το προϊόν τοποθετείται σε δοχείο καθίζησης από όπου απομακρύνεται το νερό το οποίο αποτελεί περίπου το 6.6% του συνολικού παραγόμενου προϊόντος. Περαιτέρω, το καθαρό πια προϊόν (14.3λίτρα/ημέρα), που δεν έχει νερό, τοποθετείται στην μονάδα απόσταξης από όπου απομακρύνονται τα βαρύτερα υπολείμματα που αποτελούν το 7.5% του προϊόντος και τέλος παίρνουμε το καθαρό βιοντίζελ 2^{ns} γενιάς που αποτελεί το 92.5% (13.2λίτρα/ημέρα)

του υδρογονοεπεξεργασμένου καθαρού προϊόντος μετά την απομάκρυνση του νερού. Ο βαθμός απόδοσης της συνολικής διεργασίας υπολογίζεται από το τελικό βιοντίζελ που παράγεται σε σχέση με την ποσότητα του αρχικού τηγανέλαιου που τροφοδοτούμε στην μονάδα και είναι 91.6%. Το αποτέλεσμα αυτό είναι πολύ σημαντικό καθώς φαίνεται ότι από το αρχικό τηγανέλαιο που τοποθετείται στην αρχή της διεργασίας το 91.6% μετατρέπεται εξολοκλήρου σε καθαρό βιοντίζελ με σημείο βρασμού στο εύρος του ντίζελ.



Εικόνα 2: Συνολική διεργασία μετατροπής τηγανέλαιου σε βιοντίζελ

Όπως έχει είδη αναφερθεί η υδρογονοεπεξεργασία είναι μια διεργασία που στοχεύει στην διάσπαση βαριών μορίων σε ελαφρύτερα μόρια, στην Εικόνα 3 φαίνεται η καμπύλη απόσταξης και μας δείχνει κατά πόσο έχει επιτευχθεί αυτή η διάσπαση. Η καμπύλη απόσταξης δείχνει ποια ποσοστά του τελικού προϊόντος βρίσκονται στην περιοχή του ντίζελ και της βενζίνης και στην ουσία κατά πόσο έχουν πετύχει οι αντιδράσεις υδρογονοεπεξεργασίας. Από την εικόνα 3 είναι εμφανές ότι το τηγανέλαιο αποτελείται από πολύ βαριά μόρια με υψηλό σημείο βρασμού.



Εικόνα 3: Καμπύλη απόσταξης

Ύστερα από την υδρογονοεπεξεργασία του τηγανέλαιου, το υδρογονοεπεξεργασμένο προϊόν αποτελείται πλέον από πολύ ελαφρύτερα μόρια που βρίσκονται στο εύρος του ντίζελ, πιο συγκεκριμένα ένα μεγάλο ποσοστό της τάξεως του 92% μετατράπηκε σε λευκά προϊόντα. Από την απόσταξη του συγκεκριμένου προϊόντος προέκυψε το καθαρό βιοντίζελ 2^{ns} γενιάς με σημείο βρασμού στο εύρος του ντίζελ. Από εδώ φαίνεται η αποτελεσματικότητα της όλης διεργασίας από την οποία χρησιμοποιώντας μια τροφοδοσία με βαριά μόρια (τηγανέλαιο) παράχθηκε ένα πολύ ελαφρύτερο προϊόν.

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται οι ιδιότητες της τροφοδοσίας (τηγανέλαιο), του προϊόντος μετά την διαδικασία της υδρογονοεπεξεργασίας καθώς και του τελικού βιοντίζελ που προκύπτει από την απόσταξη του υδρογονοεπεξεργασμένου προϊόντος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι κάποιες μικρές ποσότητες θείου και αζώτου προστίθενται στην τροφοδοσία της υδρογονοεπεξεργασίας για να αυξηθεί η ενεργότητα του καταλύτη. Οι απόλυτες τιμές των περιεκτικότητων του θείου, αζώτου και οξυγόνου της τροφοδοσίας καθώς και των τελικών προϊόντων παρουσιάζονται στον πίνακα 1. Όπως παρατηρείται από τον πίνακα 1 τα ποσοστά των τριών ετεροατόμων στο τελικό προϊόν είναι πολύ χαμηλότερα από της τροφοδοσίας κάτι που αποδεικνύει ότι οι αντιδράσεις υδρογονοεπεξεργασίας για την απομάκρυνση των ετεροατόμων ήταν επιτυχείς. Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι ιδιότητες του παραγόμενου βιοκαυσίμου. Ο δείκτης κετανίου (cetane index) είναι μια υπολογιστική εκτίμηση του αριθμού κετανίου (cetane number), και υπολογίζεται με βάση τα δεδομένα της απόσταξης και της πυκνότητας. Η συνηθέστερη μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του είναι η ASTM D 976. Ο αριθμός κετανίου είναι πολύ σημαντικός καθώς δείχνει το χρόνο που χρειάζεται από την έγχυση του καυσίμου μέχρι την αυτανάφλεξή του. Όσο πιο μεγάλος είναι τόσο πιο μικρή είναι η καθυστέρηση της ανάφλεξης. Όπως φαίνεται από τον πίνακα 2 ο δείκτης κετανίου είναι αρκετά ικανοποιητικός για το παραγόμενο βιοντίζελ 2^{ns} γενιάς.

Πίνακας 1: Ιδιότητες τροφοδοσίας-προϊόντων				
		Τηγανέλαιο	Υδρ/σμένο τηγανέλιο	Τελικό προϊόν/ Βιοντίζελ
Πυκνότητα	gr/cm ³	0.896	0.7562	0.7869
C	wt%	76.74	84.59	86.67
H	wt%	11.61	15.02	14.74
S	wppm	38	11.80	1.54
N	wppm	47.42	0.77	1.37
O	wt%	11.63	0.3887	0
Br#		49.1	594.2	18.2
Απόσταξη				
0%	°C	431.6	195.6	234.1
5%	°C	525.6	271.6	291.7
10%	°C	556.4	287.4	294.1
20%	°C	593	302.8	295.7
30%	°C	599	304.0	296.8
40%	°C	601.4	305.0	297.6
50%	°C	603.2	314.4	298.3
60%	°C	606.8	318.0	299.1
70%	°C	609	319.0	300
80%	°C	610.4	319.8	301.1
90%	°C	612.4	320.4	298.3
95%	°C	623.6	401.6	304.2
100%	°C	727.2	475.4	306.2

Το σημείο νέφωσης (cloud point) είναι η θερμοκρασία στην οποία εμφανίζεται το πρώτο κερύ όταν το καύσιμο αρχίζει και ψύχεται. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το σημείο νέφωσης είναι αρκετά υψηλό και για αυτό τολόγο θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν κάποια πρόσθετα κατά τις κρύες περιόδους. Το σημείο ανάφλεξης (flash point) είναι πολύ σημαντικό κατά την αποθήκευσή του καυσίμου και την μεταφορά του. Από τον πίνακα 2 είναι εμφανές ότι το σημείο ανάφλεξης είναι πολύ καλό για το παραγόμενο βιοντίζελ.

Πίνακας 2: Ιδιότητες παραγόμενου βιοκαυσίμου		
Ιδιότητες	Μονάδες	Τιμή
Πυκνότητα στους 15°C	g/ml	0.7869
Θείο	mg/kg (ppmwt)	1.54
Άζωτο	mg/kg (ppmwt)	1.37
Δείκτης κετανίου		77.23
Σημείο ανάφλεξης	°C	116
Νερό	Mg/kg	0
Ιξώδες 40°C	cSt	3.54
Ολική οξύτητα (TAN)	Mg KOH/gr	0
Αντοχή στην διάβρωση	(3 hr in 50°C)	1b
Χρόνος οξειδωσης στους 110°C	hr	>22
Απόσταξη του 90% σε °C	°C	302.6
Κατώτερη θερμογόνος δύναμη	MJ/kg	49
Σημείο απόφραξης ψυχρού φίλτρου (CFPP)	°C	20
Σημείο ροής	°C	23

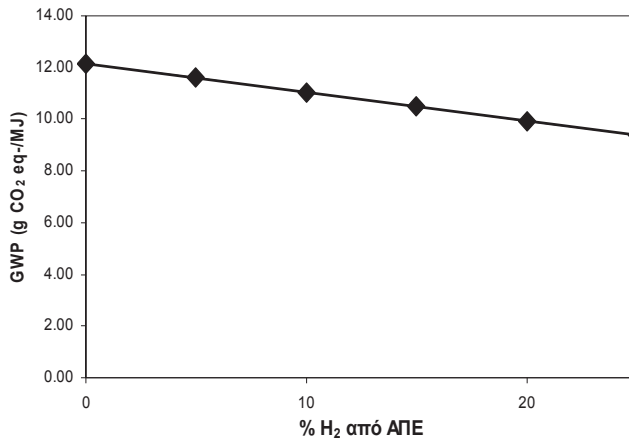
Οι τρεις σημαντικότεροι παράμετροι που επηρεάζουν την οικονομία καυσίμου, την ροπή και την ιπποδύναμη του οχήματος είναι ο τύπος του κινητήρα, η δυνατότητα του κινητήρα να μετατρέπει την ενέργεια του καυσίμου σε ωφέλιμο έργο και τέλος η θερμογόνος δύναμη του καυσίμου. Όπως φαίνεται η κατώτερη θερμογόνος δύναμη είναι αρκετά ικανοποιητική αφού φτάνει τα 49 MJ/kg. Όσον αφορά το ιξώδες του βιοκαυσίμου, και εδώ το βιοντίζελ 2⁵⁵ γενιάς τηρεί τις προδιαγραφές αφού παρουσιάζει ιξώδες 3.54 cSt. Το ιξώδες είναι ένα μέγεθος που μετράει την αντίσταση που παρουσιάζει το ρευστό στη ροή. Εάν το καύσιμο παρουσιάζει πολύ υψηλό ιξώδες τότε δημιουργούνται προβλήματα στις αντλίες καυσίμου.

Στόχος του έργου ήταν να παραχθεί μια ποσότητα αυτού το νέου βιοκαυσίμου 2 τόννων, η οποία να χρησιμοποιηθεί σε μείγμα 50/50 κ.ο. με συμβατικό ντίζελ κίνησης σε ένα απορριματοφόρο του Δήμου Θεσσαλονίκης για μερικούς μήνες. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε σε μείγμα 50/50 κ.ο. ήταν γιατί δεν υπήρχαν οι διαθέσιμες ποσότητες σε τηγανέλαιο για μεγαλύτερη παραγωγή και επίσης διότι η μονάδα καταλυτικής υδρογονοεπεξεργασίας που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή είναι μια πιλότικής κλίμακας μονάδα με χαμηλή δυναμικότητα και δεν ενδείκνυται για παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του καυσίμου στον κινητήρα έδειξαν ότι το καύσιμο δεν προκαλεί κανένα πρόβλημα στην λειτουργία του κινητήρα και επίσης δεν χρειάζεται καμία απολύτως μετατροπή στο κινητήρα για την εφαρμογή του [8].

Στον Πίνακα 3 συνοψίζονται τα αποτελέσματα της AKZ καθώς και η συνεισφορά των επιμέρους σταδίων στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα της εξεταζόμενης παραγωγικής διαδικασίας. Οι συνολικές εκπομπές αντιστοιχούν σε 12.15 g CO₂eq-/MJ βιοντίζελ, το μεγαλύτερο μέρος των οποίων (~91.41%), οφείλεται στην παραγωγή H₂, που καταναλώνεται για την καταλυτική υδρογονοεπεξεργασία. Σημαντική είναι και η συνεισφορά της χρήσης ατμού στο στάδιο της προκατεργασίας της εξεταζόμενης παραγωγικής διεργασίας (7.23%).

Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ηλιακό H_2 στο στάδιο της καταλυτικής υδρογονοεπεξεργασίας (από 5% έως 25%) όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4, οι συνολικές εκπομπές μπορεί να μειωθούν έως ~22.85% (9.36 g CO_2eq -/MJβιοντίζελ). Η αιφορία του βιοντίζελ 2ης γενιάς είτε παράγεται από H_2 από φυσικό αέριο είτε από ηλιακό H_2 είναι ωστόσο σημαντικά μεγαλύτερη σε σχέση με το ντίζελ κίνησης εμπορίου (14.3 g CO_2eq -/MJ ντίζελ) [13] και του βιοντίζελ FAME (44-54 g CO_2eq -/MJβιοντίζελ, ανάλογα με την πρώτη ύλη) [6].

Πίνακας 3: Εκπομπές θερμοκηπικών αερίων παραγωγής βιοντίζελ 2 ^{ης} γενιάς (εκφρασμένες σε g CO_2eq -/MJβιοντίζελ)		
Στάδιο παραγωγικής διαδικασίας	g CO_2eq /MJ	Ποσοστό (%) επί των συνολικών εκπομπών
Συλλογή και μεταφορά τηγανελαίων	~0	~0%
Προκατεργασία	0.957	7.87%
Ηλεκτρισμός	0.064	0.64%
Ατμός	0.879	7.23%
Υδρογονοεπεξεργασία	11.198	92.13%
Ηλεκτρισμός	0.067	0.55%
Ατμός	0.021	0.17%
H_2	11.11	91.41%
Σύνολο	12.15	100%



Εικόνα 4: Μείωση των θερμοκηπικών εκπομπών της εξεταζόμενης παραγωγικής διαδικασίας μέσω ενσωμάτωσης H_2 από ΑΠΕ

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η υδρογονοεπεξεργασία χρησιμοποιημένων τηγανελαίων είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για την παραγωγή βιοκαυσίμων. Στην παρούσα μελέτη έγινε υδρογονοεπεξεργασία χρησιμοποιημένων λαδιών από διάφορα εστιατόρια της Θεσσαλονίκης προς παραγωγή καθαρού βιοντίζελ 2^{ης} γενιάς. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι

το υδρογονοεπεξεργασμένο προϊόν έχει πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε ανεπιθύμητα ετεροάτομα (θείου, αζώτου και οξυγόνου) ενώ η πυκνότητά του είναι πολύ χαμηλότερη από την αρχική πυκνότητα της τροφοδοσίας (τηγανέλαιο). Στην συνέχεια η μελέτη έδειξε ότι εάν το συγκεκριμένο προϊόν το κάνουμε απόσταση τότε θα πάρουμε ένα πολύ μεγάλο ποσοστό της τάξεως του 91.6% σε καθαρό βιοντίζελ 2^{ης} γενιάς με σημείο βρασμού στο εύρος του ντίζελ, οι ιδιότητες του οποίου είναι πολύ ικανοποιητικές εάν συγκριθούν με τις προδιαγραφές του βιοντίζελ. Η χρήση του σε ποσοστό 50/50 κ.ο. με συμβατικό ντίζελ κίνησης σε αποριμματοφόρο έδειξε ότι χωρίς καμία μετατροπή του κινητήρα το καύσιμο δεν προκαλεί προβλήματα.

Τα αποτελέσματα της μελέτης AKZ της εξεταζόμενης παραγωγικής διεργασίας του νέου βιοντίζελ συνοψίζονται ως εξής:

- κατά την παραγωγή του νέου βιοντίζελ 2^{ης} γενιάς εκπέμπονται 12.15 g CO₂ eq-/MJβιοντίζελ, καθιστώντας το νέο καύσιμο αειφορικότερο σε σχέση με το συμβατικό ντίζελκαι το FAME.
- από τα εξεταζόμενα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας του νέου βιοντίζελ 2^{ης}γενιάς, η υψηλότερη συνεισφορά (91.41%) στις εκπομπές CO₂ eq- οφείλεται στην παραγωγή του απαιτούμενου H₂ για τη μονάδα της καταλυτικής υδρογονοεπεξεργασίας, το οποίο προέρχεται από την αναμόρφωση του φυσικού αερίου με ατμό.
- η χρήση H₂ που προέρχεται από την ηλιακή ενέργεια για την κάλυψη μέρους των αναγκών της παραγωγικής διαδικασίας του νέου βιοντίζελ 2^{ης} γενιάς καθιστά την προτεινόμενη τεχνολογία περισσότερο αειφορική.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου BIOFUELS-2G, το οποίο συγχρηματοδοτήθηκε από το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα LIFE+ (LIFE08 ENV/GR/000569) (www.biofuel2g.gr).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Bezergianni, S., Kalogianni, A., Dimitriadis, A., 2012, "Catalyst evaluation for waste cooking oil hydroprocessing," *Fuel*, 93, pp. 638-641.
- [2] Bezergianni, S., Dimitriadis, A., Kalogianni, A., Pilavachi, P., 2010, "Hydrotreating of waste cooking oil for biodiesel production. Part I: Effect of temperature on product yields and heteroatom removal," *Bioresource Technology*, 101, pp. 6651-6656.
- [3] Bezergianni, S., Dimitriadis, A., Sfetsas, T., Kalogianni, A., 2010, "Hydrotreating of waste cooking oil for biodiesel production. Part II: Effect of temperature on hydrocarbon composition," *Bioresource Technology*, 101, pp. 7658-7660.
- [4] Bezergianni, S., Dimitriadis, A., Kalogianni, A., Knudsen, K.G., 2011, "Towards hydrotreating of waste cooking oil for biodiesel production. Effect of pressure, H₂/Oil ratio, and, liquid hourly space velocity," *Ind. Eng. Chem. Res.*, 50, pp. 3874-3879.
- [5] Sunde, K., Brekke, A., and Solberg, B., 2011, "Environmental Impacts and Costs of Hydrotreated Vegetable Oils, Transesterified Lipids and Woody BTL—A Review," *Energies*, 4(6), pp. 845-877.
- [6] Fontaras, G., Skoulou, V., Zanakis, G., Zabaniotou, A., Samaras, Z., 2012, "Integrated environmental assessment of energy crops for biofuel and energy production in Greece," *Renew. Energy*, 43, pp. 201-209.
- [7] García-Sánchez, J.A., López-Martínez, J.M., Martín, J.L., Flores-Holgado, M.N., 2012, "Comparison of Life Cycle energy consumption and GHG emissions of natural gas,

- biodiesel and diesel buses of the Madrid transportation system," *Energy*, 47(1), pp. 174-198.
- [8] www.biofuels2g.gr
- [9] Peiró, L.T., Lombardi, L., Méndez, G.V., Durany, G., 2010, "Life cycle assessment (LCA) and exergetic life cycle assessment (ELCA) of the production of biodiesel from used cooking oil (UCO)", *Energy*, 35(2), pp. 889–893.
- [10] dePontesSouza, D., Mendonca, F.M., Alves Nunes, K.A., Valle, R., 2012, "Environmental and Socioeconomic Analysis of Producing Biodiesel from Used Cooking Oil in Rio de Janeiro The Case of the Copacabana District," *J. of Industrial Ecology*, 16(4), pp. 655-664.
- [11] Nikander, S., 2008, "Greenhouse gas and energy intensity assessment of product chain: case transport biofuel", Master's Thesis. Faculty of Engineering and Architecture Helsinki University of Technology.
- [12] Cetinkaya, E., Dincer, L., Naterer, G.F., 2012, "Life cycle assessment of various hydrogen production methods," *Int. J. HydrogenEnergy*, 37(3), pp. 2071-2080.
- [13] JRC Technical Reports 2013. Well-to-Tank Appendix 2-Version 4, Summary of energy and GHG balance of individual pathways. Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context.

ΒΙΩΣΙΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟ-ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΟΡΘΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΤΗΣ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΛΑΙΟΛΑΔΟΥ

Μανάρα Παναγιώτα, Ρόβας Δημήτριος, Ζαμπανιώτου Αναστασία*

Ομάδα Βιομάζας, Εργαστήριο Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τ.Θ.: 455, Τ.Κ.:54124, Θεσσαλονίκη, *e-mail: azampani@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται μια εναλλακτική πρακτική για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων που παράγονται από την καλλιέργεια ελιάς και τη διαδικασία παραγωγής ελαιολάδου, μέσω της διεργασίας της αεριοποίησης. Για την ανάλυση της βιωσιμότητας του προτεινόμενου συστήματος αξιοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα από την λειτουργία ενός πιλοτικού συστήματος συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας που συνδυάζει ένα αντιδραστήρα ρευστοστερεάς κλίνης και μία μηχανή εσωτερικής καύσης. Τα δεδομένα της γεωργικής παραγωγής και παραγωγής ελαιολάδου βασίζονται σε πραγματικά στοιχεία από έναν αγρότη-διαχειριστή ελαιοτριβείου. Η λειτουργική μονάδα που χρησιμοποιείται στην ανάλυση είναι δέκα εκτάρια ελαιώνα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αξιοποίηση 40,0 t στερεών και ημι-στερεών αποβλήτων μπορούν να παράγουν αρκετό αέριο σύνθεσης για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με στόχο την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της λειτουργίας ελαιοτριβείου και ένα πλεόνασμα που θα μπορούσε να πωλείται στο δίκτυο, με αποτέλεσμα σε ένα επιπλέον εισόδημα. Η βιωσιμότητα του συστήματος ελέγχθηκε με όρους οικονομικούς, κοινωνικούς και περιβαλλοντικούς δίνοντας ενθαρρυντικά αποτελέσματα και ενισχύοντας την άποψη ότι τα συστήματα αεριοποίησης μικρής κλίμακας που βασίζονται στην αξιοποίηση γεωργικών υπολειμμάτων είναι πιθανό να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο στο μέλλον του ενεργειακού εφοδιασμού για τις χώρες της Μεσογείου.

Λέξεις κλειδιά: Βιομάζα; Βιο-Ενέργεια; Αεριοποίηση, Διαχείριση Αγροτικών Αποβλήτων; Βιωσιμότητα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το δέντρο της ελιάς είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τις περιοχές της Μεσογείου και η καλλιέργεια του είναι μια τυπική γεωργική δραστηριότητα στη λεκάνη της Μεσογείου. Σχεδόν το σύνολο της παγκόσμιας παραγωγής ελαιολάδου λαμβάνεται σε αυτό το μέρος του κόσμου, ενώ η Ισπανία, η Ιταλία και η Ελλάδα καλύπτουν τα τρία τέταρτα της συνολικής ευρωπαϊκής παραγωγής. Ως εκ τούτου, η καλλιέργεια της ελιάς, είναι μια σημαντική οικονομική δραστηριότητα και ταυτόχρονα, ένα πολύτιμο στοιχείο της αγροτικής και πολιτιστικής κληρονομιάς της περιοχής. Η παραγωγή ελαιολάδου θα μπορούσε να είναι μια φιλική προς το περιβάλλον διαδικασία καθώς καλλιέργεια της ελιάς, σε σύγκριση με άλλες καλλιέργειες, δεν απαιτεί μεγάλες ποσότητες χημικών ουσιών και λιπασμάτων και η χρήση ενέργειας περιορίζεται στην χρήση καυσίμων για την λειτουργία του αγροτικού εξοπλισμού, [1]. Επιπλέον, η χρήση της ενέργειας για την παραγωγή του ελαιολάδου, δεν θεωρείται ως ένα σημαντικό ζήτημα, [2].

Ωστόσο, η καλλιέργεια της ελιάς, η συλλογή του καρπού και τα ελαιοτριβεία παράγουν μεγάλες ποσότητες στερεών και ημι-στερεών αποβλήτων και λυμάτων, η διαχείριση των οποίων είναι ένα σημαντικό πρόβλημα για την πλειοψηφία των εγκαταστάσεων. Η διάθεση αυτών των υπολειμμάτων είναι ένα από τα μεγαλύτερα περιβαλλοντικά προβλήματα που αντιμετωπίζει η Νότια Ευρώπη και η βιομηχανία ελαιολάδου θεωρείται μια από τις πιο βαριά ρυπογόνους βιομηχανίες τροφίμων στην περιοχή της Μεσογείου, [3, 4].

Ταυτόχρονα η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ), με την εφαρμογή ολοκληρωμένων σχεδίων δράσης έχει ως στόχο να αυξήσει το ποσοστό χρήσης της βιομάζας για παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας. Επιπλέον, η αποκεντρωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι πιθανό να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο σε μελλοντικά σενάρια ενεργειακού εφοδιασμού, καθώς μπορεί να μειώσει τις δαπάνες υλικοτεχνικής υποδομής κυρίως με τη αξιοποίηση βιομάζας γεωργικής προέλευσης. Εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν εγχώριες ανανεώσιμες πηγές και έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν ενέργεια σε τοπικές κοινότητες, μέσω παραγωγικών μονάδων μικρής και μεσαίας κλίμακας βρίσκονται στις προτεραιότητες της ενεργειακής και περιβαλλοντικής πολιτικής της Ε.Ε. [5, 6]. Η συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ) από γεωργικά απόβλητα θα μπορούσε να είναι ένα βιώσιμο μέσο για τη βελτίωση της αγροτικής αξιοποίησης βιομάζας για την ανάπτυξη μιας αξιόπιστης ανανεώσιμης πηγής και την οικονομική παραγωγή ηλεκτρισμού, ενώ ταυτόχρονα μπορεί να συμβάλει στην βελτίωση της διαχείρισης των αποβλήτων και την ενίσχυση της αειφόρου γεωργίας.

Η παρούσα εργασία διερευνά τη δυνατότητα διαχείρισης των στερεών αποβλήτων των ελαιοτριβείων και των υπολειμμάτων από την καλλιέργεια της ελιάς και την συλλογή του καρπού μέσω της επαναχρησιμοποίησης τους ως πρώτη ύλη σε ένα αντιδραστήρα αεριοποίησης με στόχο την δημιουργία ενός αποτελεσματικού συστήματος παραγωγής βιο-ενέργειας, που θα καλύπτει εν μέρει ενεργειακές απαιτήσεις του ελαιοτριβείου. Η βιωσιμότητα του προτεινόμενου συστήματος θα αξιολογηθεί λαμβάνοντας υπόψη τόσο το ενεργειακό ισοζύγιο του υπό εξέταση συστήματος αλλά και το σύνολο των περιβαλλοντικών, κοινωνικών και οικονομικών παραγόντων.

2. ΣΤΕΡΕΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ ΕΛΑΙΩΝΑ ΚΑΙ ΕΛΑΙΟΤΡΙΒΕΙΟΥ

2.1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Η καλλιέργεια της ελιάς στην περιοχή της Μεσογείου θεωρείται ως ένα σημαντικό μέρος της γεωργίας καθώς όπως εκτιμάτε καλλιεργούνται πάνω από 700 εκατομμύρια δέντρων στην Ισπανία, την Ιταλία και την Ελλάδα. Στην Ελλάδα, η καλλιέργεια της ελιάς καλύπτει το 60% της καλλιεργήσιμης γης. Η έκταση των ελαιώνων έχει αυξηθεί συστηματικά τα τελευταία 25 χρόνια, ως αποτέλεσμα της φυτείας των νέων ελαιώνων με φυτεύσεις υψηλής πυκνότητας. Επί του παρόντος στην Ελλάδα, υπάρχουν περισσότερα από 132 εκατομμύρια δέντρα, ως επί το πλείστον βρίσκονται στην Πελοπόννησο και την Κρήτη, [7, 8].

Τα στερεά υπολείμματα του ελαιώνα κατά την διάρκεια συλλογής του καρπού είναι κυρίως μικρά κλαδάκια και φύλλα ενώ κατά το κλάδεμα παράγονται και μεγαλύτερα κλαδιά. Επίσης παράγονται και κούτσουρα που χρησιμοποιούνται ως καυσόξυλα. Κατά μέσο όρο ένα εκτάριο ελαιώνα θα μπορούσε να παράγει 1,2 τόνους κλάδεματων σε ετήσια βάση, [9]. Η έκθεση της CIEMAT υπολογίζει ότι στην Ελλάδα, η μέση ετήσια παραγωγή διαθέσιμων γεωργικών υπολειμμάτων από τους ελαιώνες είναι 910.000 τόνοι (dry). Με βάση τα αναφερόμενα στοιχεία, σχετικά με τον όγκο των στερεών αποβλήτων, δεν προκαλεί εντύπωση ότι η διάθεση των στερεών αποβλήτων εξακολουθεί να θεωρείται από τους αγρότες ως σημαντικό πρόβλημα, [10].

Τις τελευταίες δεκαετίες πραγματοποιήθηκαν σημαντικές αλλαγές στις μεθόδους παραγωγής. Η παραδοσιακή (batch) διαδικασία σταδιακά αντικαταστάθηκε από αυτή της συνεχής λειτουργίας. Ανάλογα με τη μέθοδο της διαχωρισμού του ελαίου η διαδικασία χωρίζεται σε διφασική και τριφασική. Στην παραδοσιακή μέθοδο το ελαιόλαδο εξάγεται με πίεση μετά την άλεση του καρπού της ελιάς, ενώ η συνεχής διεργασία χρησιμοποιεί φυγοκεντρικούς διαχωριστές. Η παγκόσμια παραγωγική τάση είναι προς τη διαδικασία δύο φάσεων η οποία καλείται επίσης ως "οικολογική" καθώς απαιτεί λιγότερες ποσότητες νερού, μικρότερη καταναλώση ενέργειας και ότι δεν παράγει κανένα λύμα ελαιοτριβείου (απόνερα), το οποίο είναι ο σημαντικότερος ρυπαντής στην τριφασική διαδικασία. Το υπόλειμμα είναι ένα υποπροϊόν της υψηλής υγρασίας, ο ελαιοπυρήνας, που περιέχει εκτός από τα υψηλή περιεκτικότητα σε νερό, κλάσματα του πυρήνα της ελιάς, την πίτα της ελιάς και ποσότητες ελαιολάδου. Σε αρκετές περιπτώσεις γίνεται διαχωρισμός του πυρήνα στο ελαιοτριβείο και χρησιμοποιείται επί τόπου ως εναλλακτική καύσιμη ύλη. Το μέσο ποσοστό του πυρήνα που περιέχεται στον υδαρές υπόλειμμα φτάνει το 15% κατά βάρος [11]. Υπολογίζεται, ότι για κάθε τόνο παραγόμενου ελαιολάδου το ελαιοτριβείο παράγει 2,5 τόνους ελαιοπυρήνα (60% υγρασία) και 500 κιλά φύλλων.

2.2. ΤΡΕΧΟΥΣΕΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Μία ορθολογική πρακτική διαχείρισης των στερεών αποβλήτων ελαιώνα είναι η συλλογή τους, ο τεμαχισμός και η ενσωμάτωση τους στο έδαφος. Το σύννηθες είναι η ανεξέλεγκτη καύση τους στον ελαιώνα για την άμεση εκκαθάριση του πεδίου, ασχέτως που αυτή η πρακτική δεν επιτρέπεται πλέον. Η καύση είναι συνήθως ατελής και παράγει ένα σύννεφο πυκνών καπνών ενώ εκπέμπει σημαντικές ποσότητες διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα και σωματιδίων. Η άμεση διάθεση των ημι-στερεών ενέχει περιβαλλοντικούς κινδύνους λόγω των ειδικών χαρακτηριστικών τους όπως η έντονη ενζυματική δραστηριότητα τους, η υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία, η ταχεία αυτοοξειδωσή τους, την δυναμική ανάπτυξη παθογόνων, κλπ, και η ορθολογική διαχείριση τους είναι πολύ δαπανηρή διαδικασία. Συνήθως μετά την ξήρανση τους ή καίγονται με τις επιπτώσεις που έχει η καύση ή αξιοποιούνται ως ζωοτροφή.

Δεδομένου ότι η ευρωπαϊκή νομοθεσία εισάγει περισσότερο βιώσιμες και περιβαλλοντικά ευαίσθητες πρακτικές διαχείρισης των αποβλήτων, η βιομηχανία ελαιολάδου αντιμετωπίζει την πίεση να εξασφαλίσει ότι οι δραστηριότητες της θα στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης και ταυτόχρονα να ισορροπούν μεταξύ των νομικών απαιτήσεων, την καλύτερη οικολογική και οικονομική λύση και την υγεία και την ασφάλεια του καταναλωτή.

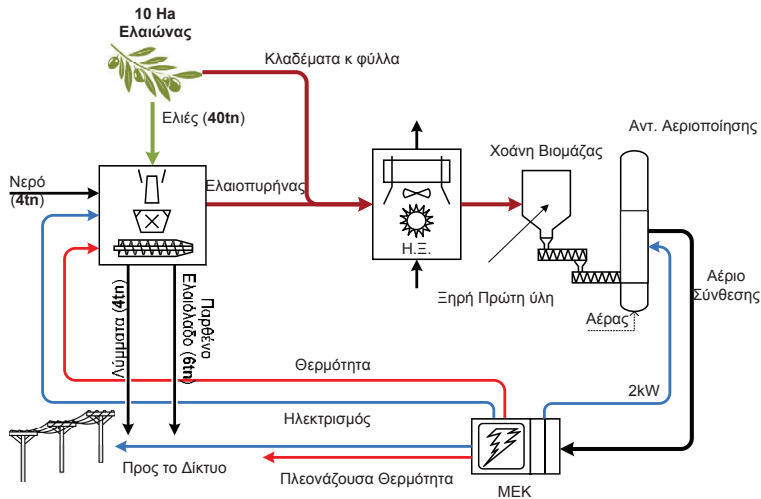
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟ-ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η παρούσα εργασία διερευνά την δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των στερεών αποβλήτων από τους ελαιώνες και τα ελαιοτριβεία ως πρώτη ύλη σε ένα σύστημα

αεριοποίησης ως εναλλακτική μέθοδος διαχείρισης αυτών. Στόχος είναι η παραγόμενη ενέργεια να επαναχρησιμοποιείται στο ελαιοτριβείο ώστε να καλύπτει το σύνολο ή τμήμα των ενεργειακών απαιτήσεων για την λειτουργία του. Το προτεινόμενο σύστημα παρουσιάζεται στην εικόνα 1.

Ο ελαιώνας καλύπτει μια έκταση περίπου 10 εκταρίων και κατά μέσο όρο παράγει ετησίως 40 τόνους ελιές, 25 τόνους από κλαδιά και φύλλα (32% κ.β. υγρασία) και 10 τόνους ξύλου (40% κ.β. υγρασία) ως υπολειμματική βιομάζα. Μέσα στον ελαιώνα λειτουργεί ένα σύγχρονο ελαιοτριβείο δύο φάσεων που παράγει περίπου 4 τόνους "έξτρα παρθένο" ελαιόλαδο και 36 τόνους υγρής ελαιοπυρήνας (60% κ.β. υγρασία). Ο πυρήνας διαχωρίζεται από την υγρή μάζα παράγοντας 5 τόνοι πυρήνα (15% κ.β. υγρασία). Η ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη λειτουργία του ελαιοτριβείου υπολογίστηκε σε 0.8kWh/kg παραγόμενου ελαίου, το 70% εκ των οποίων είναι ηλεκτρισμός για τη λειτουργία των μηχανημάτων και 30% είναι θερμότητα που χρησιμοποιείται για το πλύσιμο των καρπών και στη διαδικασία της μάλαξης. Η διαδικασία εξαγωγής του "έξτρα παρθένο" ελαιόλαδου ακολουθεί τα εξής βήματα, Συλλογή καρπού, Απομάκρυνση των φύλλων και το πλύσιμο, Σύνθλιψη, Αργή Ανάμιξη (Malaxing) και Φυγοκέντρηση.



Εικόνα 1: Διαχείριση Αποβλήτων μέσω αεριοποίησης και αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας

Πίνακας 1: Στοιχειακή ανάλυση στερεών υπολειμμάτων					
Κλαδάκια και φύλλα		Κλαδέματα		Πυρήνας	
κ.β.% (daf)		κ.β.% (daf)		κ.β.% (daf)	
C	48,77	C	46,92	C	49,89
H	5,98	H	6,61	H	6,32
N	0,59	N	0,68	N	0,92
S	n.d.	S	0,08	S	0,07
O	44,55	O	47,23	O	43,79
ΚΘΔ (MJ/kg)	18,00	ΚΘΔ (MJ/kg)	18,00	ΚΘΔ (MJ/kg)	20,00

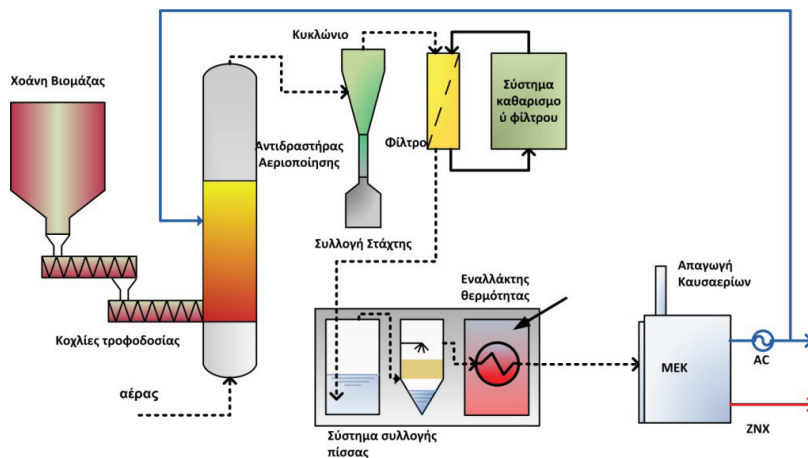
Τα υπολείμματα για να μπορέσουν να αξιοποιηθούν σε ένα αντιδραστήρα αεριοποίησης θα πρέπει να ξεραθούν ώστε να μειωθεί η περιεκτικότητα της υγρασίας σε επιθυμητά επίπεδα. Στην παρούσα μελέτη θεωρήθηκε ότι η πρώτη ύλη (κλαδέματα, φύλλα και κλαδάκια και πυρήνας) ξηραίνεται σε ένα ηλιακό ξηραντήριο τύπου θερμοκηπίου με το τελικό προϊόν να έχει υγρασία 4.2% κ.β.. Έπειτα ο πυρήνας και τα υπολείμματα του ελαϊώνα χρησιμοποιούνται ως τροφοδοσία στον αντιδραστήρα αεριοποίησης. Τα χαρακτηριστικά των πρώτων υλών παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

3.2. ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η Αεριοποίηση θεωρείται ως μια ώριμη τεχνολογία, καθώς είχε εφαρμοστεί ευρέως στις αρχές του περασμένου αιώνα για την τροφοδοσία των πόλεων. Το πλεονέκτημα της αεριοποίησης είναι ότι μπορεί να αξιοποιεί αποτελεσματικά ένα μεγάλο αριθμό από πρώτες ύλες συμπεριλαμβανομένων των οργανικών υπολειμμάτων και βιομάζας.

Τα πειράματα αεριοποίησης πραγματοποιήθηκαν στην πιλοτική μονάδα Αεριοποίησης που αναπτύχθηκε από τα εργαστήρια Τεχνολογίας Χημικών Εγκαταστάσεων και Εφαρμοσμένης Θερμοδυναμικής, του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Η πιλοτική μονάδα περιλαμβάνει μια ολοκληρωμένη ευέλικτη τεχνολογία, με στόχο τη διεύθυνση μικρών μονάδων συμπαραγωγής στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και μαζί προσπαθεί να προωθήσει την περιφερειακή ανάπτυξη και να ενισχύσει την ενίσχυση γεωργικού τομέα.

Η καρδιά του συστήματος, ο αντιδραστήρας ρευστοστερεάς κλίνης, είναι κατασκευασμένος από το κάτω μέρος (ρευστοστερεά κλίνη) και το ανώτερο τμήμα (ύψος εξάλων), το οποίο έχει μεγαλύτερη διάμετρο προκειμένου να εξασφαλιστεί ένα μεγαλύτερο χρόνο παραμονής του αερίου σύνθεσης, σε υψηλές θερμοκρασίες. Το σύστημα τροφοδοσίας αποτελείται από ένα σιλό, μία χοάνη βιομάζας και δύο τροφοδότες κοχλίας, ενώ το σύστημα καθαρισμού από ένα κυκλώνιο με ένα συλλέκτη τέφρας, ένα φίλτρο αποδοτικότητας 99% και μια πλυντρίδα νερού προκειμένου να ψυχθεί το αέριο σύνθεσης και να συλλεχτεί η περιεχόμενη πίσσα. Το παραγόμενο αέριο τροφοδοτείται σε μια MEK για την παραγωγή ενέργειας. Λεπτομέρειες του συστήματος περιγράφονται σε πρόσφατες δημοσιεύσεις [12,13]. Μία γραφική αναπαράσταση της μονάδας παρουσιάζεται στην εικόνα 2.



Εικόνα 2: Πιλοτικό σύστημα συμπαραγωγής μέσω σύζευξης αντιδραστήρα αεριοποίησης και Μηχανής Εσωτερικής Καύσης (MEK)

3.3. ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟ-ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της βιωσιμότητας του συστήματος περιλαμβάνει την ενεργειακή ανάλυση και την μελέτη των οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών επιπτώσεων και είναι βασισμένη στα αποτελέσματα της επιδεικτική λειτουργίας του συστήματος βιο-ενέργειας.

Ενεργειακή Επάρκεια

Οι δείκτες ενεργειακής αποτίμησης του συστήματος συμπαραγωγής είναι ο λόγος του ενεργειακού περιεχομένου που εισέρχεται στο σύστημα αεριοποίησης προς το ενεργειακό περιεχόμενο των προϊόντων (ηλεκτρισμό και ζεστό νερό χρήσης, ZNX). Ταυτόχρονα πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση ενεργειακού ισοζυγίου του συνδυασμένου συστήματος διαχείρισης με στόχο τον έλεγχο της ενεργειακής αυτάρκειας του. Εδώ θα πρέπει να αναφερθεί ότι δεν λήφθηκαν υπόψη οι ενεργειακές απαιτήσεις για την λειτουργία των βοηθητικών συστημάτων του συστήματος ηλιακής ξήρανσης ενώ οι θερμικές απώλειες κατά την μεταφορά του ZNX προς το ελαιοτριβείο θεωρήθηκαν αμελητέες. Οι υπολογισμοί έγιναν με βάση τις βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας της μονάδας ($T = 750 \text{ }^\circ\text{C}$, $ER = 0,3$ και λειτουργία του κινητήρα στις 3.200 r/min).

Περιβαλλοντική Ανάλυση

Οι περιβαλλοντικοί δείκτες που χρησιμοποιήθηκαν για την αποτίμηση της μονάδας είναι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η παραγωγή στερεών και υγρών αποβλήτων και η εξοικονόμηση πόρων από την μη χρήση λιγνιτικών αποθεμάτων για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Οι υπολογισμοί εκπομπών βασίζονται σε on-line μετρήσεις με χρήση ενός αναλυτή Horiba (NDIR), ενώ η εξοικονόμηση πόρων υπολογίζεται σε kg λιγνίτη ανά kW_{el} κάνοντας χρήση δεδομένων ενός θερμοηλεκτρικού σταθμού. Η αξιολόγηση των παραγόμενων αποβλήτων έγινε έμμεσα κάνοντας χρήση οικονομικών όρων και πιο συγκεκριμένα του κόστους διαχείρισης των.

Κοινωνική Ανάλυση

Οι δείκτες κοινωνικής αειφορίας είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν και συνήθως είναι ποιοτικοί. Μερικοί από τους δείκτες είναι η οικονομική και κοινωνική συνεισφορά στην τοπική κοινωνία, το επίπεδο εκπαίδευσης των ατόμων που εμπλέκονται στον τομέα της γεωργίας και των συναφών δραστηριοτήτων, καθώς και η έκφραση της κοινωνικής αποδοχής [14, 15]. Ένας ποσοτικός δείκτης για την αξιολόγηση της κοινωνικής βιωσιμότητας είναι ο αριθμός των θέσεων εργασίας ανά επένδυση.

Οικονομική Ανάλυση

Η οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος αξιολογείται με μικροοικονομικούς και μακροοικονομικούς όρους. Η μικροοικονομική ανάλυση αξιολογεί τα οικονομικά στοιχεία που σχετίζονται τις επενδύσεις σε υποδομές και τις δαπάνες συντήρησης και λειτουργίας της μονάδας βιο-ενέργειας. Οι υπολογισμοί έγιναν με τη χρήση υπολογιστικών φύλλων και υπολογίστηκαν η Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV), ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (IRR), η περίοδος απόσβεσης (PBP) το μικτό κέρδος και τα καθαρά κέρδη. Η μακροοικονομική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για να εκτιμηθεί η συνολική προστιθέμενη αξία στην τοπική οικονομία από το εισόδημα των εργαζομένων και την κερδοφορία της επιχείρησης από την εφαρμογή του συστήματος αεριοποίησης.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια εναλλακτική τεχνική διαχείρισης των στερεών αποβλήτων που παράγονται από την καλλιέργεια της ελιάς και την παραγωγή του ελαιολάδου. Τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας παρουσιάζεται στο Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Ισοζύγια Μάζας και Ενέργειας		
Ξήρανση		
Εισροές	t	Υγρασία (κ.β. %)
Ελαιοπυρήνας	5	15
Κλαδέματα	25	32
Κλαδάκια και φύλλα	10	40
Εκροές	t	Υγρασία (κ.β. %)
Ξηρός Ελαιοπυρήνας	4.5	4.2
Ξηρά Κλαδέματα	18.0	4.2
Ξηρά Κλαδάκια και φύλλα	6.4	4.2
Αντιδραστήρας Αεριοποίησης		
Εισροές	t	Υγρασία (κ.β. %)
Ξηρός Ελαιοπυρήνας	4.5	4.2
Ξηρά Κλαδέματα	18.0	4.2
Ξηρά Κλαδάκια και φύλλα	6.4	4.2
Αέρας (ER=0.3)	50.00	-
Εκροές	t	
Αέριο Σύνθεσης	62.00	-
Ελαιώνας		
Εισροές		kWh
Θερμική Ενέργεια		1,440
Ηλεκτρισμός		3,660
Αντιδραστήρας Αεριοποίησης		
Εκροές		kWh
Αέριο Σύνθεσης		88,000
ΜΕΚ		kWh
Θερμική ενέργεια		36,960
Ηλεκτρισμός (Στο δίκτυο)		17,600

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, το προτεινόμενο σύστημα διαχειρίζεται αποτελεσματικά 40 τόνους ξυλώδους βιομάζας που μέχρι σήμερα παραμένει ένα σημαντικό πρόβλημα για τους ελαιοπαραγωγούς της λεκάνης της Μεσογείου. Επιπλέον, οι εγκαταστάσεις διαχείρισης αποβλήτων, βρίσκονται μέσα στον ελαιώνα και δίπλα στο ελαιοτριβείο. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη μιας κεντρικής εγκατάστασης διαχείρισης αποβλήτων, καθώς τα απόβλητα διαχειρίζονται στο χώρο παραγωγής. Επιπλέον, η πρακτική αυτή ενσωματώνει την Οδηγία της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Παράλληλα εξασφαλίζεται η ενεργειακή επάρκεια καθώς το σύστημα συμπαραγωγής παράγει αρκετή ενέργεια ώστε να καλύψει τις ανάγκες του ελαιοτριβείου και ένα πλεόνασμα (~14,000kWh) το οποίο μπορεί να αποφέρει επιπλέον έσοδα στον διαχειριστή του ελαιοτριβείου.

Για ένα σύστημα εγκατεστημένης ισχύος 40 kW_{el}, το κόστος της επένδυσης εκτιμάται σε 1,520 €/kW_{el}, τα καθαρά κέρδη μέχρι 20.000 €/έτος (κατά μέσο όρο κατά τη διάρκεια των πρώτων 10 ετών) ενώ ο εκτιμώμενος IRR περίπου ισούται με 54% και η καθαρή παρούσα αξία σε διάρκεια λειτουργίας 20 ετών ίση με 207.000 € και περίοδο αποπληρωμής δύο ετών. Καθώς η εμπορική επιτυχία ενός τέτοιου εγχειρήματος εξαρτάται από τις εξωτερικότητες που στοχεύουν στην μείωση του κόστους όπως οι επιδοτήσεις, τα τιμολόγια τροφοδότησης ηλεκτρικής ενέργειας και την τιμή της βιομάζας η μελέτη έλαβε υπόψη την παραδοχή ότι το feed-in tariff είναι ίδιο με αυτό για παραγωγή ενέργειας από βιοαέριο, 180 €/MWh_{el}, και επίσης λήφθηκε υπόψη ως επιπλέον εξωτερικότητα μία επιδότηση της τάξεως του 20%. Το κόστος της βιομάζας θεωρήθηκε μηδενικό.

Οι εκπομπές μετρήθηκαν ίσες με 0,455 kgCO₂/kW_{el}. Σε σύγκριση με ένα συμβατικό θερμοηλεκτρικό σταθμό που καταναλώνει λιγνίτη (βασικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα) η βιοενέργεια μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά περίπου 0,55 kg/kW_{el}. Η βιωσιμότητα της διαχείρισης των στερεών και υγρών αποβλήτων ορίστηκε εμμέσως μέσω κάνοντας χρήση οικονομικών δεικτών. Το κόστος διαχείρισης από μια πιστοποιημένη εταιρία, κυμαίνεται από 0,9-1,3 €/kg για τις πύσσες που είναι και το κύριο παραπροϊόν της διάταξης. Σε σχέση με το κόστος λειτουργία και συντήρησης της διάταξης θεωρήθηκε αμελητέο οπότε η διάθεση των αποβλήτων δεν συμβάλει αρνητικά στο περιβαλλοντικό προφίλ του εγχειρήματος. Η εξοικονόμηση πόρων λιγνίτη, εκτιμήθηκε σε ~1,6kg/kWh.

Τέλος ο αριθμός των θέσεων εργασίας που μπορεί να δημιουργηθούν από την κατασκευή και λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος εκτιμήθηκε από μία έως τρεις και απευθύνονται σε εξειδικευμένο προσωπικό. Η συνολική προστιθέμενη αξία στην τοπική οικονομία της αξίας από το εισόδημα και φορολογηθέντα κέρδη σε ετήσια βάση υπολογίστηκε σε 47,000€.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία εξετάζει ένα εναλλακτικό σενάριο διαχείρισης των υπολειμμάτων ενός ελαιώνα και των αποβλήτων της παραγωγής ελαιολάδου μέσω της διεργασίας της αεριοποίησης. Το προτεινόμενο συστήματα επαναχρησιμοποιεί τα στερεά απόβλητα, προκειμένου να αναπτυχθεί ένα περιβαλλοντικά αποτελεσματικό σύστημα βιο-ενέργειας. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης θα μπορούσαν να θεωρηθούν άκρως ενθαρρυντικά. Ένα παραπροϊόν που κάποτε αντιμετώπιζε πρόβλημα διάθεσης μεταλλάσσεται σε χρήσιμη πρώτη ύλη μιας παραγωγικής λειτουργίας.

Τα απόβλητα διαχειρίζονται "in situ", κάτι που εξαλείφει την ανάγκη δημιουργίας μιας κεντρικής εγκατάστασης διαχείρισης αποβλήτων και επιπλέον, η οικονομική βιωσιμότητα του έργου είναι καλά εδραιωμένη καθώς παράγουν αρκετή ενέργεια για να καλύψουν τις ανάγκες της μονάδας, μειώνοντας το κόστος λειτουργίας. Παράλληλα έχουν τα πρόσθετα οφέλη του μηδενικού κόστους των πρώτων υλών, του μηδενικού κόστους εναλλακτικής διαχείρισης και του μηδενικού κόστους των λογιστικών υπηρεσιών (logistics).

Εν κατακλείδι, μικρές μονάδες παραγωγής ενέργειας θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν με ένα συμβιωτικό τρόπο με τις εταιρείες επεξεργασίας γεωργικών προϊόντων και παράλληλα να συμβάλουν τα μέγιστα στην βελτίωση τόσο του οικολογικού αλλά και του εμπορικού προφίλ ενός προϊόντος

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν την Ευρωπαϊκή Ένωση και το Υπουργείο Παιδείας και Θρησκευμάτων για την χρηματοδότηση του έργου «Παραγωγή Οργανικών Λιπασμάτων και Βιοκαυσίμων από τα Απόβλητα Ελαιοτριβείων, FERTiliser ENERGY – FERTENERGY».

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Azbar N., et al.: A Review of Waste Management Options in Olive Oil Production. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 34, 209–247 (2004)
- [2] Papadopoulos A. et al.: Guidelines for the eco-production of olive oil. European Commission.:
- [3] http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=Ecoil_guidelines2.pdf. (2006). Accessed April 2014
- [4] Tsagaraki E., Lazarides H. N., Petrotos K. B.: Olive Mill Waste Water and Treatment. In: *Utilization of By-Products and Treatment of Waste in the Food Industry*, pp. 133–158. Springer, New York (2007).
- [5] Arvanitoyannis I., Kassaveti A., Stefanatos S.: Current and potential uses of thermally treated olive oil waste. *International Journal of Food Science and Technology*. 42, 852–867, (2007).
- [6] International Energy Agency (IEA). *Technology Roadmap, Bioenergy for Heat and Power*, 2012. Available from:
- [7] <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/bioenergy.pdf>. [Accessed 04/07/2014].
- [8] Mangoyana RB and Smith TF. Decentralised bioenergy systems: A review of opportunities and threats. *Energy Policy* 2011; 39: 1286–95
- [9] Guzmán G., Alonso A.: A comparison of energy use in conventional and organic olive oil production in Spain, *Agricultural Systems*, 98. 167–176 (2008).
- [10] Esteban L. et al. *Biomass Resources and Costs in Spain and Southern EU Countries*, Report No. CHRISGAS_February 2010_WP5_D38
- [11] Pattara C., Cappelletti G., Cichelli A.: Recovery and use of olive stones: Commodity, environmental and economic assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14, 1484–1489, (2010)
- [12] Zabaniotou A, Mitsakis P, Mertzis D, Tsiakmakis S, Manara P, Samaras Z. *Bioenergy Technology: Gasification with Internal Combustion Engine Application*. *Energy Procedia* 2013; 42: 745-53.
- [13] Damartzis T, Michailos S, Zabaniotou A. *Energetic assessment of a combined heat and power integrated biomass gasification–internal combustion engine system by using Aspen Plus®*. *Fuel Processing Technology* 2012; 95: 37-44
- [14] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Criteria and Indicators for Sustainable Forest Management – Annex: 1. Principles, Criteria, Indicators and Verifiers*. Rome; 2002. Available from: <http://www.fao.org/DOCREP/005/AC649E/ac649e0b.htm>. [Accessed: 04/07/2014].
- [15] Anonymous. *Defining indicators for sustainable aquaculture development in Europe, CONSENSUS – A multi-stakeholder platform for sustainable aquaculture in Europe*. Workshop report. Oostende, Belgium, 21-23/11/2005

ΣΤΑΘΜΟΙ ΣΥΛΛΟΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ ΓΙΑ ΣΚΟΠΟΥΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ

Νιόβη Χριστοδούλου¹, Πολύκαρπος Πολυκάρπου¹, Χρύσα Αντωνίου²,
Μιχάλης Κατζουράκης², Ελένη Μπαρμποπούλου², Ευαγγελία Στεφανουδάκη²,
Ηλίας Χριστοφόρου³, Αγγελική Κυλίλη³, Πάρις Φωκαΐδης^{3*}

¹, Ινστιτούτο Γεωργικών Ερευνών, Κύπρος

², Ινστιτούτο Ελαίας και Υποτροπικών Φυτών, ΕΛΓΟ Δήμητρα, Χανιά, Κρήτη

³, Frederick Research Center, Κύπρος, ^{3*}email: eng.fp@frederick.ac.cy

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαχείριση του ελαιοπυρήνα για σκοπούς ενεργειακής αξιοποίησης αποτελεί μια σημαντική πρόκληση για τις χώρες της Μεσογείου, στις οποίες παράγεται κατά μέσο όρο πέραν του 90% της παγκόσμιας παραγωγής ελαιολάδου. Ο ελαιοπυρήνας είναι γεωργικό απόβλητο το οποίο παρουσιάζει άριστες ενεργειακές ιδιότητες οι οποίες τον καθιστούν μια σημαντική πηγή στερεάς βιομάζας. Η ολοκληρωμένη διαχείριση και επεξεργασία του ελαιοπυρήνα σε όλα τα στάδια της αλυσίδας τροφοδοσίας του είναι ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον επιστημονικά θέμα, το οποίο χρήζει περαιτέρω διερεύνησης. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, παρουσιάζονται οι κύριοι παράμετροι βιωσιμότητας και αειφορίας της αλυσίδας τροφοδοσίας του ελαιοπυρήνα ως ενεργειακή πηγή. Τα κύρια στάδια διαχείρισης και επεξεργασίας αναλύονται με σκοπό τον καθορισμό των κύριων παραμέτρων οι οποίες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό ολοκληρωμένων αλυσίδων τροφοδοσίας. Ως κατακλείδα παρουσιάζεται η πιλοτική γραμμή επεξεργασίας και πελετοποίησης ελαιοπυρήνα η οποία λειτουργεί στο Δήμο Γερίου στην Κύπρο. Η γραμμή έχει δυνατότητα επεξεργασίας 1 tn στερεού αποβλήτου ημερησίως και δύναται να αξιοποιηθεί για την πελετοποίηση και την περαιτέρω ενεργειακή αξιοποίηση του ελαιοπυρήνα. Η εργασία αυτή υλοποιήθηκε στα πλαίσια του έργου Σχεδιασμός και ανάπτυξη κέντρων συλλογής, διαχείρισης και διάθεσης ελαιοπυρήνα για σκοπούς ενεργειακής αξιοποίησης” – Κ.Ε.Δ.Ε.Λ.Ε.Α. Η πρωτοβουλία αυτή εντάσσεται στα πλαίσια του Προγράμματος Διασυνοριακής Συνεργασίας Ελλάδα Κύπρος 2007-2013 και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΤΠΑ) και από εθνικούς πόρους της Ελλάδας και της Κύπρου

Λέξεις κλειδιά: βιομάζα, ελαιοπυρήνας, εφοδιαστική αλυσίδα, πιλοτική μονάδα

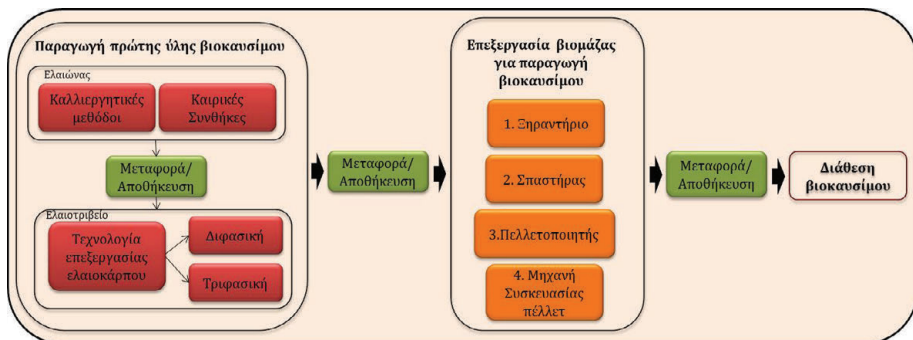
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη για χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για σκοπούς ενεργειακής αξιοποίησης αυξάνεται ολοένα και περισσότερο με κυριότερο στόχο τη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου και την αντικατάσταση των φυσικών καυσίμων. Η χρήση της βιομάζας κερδίζει συνεχώς έδαφος εφόσον μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη μείωση των αερίων του θερμοκηπίου. Ο ελαιοπυρήνας, σημαντική πηγή στερεάς βιομάζας, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στις χώρες της Μεσογείου εφόσον πάνω από το 90 % της παγκόσμιας παραγωγής του ελαιολάδου λαμβάνει χώρα στη περιοχή αυτή. Η αυξημένη ζήτηση για χρήση βιομάζας και η πολυπλοκότητα των αλυσίδων τροφοδοσίας επιβάλλουν την ανάγκη για αποδοτική και ολοκληρωμένη διαχείριση του ελαιοπυρήνα κατά μήκος της αλυσίδας τροφοδοσίας με στόχο πάντα την άριστη απόδοση σε ποιότητα και ποσότητα. Ως αλυσίδα τροφοδοσίας ορίζεται η αλληλουχία διαδικασιών των διαφορετικών ομάδων και φορέων, οι οποίοι εμπλέκονται από το στάδιο παραγωγής μέχρι τη διάθεση του ελαιοπυρήνα προς κατανάλωση και συνεργάζονται ώστε να προωθηθεί ένα προϊόν στην αγορά με σκοπό την βέλτιστη κάλυψη των αναγκών των καταναλωτών [1].

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η παρουσίαση και η ανάλυση των παραμέτρων της βιωσιμότητας της αλυσίδας τροφοδοσίας του ελαιοπυρήνα καθώς, και η παρουσίαση της πιλοτικής γραμμής επεξεργασίας και πελετοποίησης του ελαιοπυρήνα που λειτουργεί στο Δήμο Γερίου στην Κύπρο.

2. ΑΛΥΣΙΔΑ ΤΡΟΦΟΔΟΣΙΑΣ ΤΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΤΟΥ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ

Η αλυσίδα τροφοδοσίας της βιομάζας του ελαιοπυρήνα αποτελείται από διαφορετικές διαδοχικές διαδικασίες όπως την παραγωγή πρώτης ύλης, τη μεταφορά και αποθήκευση του ελαιοπυρήνα στα κέντρα επεξεργασίας, την επεξεργασία της βιομάζας ελαιοπυρήνα για παραγωγή βιοκαυσίμου και τέλος, την διάθεση της βιομάζας προς κατανάλωση [2] (Εικόνα 1). Τα πιο πάνω στάδια αναλύονται στη συνέχεια.



Εικόνα 1. Αλυσίδα τροφοδοσίας της βιομάζας ελαιοπυρήνα

2.1. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΡΩΤΗΣ ΥΛΗΣ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΟΥ

Η παραγωγή της πρώτης ύλης αποτελεί την πρώτη φάση στην αλυσίδα τροφοδοσίας και παρουσιάζει ιδιαίτερη σημασία σε σχέση με άλλες αλυσίδες τροφοδοσίας αγαθών. Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι ο ελαιοπυρήνας αποτελεί παραπροϊόν της αλυσίδας της παραγωγής ελαιολάδου. Η ιδιαιτερότητα της αλυσίδας τροφοδοσίας έγκειται στο γεγονός ότι η ετήσια παραγωγή ελαιοκάρπου δεν είναι ολόχρονη αλλά εποχιακή και δεν είναι σταθερή κάθε χρόνο [3]. Αντίθετα, επηρεάζεται άμεσα από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή ιδιαίτερα κατά την περίοδο Φεβρουάριο – Σεπτέμβριο (στη Μεσόγειο) όπου πραγματοποιείται αρχικά ή διαμόρφωση των οφθαλμών, μετά η άνθιση και η καρπώδεια της

και τέλος η περίοδος σκλήρυνσης του πυρήνα και ταχεία αύξηση του καρπού ελιάς [4, 5]. Επίσης, το φαινόμενο της παρενιαυτοφορίας, το οποίο εμφανίζεται χρόνο παρά χρόνο προκαλεί αυξομείωση της παραγωγής. Αυτή η παράμετρος πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για σκοπούς βελτιστοποίησης της αλυσίδας τροφοδοσίας. Επιπρόσθετα, η παραγωγή του ελαιοκάρπου και συνεπώς του ελαιοπυρήνα επηρεάζεται άμεσα από τις καλλιεργητικές φροντίδες όπως διαχείριση εδάφους, κλάδεμα, λιπάνσεις, άρδευση, φυτοπροστασία και από τη συγκομιδή του ελαιοκάρπου στο σωστό χρονικό διάστημα [4].

Ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την παραγωγή ελαιοπυρήνα είναι η τεχνολογία που χρησιμοποιείται κατά την επεξεργασία του ελαιοκάρπου και παραγωγής λαδιού αφού μεταφερθούν οι ελιές στα ελαιοτριβεία [6]. Η εξαγωγή ελαιολάδου μπορεί να διεξαχθεί με πίεση και φυγοκέντρηση δύο και τριών φάσεων. Η πρώτη μέθοδος αποτελεί την παραδοσιακή μέθοδο με υδραυλικό πιεστήριο κατά την οποία πραγματοποιείται διαχωρισμός της υγρής φάσης (ελαιολάδο και φυτικά υγρά) από τη στερεή φάση (ελαιοπυρήνας). Η φυγοκέντρηση τριών φάσεων βασίζεται στην διαφορά ειδικού βάρους των συστατικών της ελαιοζύμης (ελαιολάδο, νερό και στερεά). Ο διαχωρισμός πραγματοποιείται σε φυγοκεντρικά μηχανήματα με οριζόντιο άξονα (Decanter). Για την διευκόλυνση του διαχωρισμού χρειάζεται να προστεθεί νερό μετά την διαδικασία της μάλαξης. Τα προϊόντα από το Decanter τριών φάσεων είναι το ελαιολάδο, τα φυτικά υγρά και ο ελαιοπυρήνας με 45% - 50% υγρασία. Η φυγοκέντρηση δύο φάσεων δεν απαιτεί πρόσθετη ποσότητα νερού όπως απαιτείται στην διαδικασία των τριών φάσεων. Τα προϊόντα της φυγοκέντρησης δύο φάσεων είναι το λάδι και ένα ημιστερεό μείγμα που είναι αποτέλεσμα της μείξης των υγρών και στερεών αποβλήτων με υγρασία περίπου 55% - 70%. Τα περισσότερα ελαιοτριβεία μέχρι σήμερα χρησιμοποιούν την φυγοκέντρηση τριών φάσεων αν και τελευταία χρόνια υπάρχει μία τάση προς την υιοθέτηση της μεθόδου των 2-φάσεων, λόγω περιβαλλοντικού οφέλους από τη μείωση του όγκου των υγρών αποβλήτων από τη μειωμένη χρήση νερού. Τέλος, υπάρχει και η μέθοδος των 2^{1/2} φάσεων, η οποία συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο πιο πάνω συστημάτων. Συνεπώς, οι ποσότητες του ελαιοπυρήνα που παράγονται κατά την επεξεργασία του ελαιοκάρπου και το ποσοστό υγρασίας που συγκρατείται είναι ανάλογα της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται. Από τη διφασική μέθοδο, ο ελαιοπυρήνας που προκύπτει έχει πιο ψηλά ποσοστά υγρασίας σε σύγκριση με την τριφασική με αποτέλεσμα να υπάρχουν περισσότερες ανάγκες ενέργειας για αποξήρανση.

2.2. ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ

2.2.1. ΜΕΤΑΦΟΡΑ

Όταν οι μονάδες παραγωγής της βιομάζας και οι αντίστοιχες μονάδες επεξεργασίας για παραγωγή βιοκαυσίμου δεν είναι στο ίδιο σημείο, υπάρχει ανάγκη για παροχή υπηρεσιών μεταφοράς. Οι υπηρεσίες μεταφοράς κατέχουν ένα σημαντικό ποσοστό στο ολικό κόστος του τελικού προϊόντος στην αλυσίδα τροφοδοσίας [7, 8]. Σε αυτό το σημείο της αλυσίδας τροφοδοσίας περιλαμβάνονται όλες οι μεταφορές από τη στιγμή της παραγωγής της πρώτης ύλης μέχρι την αγορά του τελικού προϊόντος, όπως η μεταφορά της πρώτης ύλης από τον ελαιώνα (μονάδα παραγωγής) στο ελαιοτριβείο (μονάδα επεξεργασίας), τη μεταφορά του ελαιοπυρήνα από το ελαιοτριβείο στη μονάδα επεξεργασίας για παραγωγή βιοκαυσίμων και τέλος, τη μεταφορά του τελικού προϊόντος προς τον καταναλωτή. Η μεταφορά γίνεται με τα συνηθισμένα μέσα μεταφοράς των γεωργικών προϊόντων, τρακτέρ, καρότσα, φορτηγά και πλοία.

Το κόστος μεταφοράς της βιομάζας κυρίως επηρεάζεται από την ενεργειακή της πυκνότητα. Η ενεργειακή πυκνότητα είναι το ενεργειακό περιεχόμενο κατ' όγκο. Όσο μικρότερη είναι η ενεργειακή πυκνότητα, τόσο μικρότερη είναι η συνολική ποσότητα βιοενέργειας που μπορεί να φορτωθεί με περιορισμένη δυναμικότητα φόρτωσης, εκφρασμένης σε όγκο. Και όσο μικρότερη είναι η δυναμικότητα του μεταφορικού μέσου, τόσο μεγαλύτερο θα είναι και το κόστος μεταφοράς [9, 10]. Υπάρχουν δυο τρόποι ώστε να αυξηθεί η δυναμικότητα φόρτωσης ενός μέσου, είτε θα αυξηθεί η θερμογόνος ικανότητα του καυσίμου (q_{net}), με ξήρανση, είτε θα

αυξηθεί η ενεργειακή πυκνότητα (r_{BULK}), με πελετοποίηση ή τεμαχισμό [11].

Επιπρόσθετα, το κόστος μεταφοράς της βιομάζας εξαρτάται από το μέγεθος της παραγωγής, την τοποθεσία της μονάδας παραγωγής, των μονάδων επεξεργασίας και από το κέντρο διανομής του τελικού προϊόντος σε τοπικό, περιφερειακό, εθνικό ή ακόμα και διεθνές επίπεδο. Μια άλλη παράμετρος σημαντική για τις μεταφορές είναι η υποδομή του οδικού συστήματος. Στην Αυστρία για παράδειγμα, τα έξοδα μεταφοράς επηρεάζονται από το επίπεδο διατίμησης του οδικού δικτύου, τη νομοθεσία σχετικά με τη μεταφορά βιομάζας, το χρόνο μεταφοράς, ο οποίος εξαρτάται από την απόσταση, την ταχύτητα και την κατάσταση του οδικού δικτύου, το βάρος και τον όγκο της μάζας και τη χωρητικότητα των οχημάτων [12].

Τέλος, η μεταφορά της βιομάζας δεν είναι μόνο θέμα κόστους αλλά και επίδρασης στην ποιότητα του καυσίμου. Κατά τη μεταφορά, το βιοκαύσιμο θα πρέπει να προφυλάσσεται από βροχές και σκόνης ώστε να μην επηρεάζονται οι ιδιότητες των καυσίμων (π.χ. αύξηση της τέφρας από τη σκόνη).

2.2.2. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ

Η αποθήκευση είναι αναπόφευκτη όταν η βιομάζα είναι διαθέσιμη σε διαφορετική εποχή από αυτή της κατανάλωσής της, όπως συμβαίνει με την παραγωγή του ελαιοπυρήνα που παράγεται μια συγκεκριμένη εποχή, από Σεπτέμβριο μέχρι Φεβρουάριο. Από την άλλη, η αποθήκευση της βιομάζας αποτελεί ένα σοβαρό και ιδιαίτερο πρόβλημα διότι είναι ένα υλικό ογκώδες και ευαίσθητο στην απορρόφηση υγρασίας. Ακόμα και αν συγκεντρώνεται η βιομάζα με χαμηλή υγρασία μπορεί εύκολα να απορροφήσει υγρασία από το περιβάλλον αν αποθηκευθεί σε ακατάλληλους χώρους. Απορρόφηση υγρασίας δύναται να προκαλέσει ανάπτυξη μικροοργανισμών και να επηρεάσει τις θερμοχημικές αντιδράσεις μετατροπής της βιομάζας σε καύσιμο με την αύξηση των υπολειμμάτων. Επιπλέον η αποθήκευση της βιομάζας απαιτεί υπερμεγέθεις αποθηκευτικούς χώρους δεδομένου ότι πρέπει να αποθηκευτούν αποθέματα για συνεχή λειτουργία του συστήματος με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους συγκέντρωσης της βιομάζας αλλά και τη μείωση των απωλειών [7]. Επομένως, προκύπτει ότι η σωστή αποθήκευση του ελαιοπυρήνα εξασφαλίζει τη ποιότητας της βιομάζας, και στοχεύει στη βελτιστοποίηση του αλυσίδα εφοδιασμού.

2.3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΒΙΟΜΑΖΑΣ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΩΝ

Η βιομάζα για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βιοκαύσιμο υπόκειται σε ειδική επεξεργασία. Συγκεντρώνεται σε ειδικούς χώρους όπου λαμβάνουν χώρα διάφορες διεργασίες. Η βιομάζα ξηραίνεται σε ξηραντήρια ώστε να μειωθεί η υγρασία στο επιθυμητό ποσοστό (κάτω του 10%). Οι μεταγενέστερες διεργασίες εξαρτώνται από το είδος του καυσίμου που επιθυμείται να παραχθεί, όπως μπριγκέτες ή πελλέτες. Το συγκεκριμένο έργο επικεντρώνεται στην παραγωγή πελετών. Η πελετοποίηση, είναι μια διεργασία που λαμβάνει μέρος στους χώρους διαχείρισης της βιομάζας αφού περάσει το υλικό από τον τεμαχιστή, ο οποίος χρησιμοποιείται για τον τεμαχισμό στερεάς βιομάζας ελαιοπυρήνα. Τέλος, η παραγόμενη ποσότητα πελετών συσκευάζεται από τη μηχανή συσκευασίας. Η υγρασία, η δύναμη της πίεσης και η θερμοκρασία επηρεάζουν την ποιότητα των πελετών. Γενικά, υγρασία χαμηλότερη της τάξης του 9%, συμπίεση στα 20-24 χιλιοστά και θερμοκρασία μεγαλύτερη από 40 °C αποδίδουν τις καλύτερες συνθήκες πελετοποίησης, αν και οι συνθήκες διαφέρουν σε σχέση με την αναλυόμενη πρώτη ύλη [13]. Η ξήρανση και η συμπίεση σκοπό έχουν την αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας, την αποδοτικότερη μεταφορά των βιοκαυσίμων, βελτιωμένες ιδιότητες και επίτευξη καλύτερων προϋποθέσεων ενεργειακής αξιοποίησης [11, 12].

Η μετατροπή της βιομάζας σε βιοκαύσιμο πραγματοποιείται με θερμοχημική μετατροπή, όπου δηλαδή ένα μέρος μόνο της ενέργειας απελευθερώνεται ώστε να επιτευχθεί η

απαραίτητη θερμοκρασία της διεργασίας, ενώ η υπόλοιπη ενέργεια της πρώτης ύλης παραμένει στο παραγόμενο καύσιμο. Οι θερμοχημικές μέθοδοι μετατροπής περιλαμβάνουν την άμεση καύση, την αεριοποίηση και την πυρόλυση [3, 8]. Οι τεχνολογίες αυτές λαμβάνουν χώρα όταν η βιομάζα αποτελείται από λιγνο-κυτταρινούχα υλικά με χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό ώστε οι διεργασίες να είναι συμφέρουσες οικονομικά. Ο απλούστερο τρόπος για την ενεργειακή αξιοποίηση του ελαιοπυρήνα είναι η απευθείας καύση του για παραγωγή θερμότητας. Ανάλογα με την εμπιερχόμενη υγρασία του καυσίμου, η αντίδραση αυτή οδηγείται σε ατελή καύση με συνέπεια τη συσσώρευση άκαυστου υλικού, στάχτης, στο χώρο καύσης και στην έντονη εμφάνιση μαύρου καπνού. Η πυρόλυση είναι η θερμική διάσπαση βιομάζας με μικρό ποσοστό υγρασίας και απουσία οξυγόνου. Κατά τη θερμική διάσπαση παράγονται αέρια, υγρά και στερεά προϊόντα, η αναλογία τους εξαρτάται από τη θερμοκρασία και το χρόνο παραμονής στους κλίβανους. Κατά την ταχεία πυρόλυση, χρησιμοποιείται για όλα τα είδη βιομάζας, η πρώτη ύλη θερμαίνεται απουσία οξυγόνου ταχύτατα ώστε να διασπαστεί σε μείγμα αερίων και στερεών τα οποία στη συνέχεια ψύχονται και υγροποιούνται. Έχει βρεθεί ότι αυξάνοντας το ρυθμό της ενέργειας καύσης, αυξάνεται και ο ρυθμός της θερμικής διάσπασης. Από την άλλη, η αεριοποίηση είναι η θερμική αποικοδόμηση της οργανικής ύλης παρουσία ελεγχόμενης ποσότητας αέρα ή οξυγόνου σε ψηλές θερμοκρασίες (>700 °C).

Επομένως, προκύπτει η ανάγκη για αποτελεσματικότερη επεξεργασία του ελαιοπυρήνα, προκειμένου η καύση του να μην συνοδεύεται με άλλες αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, όπως δυσσομία, εκπομπές ατελούς καύσης και παραγωγή υπολειμμάτων από την καύση.

2.4. ΔΙΑΘΕΣΗ ΠΡΟΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ

Τελευταίο στάδιο της αλυσίδα τροφοδοσίας είναι η διάχυση και διάθεση του τελικού προϊόντος στην αγορά. Ο ελαιοπυρήνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βιοκαύσιμο από τα ελαιουργεία για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών, σε αγροτικές περιοχές για θέρμανση σπιτιών και παραγωγή θερμού νερού, για θέρμανση θερμοκηπίων και σε άλλες χρήσεις όπως φούρνοι και βιοτεχνίες. Η αγορά, λαμβάνοντας υπόψη τα σημερινά δεδομένα, στερείται μηχανισμού αποτελεσματικής διαχείρισης του προϊόντος και διάθεσής του στην αγορά. Δεν υπάρχουν σημεία διάθεσης του ελαιοπυρήνα με αποτέλεσμα οι ιδιώτες και επιχειρηματίες, οι οποίες θέλουν να αξιοποιήσουν τον ελαιοπυρήνα, να καθίστανται ευάλωτες στην περίπτωση μη διαθεσιμότητας, ή διαθεσιμότητας του καυσίμου σε υψηλές τιμές. Επιπλέον, θα πρέπει να καθοριστεί η διατίμηση του βιοκαυσίμου στηριζόμενη σε μια σειρά παραμέτρων όπως η διαθέσιμη ποσότητα ελαιοπυρήνα, το κόστος συλλογής, μεταφοράς, αποθήκευσης και επεξεργασίας, το συνολικό κόστος διαχείρισης και διάθεσης, τα λειτουργικά έξοδα και έξοδα συντήρησης κέντρου διαχείρισης, αποδοτικότητα καυσίμου εν συγκρίσει με συμβατικά και τέλος βάση του κόστους συμβατικών καυσίμων. Ένας από τους βασικότερους στόχους του έργου είναι να δημιουργήσει ένα μηχανισμό διαχείρισης και διάθεσης του ελαιοπυρήνα ως βιοκαύσιμο στην αγορά.

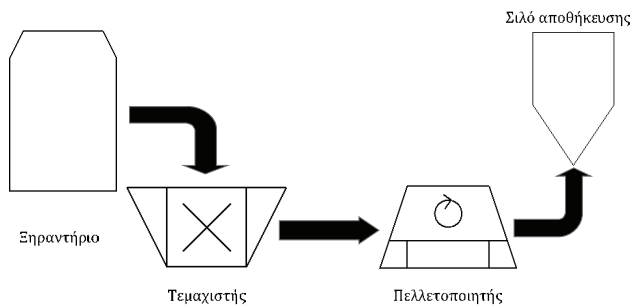
3. ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΗΣ ΜΟΝΑΔΑΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΕΛΑΙΟΠΥΡΗΝΑ

Η πιλοτική μονάδα επεξεργασίας του ελαιοπυρήνα έχει εγκατασταθεί στο Δήμο Γερίου, στην Κύπρο με σκοπό την παραγωγή πελετών ελαιοπυρήνα. Αποτελείται από το ξηραντήριο, τον τεμαχιστή, τον πελλετοποιητή και τη μηχανή συσκευασίας πελλέτας (εικόνα 2). Πιο κάτω γίνεται μια σύντομη περιγραφή της μονάδας παραγωγής βιοκαυσίμου από ελαιοπυρήνα.

Ξηραντήριο

Η ξήρανση αποτελεί την πρώτη την πρώτη φάση επεξεργασίας του ελαιοπυρήνα για παραγωγή βιοκαυσίμου. Η βιομάζα ξηραίνεται σε ξηραντήρια ώστε να μειωθεί η υπολειμματική υγρασία της πρώτης ύλης στο επιθυμητό ποσοστό. Το ξηραντήριο έχει

δυνατότητα επεξεργασίας στερεάς βιομάζας με ρυθμό 150 kg/h και μείωση της υγρασίας της τροφοδοτούμενης πρώτης ύλης από τουλάχιστον 50% σε τουλάχιστον 15%. Η αρχή λειτουργίας του ξηραντηρίου είναι αερολέβητας βιομάζας και τα μέρη του μηχανήματος τα οποία έρχονται σε επαφή με την πρώτη ύλη είναι κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα και το ξηραντήριο διαθέτει κυκλώνα στην έξοδο των καυσαερίων. Τέλος, το ξηραντήριο μπορεί να λειτουργεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι τους +45°C και σχετική υγρασία μέχρι 80%.



Εικόνα 2. Πιλοτική μονάδα επεξεργασίας ελαιοπυρήνα

Τεμαχιστής

Ο τεμαχιστής χρησιμοποιείται για τον τεμαχισμό στερεάς βιομάζας. Έχει δυνατότητα επεξεργασίας 150 kg/h και οι σπές του κόσκινου στον τεμαχιστή έχουν μέγεθος 3-10 mm με δυνατότητα αλλαγής του μεγέθους. Διαθέτει επίσης, κυκλώνα συλλογής του κοινορτοποιημένου υλικού. Τέλος, ο τεμαχιστής μπορεί να λειτουργεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι τους +45°C και σχετική υγρασία μέχρι 80%.

Πελλετοποιητής

Ο πελλετοποιητής χρησιμοποιείται για την παραγωγή πελλετών στερεάς βιομάζας με δυνατότητα παραγωγής πελλετών με ρυθμό 150 kg/h με σταθερή μήτρα και μετάδοση κίνησης σε ράουλα. Το υλικό κατασκευής της μήτρας είναι χάλυβας και η ελάχιστη διάρκεια αντοχής λειτουργίας είναι 400 ώρες και η διάμετρος οπών της μήτρας είναι 6mm. Ο πελλετοποιητής διαθέτει στην είσοδό του κοχλία τροφοδοσίας του υλικού με δυνατότητα ρύθμισης της τροφοδοτούμενης ποσότητας. Ο πελλετοποιητής να μπορεί να λειτουργεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι τους +45°C και σχετική υγρασία μέχρι 80%.

Μηχανή συσκευασίας πελλετών

Τελευταίο στάδιο στη γραμμή παραγωγής του βιοκαυσίμου είναι η συσκευασία της παραγόμενης ποσότητας πελλετών. Δυνατότητα συσκευασίας πελλετών έχει τον ίδιο ρυθμό με τα υπόλοιπα στάδια. Η μηχανή διαθέτει ιμάντα μεταφοράς του υλικού από το σημείο παραγωγής των πελλετών στο σημείο συσκευασίας τους με δυνατότητα ταυτόχρονης ψύξης του μεταφερόμενου υλικού. Η διάταξη συμπεριλαμβάνει ζυγιστική μηχανή η οποία επιτρέπει την συσκευασία του υλικού σε σακούλες των 5 κιλών τουλάχιστον. Και τέλος, η μηχανή συσκευασίας πελλετών μπορεί να λειτουργεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος μέχρι τους +45°C και σχετική υγρασία μέχρι 80%.

4. ΚΕΔΕΛΕΑ

Η εργασία αυτή υλοποιήθηκε στα πλαίσια του έργου "Σχεδιασμός και ανάπτυξη κέντρων συλλογής, διαχείρισης και διάθεσης ελαιοπυρήνα για σκοπούς ενεργειακής αξιοποίησης" – Κ.Ε.Δ.Ε.Λ.Ε.Α. Η πρωτοβουλία αυτή εντάσσεται στα πλαίσια του Προγράμματος Διασυνοριακής Συνεργασίας Ελλάδα Κύπρος 2007-2013 και συγχρηματοδοτείται από την

Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΤΠΑ) και από εθνικούς πόρους της Ελλάδας και της Κύπρου. Επικεφαλής του έργου είναι το Ερευνητικό Κέντρο Φρέντερικ και το οποίο συνεργάζεται με άλλους τρεις φορείς, το Ινστιτούτο Γεωργικών Ερευνών Κύπρου, το Δήμο Γερίου και το Ινστιτούτο Ελιάς και Υποτροπικών Φυτών Χανίων. Ο γενικός στόχος του έργου είναι η δημιουργία και λειτουργία ενός κέντρου συλλογής, διαχείρισης και διάθεσης του ελαιοπυρήνα για σκοπούς ενεργειακής αξιοποίησης, όπως και ο καθορισμός ενός ολοκληρωμένου πλαισίου για την λειτουργία κέντρων διαχείρισης ελαιοπυρήνα στον ελληνικό και κυπριακό χώρο. Οι ειδικότεροι στόχοι της πρότασης είναι:

- Η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου μοντέλου πρόβλεψης και καταγραφής της παραγόμενης ετήσιας ποσότητας ελαιοπυρήνα, το οποίο θα στηρίζεται σε ανατροφοδότηση από τα κύρια ελαιοτριβεία των περιοχών μελέτης, τους ελαιοπαραγωγούς, καθώς επίσης και από δείκτες, οι οποίοι αφορούν σε άλλους αστάθμητους παράγοντες (π.χ. καιρικές συνθήκες).
- Ο καθορισμός ελάχιστων απαιτήσεων για ολοκληρωμένα δίκτυα συλλογής και μεταφοράς του ελαιοπυρήνα σε κέντρα διαχείρισης σε Ελλάδα και Κύπρο.
- Η δημιουργία προδιαγραφών και η πιλοτική λειτουργία κέντρου διαχείρισης του ελαιοπυρήνα, με σκοπό την προώθησή του σε σημεία εμπορικής διάθεσης.
- Ο προσδιορισμός βέλπτων πρακτικών ολοκληρωμένης επεξεργασίας του ελαιοπυρήνα με καινοτόμες μεθόδους, με στόχο τη μείωση των εκπομπών αερίων εκάυσης και την αύξηση του βαθμού απόδοσης της ενεργειακής του εκμετάλλευσης.
- Η δημιουργία παρατηρητηρίου για τον καθορισμό μοντέλου τελικής τιμής διάθεσης του ελαιοπυρήνα, καθώς και προδιαγραφών λειτουργίας ενός παρατηρητηρίου τιμών.
- Ο προσδιορισμός ενός μόνιμου μηχανισμού καθορισμού της συμμετοχής του ελαιοπυρήνα στα ενεργειακά ισοζύγια των περιοχών μελέτης, για την εκπλήρωση του στόχου του 2020, με την είσοδο της βιομάζας στις εφαρμογές θέρμανσης.
- Η προώθηση χρήσης του ελαιοπυρήνα ως εναλλακτικό καύσιμο κυρίως για θέρμανση χώρου, όπως και η κοινοποίηση των συγκριτικών τους πλεονεκτημάτων έναντι των συμβατικών στις περιοχές μελέτης, μέσα από σχετικές δραστηριότητες διάχυσης, οι οποίες θα περιλαμβάνουν εντυπες εκδόσεις, εργαστήρια, εκδηλώσεις και λειτουργία ολοκληρωμένης ιστοσελίδας.

Τα αναμενόμενα αποτελέσματα του έργου αφορούν στην δημιουργία ενός μόνιμου μηχανισμού ορθολογιστικής διαχείρισης ενός φυσικού πόρου με ιδιαίτερη αξία, ο οποίος στο παρόν στάδιο χειρίζεται κατά τρόπο ο οποίος είναι ιδιαίτερα επιζήμιος για την ρύπανση των εδαφών, του υδροφόρου ορίζοντα, αλλά και της ατμόσφαιρας. Συνεπώς η υλοποίηση του προτεινόμενου έργου αναμένεται να δράσει καταλυτικά σε θέματα πρόληψης και μείωσης της ρύπανσης του περιβάλλοντος των περιοχών μελέτης, να έχει επίσης σημαντική συμβολή σε θέματα αειφόρου ανάπτυξης της υπαίθρου, καθότι, μετά την ολοκλήρωση του προτεινόμενου έργου, το κέντρο διαχείρισης ελαιοπυρήνα, δύναται να αποτελέσει μια μόνιμη πηγή εισοδήματος για την περιοχή ανάπτυξης, δημιουργώντας θέσεις εργασίας και μια νέα αγορά για τους κατοίκους της περιοχής.

5. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η ανάγκη για μείωση των αερίων του θερμοκηπίου καθώς και η ανάγκη για αντικατάσταση των καυσίμων με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αυξάνει το ενδιαφέρον για χρήση της βιομάζας τα τελευταία χρόνια. Επομένως, η δημιουργία και λειτουργία ενός κέντρου συλλογής, διαχείρισης και διάθεσης του ελαιοπυρήνα για σκοπούς ενεργειακής αξιοποίησης είναι αναγκαία. Η αλυσίδα τροφοδοσίας της βιομάζας του ελαιοπυρήνα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στη περιοχή της Μεσογείου λόγω της εκτεταμένης ελαιοκαλλιέργειας στην περιοχή αυτή. Οι αποφάσεις σχετικά με το σχεδιασμό και την οργάνωση της αλυσίδας τροφοδοσίας απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή. Στόχος των αποφάσεων αυτών θα πρέπει να είναι η εξασφάλιση πλεονεκτημάτων απέναντι στο κοινωνικό σύνολο και τη οικονομία, με τρόπο που να μην είναι επιζήμιος προς το περιβάλλον. Από την άλλη, η συνεργασία μεταξύ

φορέων, αλλά και η αλληλεπίδραση των ενεργειών των διαφορετικών σταδίων είναι αναγκαία ώστε να εξασφαλίζει ότι το τελικό προϊόν που παράγεται φτάνει στον καταναλωτή στη σωστή τιμή, στο σωστό μέρος, στην κατάλληλη ώρα και σε άριστη ποιοτική κατάσταση. Παράδειγμα αλληλεπίδρασης ενεργειών είναι το θετικό αποτέλεσμα της ξήρανσης της βιομάζας, το οποίο επηρεάζεται από το επίπεδο υγρασίας, και της μετατροπής της βιομάζας σε βιοκαύσιμο.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το έργο ΚΕΔΕΛΕΑ υλοποιείται στα πλαίσια του Προγράμματος Διασυνοριακής Συνεργασίας Ελλάδα Κύπρος 2007-2013, το οποίο συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΤΠΑ) και από εθνικούς πόρους της Ελλάδας και της Κύπρου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Christofer, M. 2005. Logistic and Supply Chain Management. *Prentice Hall, London*.
- [2] Sharma, B., Ingalls, R. G., Jones, C.L., Khanchi, A., 2013, Biomass supply chain design and analysis: Basis, overview, modeling, challenges, and future, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 608-627.
- [3] Ιακovou, E., Karagiannidis, A., Vlachos, D., Toka, A., Malamakis, A., 2010, Waste biomass-to-energy supply chain management: A critical synthesis, *Waste Management* 30, 1860-1870.
- [4] Γρηγορίου, Κ., 2006, Εφαρμογή Ορθών Γεωργικών και Περιβαλλοντικών Πρακτικών στην Ελιά, *Έκδοση ΣΕΠ*.
- [5] Galán, C., García-Mozo, H., Vázquez, L., Ruiz, L., Guardia, C. Ddl, Domínguez-Vilches, E., 2008, Modeling Olive Crop Yield in Andalusia, Spain, *Agronomy Journal*, 100.
- [6] Valta, K., Aggeli, E., Papadaskalopoulou, C., Panaretou, V., Sotiropoulos, A., Malamis, D., Moustakas, K., Haralambous, K-J., 2014, Adding value to olive oil production through waste and wastewater treatment and valorisation: the case of Greece.
- [7] Allen, J., Browne, M., Hunter, A., Boyd, J., Palmer, H., 1998, Logistics management and costs of biomass fuel supply, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 28, 463-477.
- [8] Fokaides, P. A. and Polycarpou, P., 2013, Chapter 8: Exploitation of olive solid waste for energy purposes. In: Poullikkas A ed. *Renewable Energy: Economics, Emerging Technologies and Global Practices*, New York: Nova Science Publishers, Inc.
- [9] Rentizelas, A.A., Tolis, A.J., Tatsiopoulos, I.P., 2009, Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13: 887-894.
- [10] BISYPLAN 2012. Οδηγός BISYPLAN. <http://bisyplan.bioenarea.eu/html-files-gr/handbook-intro.html>.
- [11] Uslu, A., Faaij A.P.C., Bergman, P.C.A., 2008, Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation, *Energy* 33: 1206-1223.
- [12] Gold, S. and Seuring, S., 2011, Supply chain and logistics issues of bio-energy production, *Journal of Cleaner Production*, 19: 32-42.
- [13] Garcia-Maraver, A., Rodriguez, M.L., Serrano-Bernardo, F., Diaz, L.F., Zamorano, M., 2015, Factors affecting the quality of pellets made from residual biomass of olive trees, *Fuel Processing Technology*, 129: 1-7.

ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΤΗΝΟΤΡΟΦΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Α. Παλαιοχωρινός¹, Αι.Κονδύλη^{1*}, Χ. Παπαποστόλου¹, Ι.Κ. Καλδέλλης²

^{1*} Εργαστήριο Αριστοποίησης Παραγωγικών Συστημάτων,

² Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας και Προστασίας Περιβάλλοντος

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΤΕΙ Πειραιά, 12244, Αθήνα, e-mail:

ekondili@teipir.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η βιομάζα αποτελεί για τη χώρα μας μία πολύ αξιόλογη ανανεώσιμη ενεργειακή πηγή για την παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν διάφορες μορφές βιομάζας που μπορούν να αξιοποιηθούν για το σκοπό αυτό. Η παρούσα εργασία εστιάζει το ενδιαφέρον της στη βιομάζα και το αντίστοιχο βιοαέριο που παράγονται από κτηνοτροφικές μονάδες, μία ενεργειακή πηγή για την οποία δεν έχει υπάρξει μέχρι τώρα ενδιαφέρον και προσοχή αντίστοιχη των άλλων μορφών βιομάζας.

Στα πλαίσια αυτά στην παρούσα εργασία γίνεται μία αποτύπωση του δυναμικού που υπάρχει στη χώρα μας για την παραγωγή ενέργειας από κτηνοτροφικές μονάδες και των γεωγραφικών σημείων ενδιαφέροντος για την υλοποίηση αντίστοιχων επενδύσεων. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον και σημείο εστίασης για την εργασία, επιπροσθέτως της αποτύπωσης του δυναμικού και του γεωγραφικού προσδιορισμού των πλέον αξιόλογων σημείων, αποτελεί η τεχνικοοικονομική ανάλυση των αντίστοιχων επενδύσεων και η εμπορική διαθεσιμότητα του σχετικού εξοπλισμού.

Τέλος παρουσιάζεται μία μελέτη περίπτωσης για την εγκατάσταση μίας μονάδας στη Βόρεια Ελλάδα, η οποία αναλύεται τεχνικοοικονομικά, λαμβάνοντας υπόψη και τα περιβαλλοντικά της οφέλη. Στην εργασία, επιπλέον των τεχνικών αποτελεσμάτων υποστηρίζεται και η ιδέα και πρακτική εφαρμογή της κατανεμημένης και αποκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας αλλά και η μείωση της κατανάλωσης των συμβατικών καυσίμων με τα συνεπαγόμενα θετικά περιβαλλοντικά και ενεργειακά αποτελέσματα.

Λέξεις Κλειδιά: Βιοαέριο, παραγωγή ενέργειας, τεχνικοοικονομική μελέτη, περιβαλλοντικά οφέλη.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Για τη χώρα μας η κτηνοτροφία αποτελεί μία πολύ σημαντική δραστηριότητα, όχι μόνο για λόγους απασχόλησης και οικονομικής δραστηριότητας (συνεισφέροντας πάνω από 2% στο ΑΕΠ και απασχολώντας περίπου το 1/3 του γεωργικού δυναμικού των κατοίκων των αγροτικών περιοχών), αλλά κυρίως λόγω της εξαιρετικής ποιότητας κρέατος που είναι σε θέση να παράγουν οι εν λόγω μονάδες και της σημασίας που ολοένα και περισσότερο αποκτά ο κλάδος των τροφίμων και των τοπικών προϊόντων για την εθνική μας οικονομία.

Τα κτηνοτροφικά απόβλητα από τις διάφορες φάρμες εκτροφής αποτελούν μια εξαιρετική πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοαερίου. Μέχρι τώρα στην Ελλάδα τα απόβλητα αυτά αποτελούν επιβάρυνση για το περιβάλλον καθώς δεν αξιοποιούνται κατάλληλα και δεν υπάρχει και η κατάλληλη διαχείριση και τελική τους διάθεση. Συνεπώς, η παραγωγή ενέργειας από τα κτηνοτροφικά απόβλητα είναι μια πολύ καλή λύση για την αξιοποίησή τους για παραγωγή ενέργειας αρκεί οι τρόποι που θα χρησιμοποιηθούν να είναι οικονομικά αποτελεσματικοί και κοινωνικά αποδεκτοί.

Η παρούσα εργασία εστιάζει το ενδιαφέρον της στη βιομάζα και το αντίστοιχο βιοαέριο τα οποία προέρχονται από κτηνοτροφικές μονάδες, μία ενεργειακή πηγή της οποίας η αξιοποίηση τόσο σε επίπεδο τεχνικό όσο και οικονομικό δεν έχει τύχει ιδιαίτερης προσοχής. Για το σκοπό αυτό γίνεται μια προσπάθεια αποτύπωσης της υπάρχουσας κατάστασης του σχετικού δυναμικού της χώρας και πιο συγκεκριμένα της περιοχής της Κεντρικής Μακεδονίας (νομοί Κιλκίς-Θεσσαλονίκης & Χαλκιδικής) όπου εκεί συγκεντρώνεται το υψηλότερο παραγωγικό δυναμικό της χώρας. Στα πλαίσια αυτά μελετάται συγκεκριμένα το λεκανοπέδιο των λιμνών Βόλβης και Κορώνειας λόγω του ιδιαίτερου καθεστώτος που επικρατεί από πλευράς περιβαλλοντολογικής νομοθεσίας (Ramsar & NATURA 2000) αλλά κυρίως λόγω της συνύπαρξης στην ίδια ζώνη κτηνοτροφικών και βιομηχανικών μονάδων.

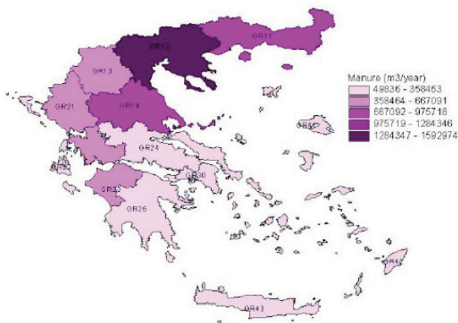
Επιπρόσθετα διερευνάται η δυνατότητα δημιουργίας μιας κεντρικής μονάδας αξιοποίησης των κτηνοτροφικών αποβλήτων με την τεχνολογία της αναερόβιας χώνευσης προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η μονάδα πέραν της καταρχήν τεχνικοοικονομικής εκτίμησης αξιολογείται και με όρους περιβαλλοντικούς συγκρινόμενη με βάση μία μονάδα συμβατικού καυσίμου (θερμική μονάδα παραγωγής ρεύματος με λιγνίτη ιδίας εγκατεστημένης ισχύος 1 MW). Απώτερος στόχος και σκοπός είναι η προσέλκυση επενδύσεων στην περιοχή που να δραστηριοποιούνται στον χώρο της παραγωγής ενέργειας.

2. ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΡΦΩΝ ΒΙΟΜΑΖΑΣ - ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΓΕΩΡΓΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

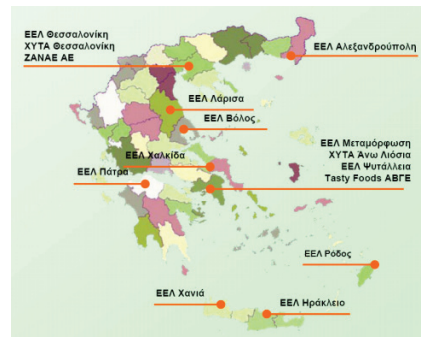
Η πρωτογενής παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στην ΕΕ - 28 το 2012 ήταν 177,3 εκατομμύρια ΤΙΠ – συνεισφέροντας περίπου στο 22,3 % της συνολικής παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας. Μεταξύ των ΑΠΕ, η σημαντικότερη πηγή στην ΕΕ - 28 ήταν η βιομάζα και τα προερχόμενα απόβλητα με ποσοστό που αντιστοιχεί μόλις κάτω από τα δύο τρίτα (65,5 %), της πρωτογενούς παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ για το ίδιο έτος (2012) [1]. Σήμερα η βιομάζα αναμένεται να παίξει σημαντικό ρόλο λόγω της κατανεμημένης διαθεσιμότητάς της αλλά κυρίως λόγω της ενεργειακής έλλειψης που πλήττει κατά βάση οικογένειες χαμηλού εισοδήματος.

Σε εθνικό επίπεδο η αξιοποίηση υπολειμματικών μορφών βιομάζας είτε γεωργική (στελέχη φυτών, κλαδιά, φύλλα, άχυρο, απόβλητα από κλαδέματα, κατάλοιπα από τον εκκοκκισμό βαμβακιού, κουκούτσια από ελιές και φρούτα κτλ) ή/και κτηνοτροφική (κατάλοιπα από χοιροστάσια, βουστάσια, πτηνοσφαγεία κλπ) θα μπορούσε να αποτελέσει οικονομικά αλλά και περιβαλλοντικά βιώσιμη λύση ενεργειακής παραγωγής καθότι υπάρχει αξιόλογο δυναμικό (Εικόνα 1) κυρίως στη Β. Ελλάδα με 17 εκ. τόνοι/έτος κτηνοτροφικών αποβλήτων (βοοειδή, χοίροι) να κατανέμονται κατά κύριο λόγο στη Θεσσαλονίκη και στην Πέλλα, με τα χοιροτροφεία να διαμοιράζονται ισάριθμα σε όλη την Ελλάδα και τα πτηνοτροφεία να δραστηριοποιούνται κυρίως σε 3 νομούς.

Αναφορικά με τη συλλογή, επεξεργασία και τελική διάθεση των υγρών και στερεών οικιακών και μη αποβλήτων, αποτελούν κατά κύριο λόγο ευθύνη της Τοπικής Αυτοδιοίκησης και των Περιφερειακών Φορέων, με αποτέλεσμα την έλλειψη στρατηγικού ενεργειακού σχεδιασμού και μελλοντικών προβλέψεων [2]. Άμεση απόρροια αυτού του γεγονότος είναι ακόμα και σε περιοχές με υψηλό δυναμικό η ενεργειακή αξιοποίηση των αποβλήτων (και οι αντίστοιχες μονάδες βιοαερίου (Εικόνα 2)) να περιορίζεται στην αξιοποίηση των Αστικών Στερεών Απορριμμάτων και της υπολειμματικής βιομάζας από τους κατά τόπους βιολογικούς με λίγες μόνο μονάδες διάσπαρτες στην Ελλάδα.



Εικόνα 1: Αγροτικά απόβλητα από τη δευτερογενή παραγωγή (κτηνοτροφία) [3]



Εικόνα 2: Μονάδες βιοαερίου στην Ελλάδα (σε λειτουργία το έτος 2007) [3]

Για το λόγο αυτό, σε ευρωπαϊκό επίπεδο έχει διερευνηθεί η δημιουργία μικρών αποκεντρωμένων μονάδων συνδυασμένης χώνευσης αποβλήτων. Η Δανία είναι αυτή τη στιγμή πρωτοπόρος στην παραγωγή βιοαερίου από ζωικής προέλευσης απόβλητα με 20 κεντρικές και 60 σε επίπεδο-φάρμας μονάδες εν λειτουργία.

Οι μικρές αυτόνομες μονάδες εισάγουν ένα ολοκληρωμένο μοντέλο παραγωγής και διαχείρισης ενέργειας το οποίο μπορεί να εξυπηρετήσει με κατάλληλο σχεδιασμό και προβλέψεις όχι μόνο μεμονωμένες αλλά και ένα σύνολο αγροτικών περιοχών και αντίστοιχων εγκαταστάσεων ελαχιστοποιώντας:

- Τα παραγόμενα απόβλητά τους και τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις στην ατμόσφαιρα, στο έδαφος αλλά και στους υδάτινους πόρους.
- Τα κόστη μεταφοράς και διάθεσης των βιο-αποβλήτων και τον αντίστοιχο φόρτο των logistics.
- Το κόστος της χρησιμοποιούμενης ενέργειας.

Μεγιστοποιώντας:

- Την ενεργειακή τους αυτονομία και αυτάρκεια.
- Τα έσοδά τους και τα πιθανά κέρδη τους.

Γενικά αναφορικά με την κλίμακα απαντώνται οι ακόλουθες μονάδες [4]:

Οικογενειακής κλίμακας: Σε χώρες ή/και περιοχές χαμηλού οικογενειακού εισοδήματος, λειτουργούν μονάδες βιοαερίου οικογενειακής κλίμακας, οι οποίες χρησιμοποιούν πολύ απλές τεχνολογίες. Η πρώτη ύλη αυτών προέρχεται είτε από την αγροτική τους δραστηριότητα είτε από την αντίστοιχη οικιακή και το παραγόμενο βιοαέριο προορίζεται να καλύψει τις ανάγκες του νοικοκυριού για μαγείρεμα και φωτισμό.

Κλίμακας Αγροκτήματος: Σε επίπεδο αγροκτήματος, η ύπαρξη μονάδας βιοαερίου εξυπηρετεί τις ιδιοκαταναλώσεις του αγροκτήματος, χρησιμοποιώντας την ίδια παραγόμενη

πρώτη ύλη. Είναι επίσης δυνατό η ίδια η μονάδα να τροφοδοτείται από γειτονικές μέσω μόνιμου δικτύου συλλογής των αποβλήτων.

Κεντρικές (κοινές) εγκαταστάσεις: Η κεντρική συγχώνευση αναφέρεται στην ύπαρξη μίας μονάδας εγκατεστημένης κεντρικά στην περιοχή συλλογής της κοπριάς. Η πρώτη ύλη προέρχεται από το σύνολο των διασυνδεδεμένων αγροκτημάτων και στοχεύει στο να μειώσει τις δαπάνες, το χρόνο και το εργατικό δυναμικό για τη μεταφορά της κοπριάς από και προς τη μονάδα βιοαερίου.

Το ενδιαφέρον των ευρωπαϊκών γεωργών για τις εφαρμογές της Αναερόβιας Χώνευσης (ΑΧ) αυξάνεται τα τελευταία χρόνια, όχι μόνο επειδή η αγροτική παραγωγή βιοαερίου μετατρέπεται τα απόβλητα σε πολύτιμους φυσικούς πόρους και παράγει υψηλής ποιότητας εδαφοβελτιωτικό, αλλά και επειδή δημιουργεί νέες επιχειρηματικές ευκαιρίες για τους εμπλεκόμενους αγρότες και τους δίνει μία νέα διεξόδο, ως προμηθευτές ανανεώσιμης ενέργειας.

Οι μικρές διάσπαρτες κτηνοτροφικές μονάδες στην Ελλάδα θα μπορούσαν άμεσα να ενταχθούν σε ένα δίκτυο ολοκληρωμένης διαχείρισης αποβλήτων καθότι οι ταυτόχρονες ανάγκες τους σε θερμότητα και ηλεκτρισμό σε συνδυασμό με τον αποκεντρωμένο τους χαρακτήρα -μακριά από ηλεκτρικές διασυνδέσεις δικτύου- θα μπορούσαν να ταυριάζουν ιδιαίτερα με τις λειτουργικές απαιτήσεις και τα παραγόμενα προϊόντα των μονάδων αναερόβιας χώνευσης.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η αναερόβια χώνευση είναι εξαιρετικά σύνθετη διεργασία που συμβαίνει σε περισσότερα από ένα στάδια. Για σταθερές όμως συνθήκες μπορεί να αποδοθεί από απλά μοντέλα [5]. Στην παρούσα εργασία η ενεργειακή μοντελοποίηση έγινε βάσει του ήδη αναπτυχθέντος μοντέλου του Chen και Hashimoto που εφαρμόστηκε επιτυχώς σε απόβλητα χοιροτροφείου ελαιοτριβείου και πρωτογενή ιλύ αστικών αποβλήτων όπως αυτό περιγράφεται στην εργασία των κων Γελεγένη κ.ά. [6]. Ενδεικτικά παρατίθεται η εξίσωση της παραγόμενης μικτής ηλεκτρικής ισχύος ως ακολούθως, η οποία εφαρμόζεται και στην περίπτωση της ύπαρξης ενεργειακών καλλιεργειών στην υπό μελέτη έκταση:

$$P_{GEP} = \left\{ \frac{\left[\frac{Q_m \times TS \times VS \times BY_{VS} \times (1 - L_{STORAGE})}{\left(\frac{\beta \times \alpha \times W_{ABU} \times UAS_M \times Y^C}{ABU_m \times X_m} \right) \times \left(TS \times VS \times BY_{VS} \times (1 - L_{STORAGE}) \right)} \right] + \left(CH_4 \times LHV \times \frac{n_{el}}{h_{op}} \right)}{1} \right\} \times \left(CH_4 \times LHV \times \frac{n_{el}}{h_{op}} \right) \quad (1)$$

Όπου,

P_{GEP} (kWe) η μικτή ηλεκτρική ισχύς, **TS** (%) τα Ολικά Στερεά, **VS** (%) τα Πτητικά Στερεά, **BY_{VS}** (%) η απόδοση του βιοαερίου των Πτητικών Στερεών, **L_{STORAGE}** (%) οι απώλειες αποθήκευσης της βιομάζας, **LHV** (kWh/Nm³) η κατώτερη θερμογόνος δύναμη, **CH₄** (%), το ποσοστό μεθανίου (υποδεικνύει το επί τις εκατό περιεχόμενου φυσικού αερίου στο βιοαέριο), **n_{el}** (%) ο βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης της μονάδας, **h_{op}** (hrs/year) ώρες λειτουργίας ανά έτος, **β** (%) το ποσοστό της βοσκήσιμης γης όπου μετατρέπεται σε καλλιεργήσιμη (στην περίπτωση της ύπαρξης ενεργειακών καλλιεργειών), **α** (%) το ποσοστό της κοπριάς που μπορεί να ανακτηθεί προς αναερόβια χώνευση (%), **W_{ABU}** το βάρος ανά ενήλικο ζώο (ABU) (tn/ABU), **X_m** η ετήσια ποσότητα κοπριάς που παράγεται ανά βάρος ενήλικου ζώου.

Αναφορικά με την εκτίμηση της διαθέσιμης πρώτης ύλης, για την υπό μελέτη περιοχή έγινε αναλυτική καταγραφή του ζωικού δυναμικού της (και ποιοτικά και ποσοτικά) και ταυτόχρονη αναγωγή σε εκμεταλλεύσιμο ζωικό δυναμικό (ενήλικα ζώα). Επίσης θεωρήθηκε ότι από τη διαθέσιμη παραγωγική δυναμικότητα των ζωικών αποβλήτων μόνο το 50% [7] είναι διαθέσιμο (τεχνικά) για την παραγωγή ενέργειας. Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται

τα τυπικά χαρακτηριστικά της ζωικής βιομάζας καθώς και η εκτιμώμενη παραγωγή βιοαερίου ανά κατηγορία ζώων.

Πίνακας 1: Συντελεστές αποβλήτων ανά κατηγορία των ζώων [7]

Κατηγορία ζώων	Μέση μάζα ζώου (kg)	Παραγόμενη κοπριά σε ημερήσια βάση (kg _m)	Περιεχόμενη υγρασία (%)	TS Ολικά Στερεά (% kg _m)	VS- Πτητικά Στερεά (% του TS)	Παραγωγή βιοαερίου (m ³ /(m ³ /tn VS)	CH ₄ στο βιοαέριο (%)
Βοοειδή	640	50 - 55	83 - 88	11 - 15	80 -85	300 -450	60 - 65
Χοίροι	60	5 - 6,5	90	6 - 9,8	75 - 90	450 - 550	60 - 65
Άλογα	500	20 - 24,5	85	14 - 15	75	250 - 500	60 - 65
Κότες	1,6 - 3,5	0,52 - 0,72	75	19 - 25	75	300 - 500	60 - 65
Γαλοπούλες	15,00	0,48 - 1,2	74	19	95 - 98	300 - 500	60 - 65
Πάπες	6,5 - 8	0,52 - 0,64	74	49	33	300 - 500	60 - 65
Αιγοπρόβατα	70 - 80	5,6 - 6,4	-	22 - 40	70 -75	300 - 500	60 - 65

Στην παρούσα εργασία ερευνάται η τεχνική και οικονομική δυνατότητα δημιουργίας μίας κεντρικής μονάδας επεξεργασίας κτηνοτροφικών αποβλήτων με τη μέθοδο της ΑΧ, ενδεικτικής ισχύος 1MW. Λόγω των υψηλών συμβολαιοποιημένων επιδοτήσεων (για βιοαέριο που προέρχεται από βιομάζα κτηνοτροφικών και αγροτοβιομηχανικών οργανικών αποβλήτων και υπολειμμάτων) με εγκατεστημένη ισχύ ≤ 3 MW η επιδότηση ανέρχεται στα 209€/MWh_{el} [8] και 230€/MWh_{el} στην περίπτωση μόνο ιδίων κεφαλαίων- μη χρησιμοποίησης του αναπτυξιακού νόμου) εξετάζεται σε κάθε περίπτωση η πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο διαχειριστή του δικτύου. Βέβαια αυτό δεν αποθαρρύνει τεχνικά την περίπτωση της ιδιοκατανάλωσης σε μια ευρύτερη περιοχή, γεγονός το οποίο όμως χρήζει ειδικής οικονομικής ανάλυσης.

Τα οικονομικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη ανάλυση της βιωσιμότητας της επένδυσης όπως αυτά παρατίθενται αναλυτικά με βάση το μοντέλο αξιολόγησης ενεργειακών επενδύσεων από τους κ. Skarlis et al. 2012 [9] και Kapsali et al. 2012 [10] και αφορούν στην Καθαρά Παρούσα Αξία της επένδυσης (NPV) και το εσωτερικό συντελεστή απόδοσης IRR, λαμβάνοντας υπόψη χρήση ιδίων κεφαλαίων ή και δανεισμό, αποσβέσεις εγκατάστασης, πληθωρισμό, φόρους καθώς και τεχνικά στοιχεία λειτουργίας με τα αντίστοιχα κόστη της μονάδας.

Ενδεικτικά τους οικονομικούς υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν οι κάτωθι εξισώσεις:

$$C_{turn-on-key} = C_{plant} + C_{storage} + C_{heat} \quad (2)$$

Όπου $C_{turn-on-key}$ το ολικό κόστος της επένδυσης και C_{plant} , $C_{storage}$, C_{CHP} τα κόστη επενδυτικού κεφαλαίου, αποθήκευσης βιομάζας και συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού αντίστοιχα.

Και η καθαρά παρούσα αξία της επένδυσης υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$NPV = C_{turn-on-key} + \sum \left[\frac{R \times C_{Total\ biomass} \times C_{O\&M}}{(1-Y)^t} \right] \quad (3)$$

Όπου R, είναι τα ετήσια έσοδα, $C_{Total\ biomass}$ το κόστος βιομάζας, $C_{O\&M}$, το κόστος λειτουργίας και συντήρησης και όπου t η οικονομική ζωή της επένδυσης, και Y είναι το προεξοφλητικό επιτόκιο.

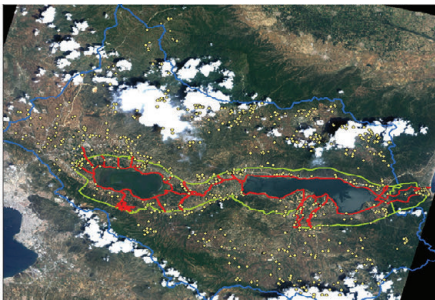
4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ: ΛΕΚΑΝΟΠΕΔΙΟ ΒΟΛΒΗΣ ΚΑΙ ΚΟΡΩΝΕΙΑΣ

Η περιοχή των λιμνών Κορώνειας και Βόλβης έχει πλούσιο ιστορικό παρελθόν αφού η εύφορη περιοχή αποτέλεσε κίνητρο και παράγοντα ανάπτυξης οργανωμένης κοινωνικής ζωής από τους προϊστορικούς ακόμα χρόνους. Σήμερα στην περιοχή της Μυγδονίας βρίσκονται περίπου 90 οικισμοί με συνολικό πληθυσμό που προσεγγίζει τις 80.000 κατοίκους, σύμφωνα με στοιχεία της ΕΣΥΕ από την απογραφή του 2011. Ο πρωτογενής τομέας είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένος με το 40% των κατοίκων να απασχολούνται σε αυτό. Πιο συγκεκριμένα στην Κορώνεια καλλιεργούνται περίπου 220.000 στρέμματα ενώ στη Βόλβη περίπου 140.000 στρέμματα. Επίσης στην περιοχή εκτρέφονται περίπου 21.000 βοοειδή και 230.000 αιγοπρόβατα (Πίνακας 2).

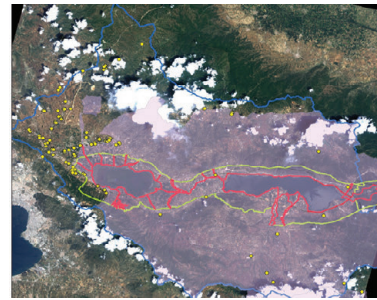
Πίνακας 2: Ζωικό δυναμικό λεκανοπεδίου Βόλβης & Κορώνειας [11]

ΒΟΟΕΙΔΗ	ΑΙΓΟΠΡΟΒΑΤΑ	ΧΟΙΡΟΙ	ΑΛΟΓΑ	ΠΤΗΝΟΤΡΟΦΙΑ	ΛΟΙΠΑ
20.133	234.654	2.770	911	144.900	253

Το λεκανοπέδιο των λιμνών Βόλβης & Κορώνειας παρουσιάζει και την ιδιαιτερότητα της ύπαρξης ζωνών NATURA (Α, Β, Γ) μέσα στις οποίες δραστηριοποιούνται και κτηνοτροφικές μονάδες αλλά και βιοτεχνικές και βιομηχανικές μονάδες. Η αναλυτική τους απεικόνιση καθώς και η ποσοστιαία κατανομή των κτηνοτροφικών μονάδων ανά ζώνη παρουσιάζεται στις Εικόνες 3, 4, 5 και 6 αντίστοιχα.



Εικόνα 3: Θέσεις κτηνοτροφικών εγκαταστάσεων στο λεκανοπέδιο Βόλβης και Κορώνειας [11]



Εικόνα 4: Θέσεις βιομηχανικών και βιοτεχνικών εγκαταστάσεων στο λεκανοπέδιο Βόλβης και Κορώνειας [11]

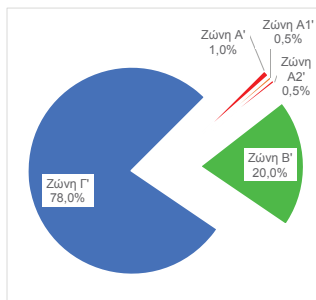
Ζώνη Α



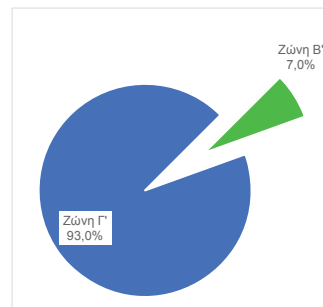
Ζώνη Β



Ζώνη Γ



Εικόνα 5: Κατανομή (%) κτην. μονάδων ανά ζώνη προστασίας [11]



Εικόνα 6: Κατανομή (%) βιομηχ. μονάδων ανά ζώνη προστασίας [11]

Με δεδομένο ότι ο μεγαλύτερος αριθμός των κτηνοτροφικών εγκαταστάσεων βρίσκεται στη ζώνη Γ όπου παράλληλα τοποθετείται και το σύνολο των βιομηχανικών δραστηριοτήτων, η δημιουργία μιας κεντρικής μονάδας διαχείρισης κτηνοτροφικών αποβλήτων προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα μπορούσε να συμβάλει πέραν της κάλυψης των ιδιοκαταναλώσεων των μονάδων αλλά και της ευρύτερης περιοχής.

Για το λόγο αυτό μελετάται ενδεικτικά η τεχνική δυνατότητα δημιουργίας μίας μονάδας 1MW, τροφοδοτούμενη με πρώτες ύλες από την ίδια την περιοχή και έπειτα αξιολογείται οικονομικά ως μία ανεξάρτητη επένδυση την οποία θα μπορούσε να υποστηρίξει ο οποιοσδήποτε επενδυτής (ιδιώτης, Δήμος, κτηνοτροφικός συνεταιρισμός κ.ά).

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1. ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΔΥΝΑΜΙΚΟ

Στον υπολογισμό του ενεργειακού δυναμικού έχουν ληφθεί υπόψη μόνο 4 (ευρείες) κατηγορίες ζώων βοοειδή, πουλερικά, χοίροι και αιγοπρόβατα. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται ως ακολούθως: π.χ. τυπική φάρμα από βοοειδή αριθμεί κατά μέσο όρο 213 ενήλικα ζώα και έχει μία μέση αποδιδόμενη ισχύ 10kW, ενώ το σύνολο του δυναμικού των βοοειδών της υπό μελέτη περιοχής μπορεί να υποστηρίξει μονάδες δυναμικότητας 850kW περίπου. Τα αποτελέσματα είναι πλέον ενθαρρυντικά για την περίπτωση των αιγοπροβάτων κυρίως λόγω του μεγάλου διαθέσιμου ανεκμετάλλετου δυναμικού τους.

Πίνακας 3: Ζωικό δυναμικό και αποδιδόμενη ισχύς ανά φάρμα

	Αιγοπρόβατα	Χοίροι	Βοοειδή	Πτηνοτροφία
Αριθμός ζώων	234.654	2.770	20.133	144.900
Φάρμες	486	33	155	13
Ενήλικα ζώα	153.933	1.817	13.207	95.054
Ενήλικα ζώα/ φάρμα	317	55	213	7312
Αποδιδόμενη ισχύς (kW)	5.374,01	32,08	851,45	402,36
Μέση αποδιδόμενη ισχύς ανά φάρμα (kW)	11,06	0,97	10,02	30,95

Ένα ιδιαίτερα ενδιαφέρον στοιχείο είναι επίσης η απόσταση μιας θεωρητικής «κυκλικής» μορφής φάρμας από τη μονάδα επεξεργασίας. Η περιοχή συλλογής των απαιτούμενων ποσοτήτων κοπριάς υπολογίζεται από την εξίσωση: #

$$D_{farm} = 2 / 3 \times R_{supply} \times f_{toruos} \quad (4)$$

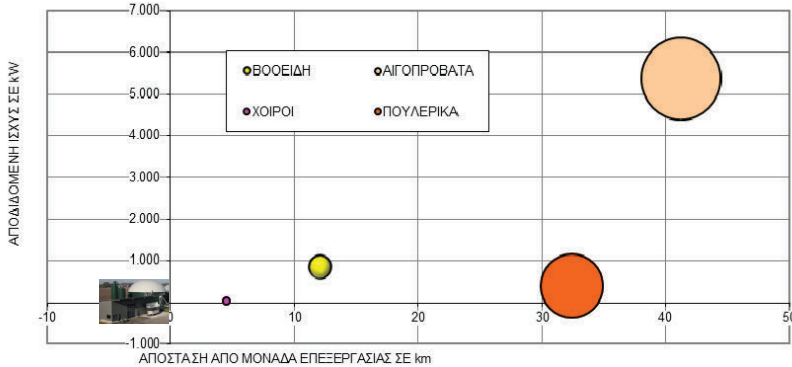
όπου f_{toruos} είναι ένας συντελεστής που συνδέει την απόσταση μεταξύ της φάρμας και του εργοστασίου (καθότι η διαδρομή δεν είναι ευθεία (Τυπική τιμή 1,6)) και R_{supply} η περιοχή συλλογής των απαιτούμενων ποσοτήτων κοπριάς που υπολογίζεται από την εξίσωση: #

$$R_{supply} = \sqrt{\frac{Nr_{ab}}{\pi \times \rho_{Nrab}}} \quad (5)$$

όπου Nr_{ab} είναι το ποσοστό των ενήλικων ζωντανών ανά φάρμα που απαιτούνται για να παράγουν ποσότητα κοπριάς (Q_m) και ρ_{Nrab} είναι η πυκνότητα των ζώων στην υπό εξέταση περιοχή (Nr_{ab}/ km^2).

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το μέγεθος μιας μέσης τυπικής φάρμας ζώων (αναλόγως με το είδος του ζώου), η απόσταση στην οποία βρίσκεται η φάρμα αυτή σε σχέση με ένα υποτιθέμενο κεντρικό εργοστάσιο αναερόβιας χώνευσης (θέση 0,0) (απόσταση διανομής), θεωρώντας ότι εκμεταλλευόμαστε μία συνολική έκταση ενδεικτικά της τάξης των

50km². Αυτό το στοιχείο είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην περίπτωση που θέλουμε να χωροθετήσουμε τις προτεινόμενες μονάδες σε συνδυασμό τόσο με την Α' ύλη- φάρμες- όσο και με τον τελικό καταναλωτή –βιοτεχνικές και βιομηχανικές δραστηριότητες-.



Εικόνα 7: Μέγεθος φάρμας και εκτιμηθείσα απόσταση από τη μονάδα ΑΧ

5.2. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΑΔΑΣ 1MW

Η προτεινόμενη κεντρική μονάδα επεξεργασίας αποβλήτων θα μπορούσε να λειτουργήσει εκμεταλλευόμενη είτε το δυναμικό των αιγοπροβάτων είτε ένα συνδυασμό αιγοπροβάτων και βοοειδών, βάσει της τυπικής τους διαθεσιμότητας με τα ακόλουθα οικονομικά στοιχεία:

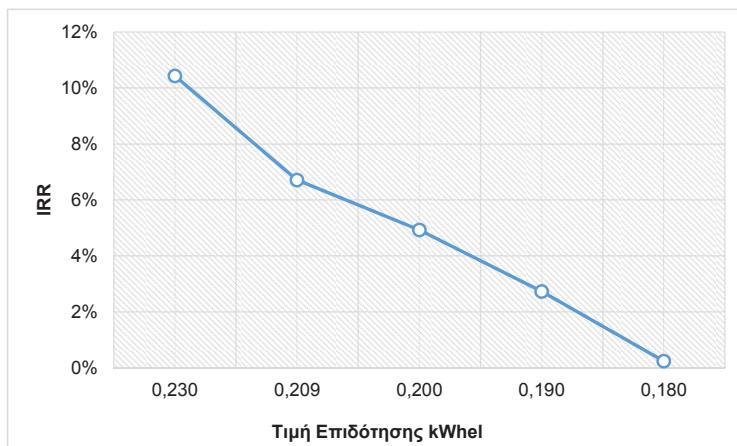
Πίνακας 4: Οικονομικές Παράμετροι προτεινόμενης μονάδας ΑΧ

Παράμετρος	Τιμές
Διάρκεια ζωής της επένδυσης	20 χρόνια
Επενδυτικό κεφάλαιο (συμπεριλαμβανομένου κεφαλαίου κίνησης)	5.600.000€
Κόστος Συντήρησης	11% επί του επενδυτικού
Κόστος Προσωπικού	Μέσος ετήσιος μισθός
5 άτομα - (1 δ/ντής, 1 μηχανολόγος, ηλεκτρολόγος, 3 εργάτες)	15.360€
Έξοδα αποθήκευσης πρώτων υλών	0 – δεν υπάρχουν
Κόστος αγοράς της Α' ύλης	2 €/tn
Κόστος μεταφοράς- φόρτωσης Α' ύλης	2 €/tn
Επιτόκιο προεξόφλησης	8%
Επιδότηση	0% και 40%
Φορολογία	30%
Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας €/MWh	230 (0% - επιδότηση) 209 (40% - επιδότηση)

Για την αξιολόγηση τη επένδυσης λαμβάνονται υπόψη δύο εναλλακτικά σενάρια:

- Ένα σενάριο όπου όλα τα κεφάλαια είναι ίδιας προέλευσης άρα και η συμβεβλημένη τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται στα 230 €/MWh_{el}
- Και ένα δεύτερο όπου λαμβάνεται μία επιδότηση (40%) άρα και η συμβεβλημένη τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται στα 209 €/MWh_{el}

Και στις δύο περιπτώσεις μη υπολογιζόμενων των αποσβέσεων η επένδυση είναι κερδοφόρα (NPV= ~ 8.800.000€ και IRR= ~ 10,4% (με τιμή πώλησης της Ηλεκτ. Ενεργ. 230 €/MWh) και στην περίπτωση NPV= ~ 6.500.000€ και IRR= ~ 5.5% (με τιμή πώλησης 209 €/MWh και κρατική επιδότηση 40%). Βέβαια σε περίπτωση πολύ χαμηλής συμβολαιοποιημένης τιμής, χωρίς τη χρήση σχετικών επιδοτήσεων, η επένδυση μπορεί να κριθεί απορριπτή (Εικόνα 8).



Εικόνα 8: Επίδραση συμβολαιοποιημένης τιμής kWhel στη βιωσιμότητα της επένδυσης

Πέραν των τεχνικο-οικονομικών ωφελειών πλεονέκτημα της προτεινομένης μονάδας είναι και τα περιβαλλοντολογικά οφέλη και πιο συγκεκριμένα οι εκπομπές CO₂. Αν θελήσουμε να συγκρίνουμε μια θερμική μονάδα παραγωγής ηλεκτρισμού με καύσιμο λιγνίτη και εγκατεστημένη ισχύ 1 MW με μια αντίστοιχη μονάδα επεξεργασίας μόνο ζωικών αποβλήτων θα διαπιστώσουμε ότι η λιγνιτική μονάδα στην διάρκεια του έτους θα εκπέμψει περίπου 866.000 τόνους CO₂ ενώ η μονάδα αναερόβιας χώνευσης 71.500 τόνους δηλαδή 91% λιγότερες εκπομπές CO₂, χωρίς να υπολογίσουμε τα οφέλη από την χρήση των «προϊόντων» της αναερόβιας διεργασίας ως εδαφοβελτιωτικά-λιπάσματα.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια αποτύπωσης της δυνατότητας ενεργειακής αξιοποίησης της εγχώριας κτηνοτροφικής βιομάζας. Για το σκοπό αυτό αφενός πραγματοποιείται μία καταρχήν ανασκόπηση του θεωρητικού δυναμικού ανά νομό στην Ελλάδα και αφετέρου εστιάζοντας στη Μακεδονία μελετάται η δυνατότητα δημιουργίας μίας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ισχύος 1MW τροφοδοτούμενη από τοπικές πρώτες ύλες.

Για την εν λόγω μονάδα προτείνεται η χωροθέτησή της στη Γ Ζώνη όπου παράλληλα συνυπάρχουν βιομηχανικές μονάδες αλλά και κτηνοτροφικές ώστε να υπάρξει έστω και σε θεωρητική βάση ταυτόχρονη προσφορά και ζήτηση της παραγόμενης ενέργειας. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι μία μέσης-μικρής δυναμικότητας μονάδα ΑΧ μπορεί κάλλιστα να υποστηριχθεί από το τοπικό δυναμικό με ενδεχόμενο περιθώριο αύξησης δυναμικότητας. Σημαντικοί βέβαια παράγοντες στη λήψη μιας τέτοιας απόφασης αποτελούν το υψηλό επενδυτικό κόστος της μονάδας, οι αποστάσεις από τις κτηνοτροφικές μονάδες, οι δυνατότητες του δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας καθώς επίσης και το οδικό δίκτυο της περιοχής.

Επίσης καθοριστικό ρόλο διαδραματίζει η συμβολαιοποιημένη τιμή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας η οποία σε πιθανή έκπτωση δύναται να καταστήσει την επένδυση μη βιώσιμη. Στα χαρακτηριστικά τα οποία αξίζει περαιτέρω να διευρυνθούν εντάσσεται η δυνατότητα αξιοποίησης και της αγροτικής βιομάζας, η δομημένη ένταξη (μέσω δικτύου συλλογής) συνόλου αντίστοιχων μονάδων, η τεχνική και οικονομική δραστηριότητα μονάδας συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] EUROSTAT, 2014, "Renewable energy statistics", available online at: http://epp.euostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Renewable_energy_statistic
- [2] [ΥΠΕΚΑ] Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, 2010, "Απόφαση για την επιδιωκόμενη αναλογία εγκατεστημένης ισχύος και την κατανομή της στο χρόνο μεταξύ των διαφόρων τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας", διαθέσιμο στον ιστότοπο: <http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=xlbf1qrdKMo%3d&tabid=285&language=eI-GR>
- [3] [ΚΑΠΕ] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, 2010, "Βιοαέριο στην Ελλάδα. Συνοπτική Έκθεση", διαθέσιμο στον ιστότοπο: http://www.big-east.eu/downloads/fr-reports/ANNEX%203-4_WP2_D2.2_Summary%20Report%20Greece-Greek.pdf
- [4] [ΚΑΠΕ] Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, 2010, "Εγχειρίδιο βιοαερίου", διαθέσιμο στον ιστότοπο: http://www.big-east.eu/downloads/IR-reports/ANNEX%202-41_WP4_D4.2_Handbook-Greece.pdf
- [5] Chen Y., 1983, "Kinetic analysis of anaerobic digestion of pig manure and its design implications", *Agricultural Wastes*, 8(2), pp. 65-81.
- [6] Γελεγένης, Ι., Αζαόπουλος, Π., Σαμαράκου Μ., και Τσιλιγγίρης Π., 2006, "Διαχείριση ενέργειας σε συστήματα αναερόβιας χώνευσης", *Ινστιτούτο Ηλιακής Τεχνικής- ΙΗΤ- Όγδοο Εθνικό Συνέδριο για τις Ήπιες Μορφές Ενέργειας (Θεσσαλονίκη 2006)*, διαθέσιμο στον ιστότοπο: <http://vergina.eng.auth.gr/IHT/Proc8th/bmz.htm>
- [7] ENER SUPPLY, 2012, "ENergy Efficiency and Renewables–SUPporting Policies in Local level for Energy", *HANDBOOK ON RENEWABLE ENERGY SOURCES*, available online at: <http://www.southeast-europe.net/document.cmt?id=249>
- [8] Ν.4254/2014 (ΦΕΚ 85Α/7.4.2014) «Μέτρα στήριξης και ανάπτυξης της Ελληνικής οικονομίας στο πλαίσιο εφαρμογής του ν. 4046/2012 και άλλες διατάξεις»
- [9] Skarlis, Str., Kondili, E. and Kaldellis, J.K., 2012 "Small-scale biodiesel production economics: a case study focus on Crete Island", *Journal of Cleaner Production*, 20(1), pp. 20-26.
- [10] Kapsali, M. Anagnostopoulos, J.S., and Kaldellis, J.K., 2012 "Wind powered pumped-hydro storage systems for remote islands: A complete sensitivity analysis based on economic perspectives", *Applied Energy*, 99(-), pp. 430-444.
- [11] Φορέας Διαχείρισης Λιμνών Βόλβης και Κορώνειας, 2011, "Απολογιστική έκθεση 2011", Γραφείο Διαχείρισης Φυσικού Περιβάλλοντος, ιστότοπος φορέα: www.foreaskv.gr

ΜΕΛΕΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΟΥ ΜΕ ΑΕΡΙΟ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Στέφανος Τσιακμάκης¹, Δημήτριος Μερτζής¹, Αθανάσιος Δημάρατος¹, Ζήσιμος
Τουμασάτος¹, Ζήσης Σαμαράς¹,

1.Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΑΠΘ
541 24 Θεσσαλονίκη, e-mail: zisis@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μη σταθερή τιμή των ορυκτών καυσίμων και κυρίως του πετρελαίου, σε συνδυασμό με την ανάγκη μείωσης των εκπομπών CO₂, επιτάσσουν την αξιοποίηση εναλλακτικών καυσίμων, ιδιαίτεως σε ευρέως διαδεδομένες τεχνολογίες με υψηλή απόδοση όπως οι μηχανές εσωτερικής καύσης ή κινητήρες. Σαν αποτέλεσμα, έχουν ενταθεί τα τελευταία χρόνια οι προσπάθειες διερεύνησης της χρήσης αερίου αεριοποίησης σε κινητήρες για συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού (συμπαραγωγή, ΣΗΘ-CHP). Στην περίπτωση που υπολειμματική βιομάζα από γεωργικές δραστηριότητες χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την παραγωγή τέτοιων βιοκαυσίμων, τότε η αποκεντρωμένη και μικρής κλίμακας ΣΗΘ από ανανεώσιμες πηγές μπορεί να εφαρμοστεί με μικρότερο κόστος από τις σημερινές πρακτικές. Θέμα-κλειδί για την επιτυχημένη σύνδεση αεριοποίησης και κινητήρα είναι η μελέτη και τροποποίηση του τελευταίου για βελτιστοποίηση της απόδοσης με αυτό το βιοκαύσιμο.

Η επίδραση του αερίου αεριοποίησης, (το οποίο χαρακτηρίζεται ως φτωχό καύσιμο λόγω χαμηλής θερμογόνου δύναμης), στη λειτουργία του κινητήρα (είτε αυτός είναι έναυσης με σπινθήρα είτε συμπιέσης) έχει ερευνηθεί εντατικά κατά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων αν και ορισμένα σημαντικά εμπόδια εξακολουθούν να υφίστανται.

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τα αποτελέσματα από τη χρήση του αερίου αεριοποίησης σε μονάδα αεριοποίησης (ρευστοποιημένης κλίνης) συζευγμένη με κινητήρα. Η μονάδα αναπτύχθηκε στα πλαίσια προγράμματος LIFE+ (ENV/GR/576/SMART-CHP) της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Στόχος ήταν η κατασκευή και επιδεικτική λειτουργία μιας κινητής μονάδας ΣΗΘ, η οποία αποτελείται από σύστημα αεριοποίησης γεωργικών υπολειμμάτων και κινητήρα έναυσης με σπινθήρα. Είναι μια μικρή σε μέγεθος μονάδα η οποία στοχεύει στο να προσφέρει μια πρακτική λύση στο πρόβλημα διαχείρισης της βιομάζας, όπως η μεταφορά της προς κεντρικές εγκαταστάσεις, η αποθήκευσή της και η προστασία από μεταβολές των καιρικών συνθηκών. Η έναυση του κινητήρα γίνεται με σπινθήρα (SI) και ο κινητήρας ήταν αρχικά σχεδιασμένος να λειτουργεί με προπάνιο (C₃H₈).

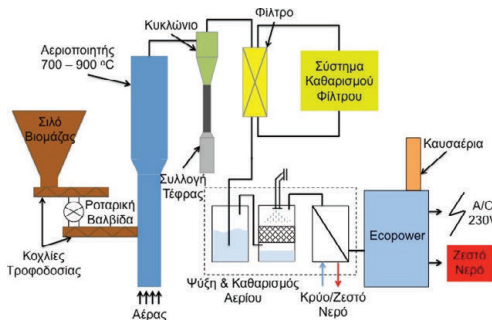
Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά μίγματα προπανίου-αερίου αεριοποίησης με κύριο στόχο να διερευνηθεί η επίδραση της μερικής αντικατάστασης του προπανίου με αέριο αεριοποίησης στην καύση και η μελέτη των αλλαγών των λειτουργικών χαρακτηριστικών του κινητήρα. Τρεις τύποι βιομάζας χρησιμοποιήθηκαν στην διάταξη του αεριοποιητή προς παραγωγή αερίου αεριοποίησης: πυρήνες ελιάς, πυρήνες ροδάκινου και πυρήνες σταφυλιών.

Λέξεις Κλειδιά: Αέριο αεριοποίησης, Συμπαραγωγή, Αεριοποίηση, Βιομάζα, Κινητήρας έναυσης με σπινθήρα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τρία διαφορετικά καύσιμα βιομάζας χρησιμοποιήθηκαν ως κύρια πρώτη ύλη. Πυρήνες από ελιά, ροδάκινο και σταφύλι και εξετάστηκαν όσον αφορά τη σύνθεση του αερίου αεριοποίησης και τη συμπαραγωγή. Πυρήνες ελιάς είναι το τελικό στερεό υπόλειμμα που προκύπτει από το ελαιόλαδο στο στάδιο της παραγωγής. Ο πυρήνας ροδάκινου είναι το στερεό υποπροϊόν της επεξεργασίας ροδάκινων σε αγροτικές βιομηχανίες (παραγωγή κομπόστας, χυμών) και παρουσιάζουν υψηλή θερμογόνο δύναμη λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε τέφρα και του περιεχομένου σε έλαιο που υπάρχει στον πυρήνα. Τέλος πυρήνες σταφυλιού ή στέμφυλα είναι τα άμεσα υποπροϊόντα της παραγωγής κρασιού. Οι πυρήνες σταφυλιών έχουν υψηλή θερμογόνο δύναμη παρά το σχετικά υψηλό περιεχόμενο τους σε τέφρα.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ



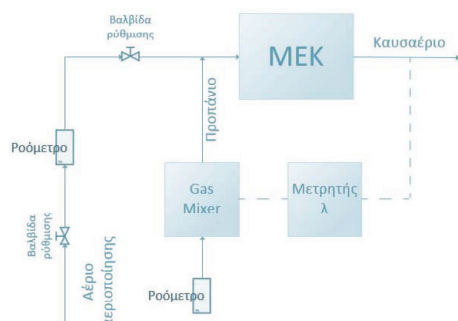
Εικόνα 1: Διάγραμμα ροής της μονάδας αεριοποίησης

Η μονάδα μικρής κλίμακας που έχει αναπτυχθεί, χρησιμοποιεί βιομάζα από γεωργικά υπολείμματα, για συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού. Η μονάδα αποτελείται από έναν αντιδραστήρα αεριοποίησης (ρευστοποιημένης κλίνης) σε συνδυασμό με ένα συμπαραγωγό ζεύγος. Η βιομάζα τροφοδοτείται μέσω ενός συστήματος τροφοδοσίας με κοχλίες. Ατμοσφαιρικός αέρας χρησιμοποιείται ως μέσο οξειδωσης και ρευστοαιώρησης. Το παραγόμενο αέριο αεριοποίησης υποβάλλεται σε καθαρισμό για μείωση των σωματιδίων (κυκλώνα και φίλτρο

αιθάλης) και πίσσας (καταϊονισμός και ψύξη) πριν από την τροφοδοσία στον κινητήρα. Η θερμότητα από τα καυσαέρια του κινητήρα, ανακτάται για τη θέρμανση νερού. Η λειτουργία ελέγχεται μέσω της άμεσης παρακολούθησης παροχών, πιέσεων και θερμοκρασιών σε διάφορα σημεία της μονάδας. Διάγραμμα ροής της διεργασίας της μονάδας και τα κύρια συστατικά που απεικονίζεται στην Εικόνα 1.

Η συμβατική λειτουργία του κινητήρα βασίζεται σε προπάνιο, που κινεί μια γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Ταυτόχρονα, η απορριπτόμενη θερμότητα του κινητήρα (από τα καυσαέρια του κινητήρα, το λιπαντικό και το ψυκτικό υγρό) ανακτάται για τη θέρμανση νερού. Για να λειτουργήσει ο κινητήρας με αέριο αεριοποίησης, το σύστημα εισαγωγής του κινητήρα τροποποιήθηκε κατάλληλα.

Το προπάνιο παρέμεινε το κύριο καύσιμο του κινητήρα και η κατανάλωσή του ελέγχονταν έμμεσα από την παροχή αερίου αεριοποίησης αξιοποιώντας υπάρχοντα συστήματα ελέγχου του κινητήρα. Ο κινητήρας λειτουργεί σε στοιχειομετρική αναλογία αέρα-καυσίμου, που ελέγχεται μέσω ενός αισθητήρα O_2 κλειστού βρόχου στα καυσαέρια. Η ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου καθορίζει την παροχή του προπανίου ώστε να διατηρείται η στοιχειομετρία. Η μείωση παροχής προπανίου καθορίζεται από τη θερμική ισχύ του αερίου αεριοποίησης που εισάγεται στον κινητήρα μαζί με αυτό. Υψηλότερη θερμική ισχύς (μάζα x θερμογόνος δύναμη)



Εικόνα 2: Απεικόνιση μηχανισμού τροφοδοσίας αερίου αεριοποίησης στον κινητήρα

του αερίου αεριοποίησης, οδηγεί σε χαμηλότερη κατανάλωση προπτανίου. Ο έλεγχος της κατανάλωσης προπτανίου γίνεται με ροόμετρο διαφράγματος τύπου NP 12/110 G4 της εταιρείας Dresser, με μέγιστο σφάλμα μέτρησης μικρότερο του 2%.

3. ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

3.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

Δύο αναλυτές αερίων χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της σύνθεσης του αερίου αεριοποίησης. Αρχικά, ένας χρωματογράφος αερίων (GC) τύπου 6890N Agilent για τη λεπτομερή ανάλυση των συστατικών του αερίου αεριοποίησης (H_2 , CO , CO_2 , O_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4). Ο χρωματογράφος είναι εξοπλισμένος με δύο τριχοειδείς στήλες, έναν ανιχνευτή ιονισμού φλόγας (FID) και έναν ανιχνευτή θερμικής αγωγιμότητας (TCD). Το αέριο δείγμα αφού ληφθεί από ειδική διαμόρφωση στην διάταξη του αεριοποιητή, αποθηκεύεται προσωρινά σε σάκους δειγματοληψίας αερίων πριν χρησιμοποιηθεί στον χρωματογράφο. Παράλληλα χρησιμοποιήθηκε φορητή συσκευή ανάλυσης αερίων για την ανάλυση των σημαντικότερων αερίων (H_2 , N_2 , O_2 , CH_4 , CO_2). Αυτός ο φορητός χρωματογράφος είναι τύπου Varian CP4900, επίσης εξοπλισμένος με δύο τριχοειδείς στήλες. Αργού (Ar) και Ηλίου (He) που χρησιμοποιούνται ως αέρια-φορείς, ενώ η περιεκτικότητα σε CO στο αέριο αεριοποίησης προσδιορίζεται υπολογιστικά [1].

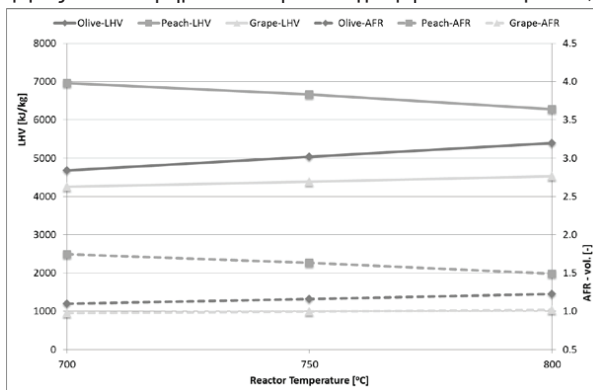
3.2. ΠΙΕΣΗ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

Η μέτρηση της πίεσης εντός του κυλίνδρου πραγματοποιείται με τη χρήση ειδικού σπινθηριστή («μπουζί») τύπου Kistler-6113B, με ενσωματωμένο πιεζοκρύσταλλο, με μέγιστη μετρούμενη πίεση 200 bar. Το σήμα από τον αισθητήρα πίεσης κατά τη μέτρηση τροφοδοτείται σε έναν ενισχυτή φορτίου τύπου Kistler-5011B. Για το χρόνο (δηλαδή της γωνίας στροφάλου) αναφοράς, αξιοποιείται το υπάρχον σήμα από το αισθητήρα θέσης εκκεντροφόρου του κινητήρα (που χρησιμοποιείται για τον χρονισμό του σπινθήρα).

Δεδομένου ότι ο κινητήρας δε διαθέτει αισθητήρα στροφαλοφόρου άξονα, τόσο η στροφές του κινητήρα όσο και η σχετική θέση εμβόλου-βαλβίδας, καθορίζονται με αναφορά στο σήμα από τον αισθητήρα του εκκεντροφόρου. Και τα δύο σήματα (πίεση του κυλίνδρου και παλμό χρονισμού του εκκεντροφόρου) προβάλλονται συνεχώς σε ένα παλμογράφο τύπου Owon PDS7102T, επιτρέποντας την άμεση επιθεώρηση των πιέσεων του κυλίνδρου για την επιβεβαίωση της κανονικής λειτουργίας του κινητήρα. Για την καταγραφή των δεδομένων, χρησιμοποιείται αναλογικό-ψηφιακή κάρτα συλλογής δεδομένων, τύπου NI USB 6341 και ελέγχεται μέσω εφαρμογής που αναπτύχθηκε από το ΕΕΘ σε περιβάλλον LabView.

3.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Το αέριο αεριοποίησης, αφού καθαρισθεί και εφόσον έχει σταθεροποιηθεί η ροή μάζας και σύνθεσή του, εισάγεται στον κινητήρα. Η ταχύτητα του κινητήρα ρυθμίζεται μέσω του συστήματος ελέγχου της ΣΗΘ, το οποίο επιτρέπει επίσης την καταγραφή των λειτουργικών δεδομένων της εγκατάστασης (ηλεκτρική και θερμική ισχύς, παροχές προπτανίου-αέρα, θερμοκρασία του κινητήρα και των καυσαερίων, τιμές του αισθητήρα O_2 και ταχύτητα



Εικόνα 3: Κατώτερη θερμογόνο δύναμη και στοιχειομετρικός λόγος συναρτήσεως θερμοκρασίας αεριοποιητή για κάθε τύπο βιομάζας

περιστροφής του κινητήρα). Οι δοκιμές πραγματοποιούνται σε όλο το εύρος των στροφών του κινητήρα (1200 – 3400 σ.α.λ.).

Για να διερευνηθεί η απόδοση του κινητήρα κάτω από διαφορετικές αναλογίες ανάμειξης του αερίου αεριοποίησης με το προπάνιο, το κλάσμα όγκου αερίου αεριοποίησης στο καύσιμο μίγμα αυξήθηκε βαθμιαία από 10 l/min έως το μέγιστο δυνατό με γνώμονα την ευσταθή λειτουργία του. Όταν η λειτουργία του κινητήρα σταθεροποιείται σε επιθυμητές συνθήκες, τα δεδομένα πίεσης καταγράφονται για 100 διαδοχικούς κύκλους. Σημειώνεται ότι ως κύκλος ορίζεται το διάστημα από το άνοιγμα της βαλβίδας εισαγωγής έως την ολοκλήρωση της εξαγωγής καυσαερίων σε μίρες. Ταυτόχρονα, η παροχή προπτανίου προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας μετρητή κατανάλωσης προπτανίου.

Τα δεδομένα λειτουργίας της εγκατάστασης καταγράφονται σε τακτά χρονικά διαστήματα και η επεξεργασία τους ταξινομείται ανάλογα με την πρώτη ύλη της βιομάζας που χρησιμοποιείται και τις παραμέτρους αεριοποίησης (θερμοκρασία, αναλογία αέρα-βιομάζας στον αεριοποιητή). Τα δεδομένα πίεσης του κυλίνδρου, που καταγράφονται με δειγματοληπτική συχνότητα που ισοδυναμεί με βήμα 0,5 μίρα γωνίας στροφάλου, υποβάλλονται σε επεξεργασία προκειμένου να ληφθούν τα αντίστοιχα προφίλ ρυθμού έκλυσης θερμότητας.

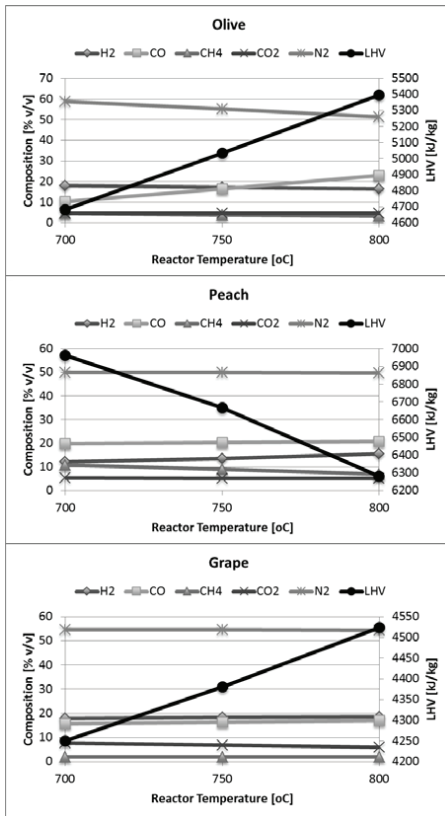
4. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΣΥΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ

Πίνακας 1: Επιλεγέντες συστάσεις αερίου αεριοποίησης στις βέλτιστες θερμοκρασίες αεριοποιητή για κάθε βιομάζα				
Επιλεγέντες συστάσεις				
		Ελιά 800°C	Ροδάκινο 700°C	Σταφύλι 800°C
H ₂	[% v/v]	16.58	12.14	18.63
CO	[% v/v]	23.06	19.96	16.94
H ₄	[% v/v]	3.41	10.72	2.02
CO ₂	[% v/v]	4.66	5.27	6.02
N ₂	[% v/v]	52.29	51.91	56.39
LHV	[MJ/kg]	5.40	6.96	4.52
AFR _{st}	[-]	1.23	1.74	1.02

Για κάθε καύσιμο βιομάζας, επιλέγεται ένα σημείο λειτουργίας του αντιδραστήρα (Πίνακας 1), δηλαδή γίνεται μελέτη λειτουργίας του κινητήρα στο εκάστοτε επιλεχθέν σημείο. Η επιλογή γίνεται με βάση την τιμή της θερμογόνου δύναμης του αερίου αεριοποίησης (πρακτικά το σημείο με υψηλότερο LHV για κάθε βιομάζα είναι αυτό που θα επιλεχθεί), που είναι μία πρώτη ένδειξη καλύτερης απόδοσης του κινητήρα. Έτσι, για τους πυρήνες ελιάς και σταφυλιού η επιλεγμένη θερμοκρασία του αντιδραστήρα είναι 800°C, ενώ για τους πυρήνες ροδάκινων το αντίστοιχο σημείο λειτουργίας είναι 700°C.

Αναλυτικότερα η θερμογόνος δύναμη παρουσιάζει αυξητική τάση με τη θερμοκρασία λειτουργίας αεριοποίησης για τους πυρήνες ελιάς και σταφυλιού ενώ υπάρχει μείωση για τους πυρήνες ροδάκινου (Εικόνα 4). Στην περίπτωση των πυρήνων ελιάς, είναι η δραστική αύξηση της περιεκτικότητας σε CO (υπερδιπλασιάστηκαν από 700°C έως 800°C) και η προκύπτουσα μείωση της συγκέντρωσης των αδρανών αερίων (N₂ και CO₂) η οποία προκαλεί την αύξηση της θερμογόνου δύναμης κατά 15% από 700°C έως 800°C. Όσον αφορά το αέριο αεριοποίησης που παράγεται από πυρήνες σταφυλιών, παρατηρείται μέτρια αύξηση της τιμής της θερμογόνου δύναμης κατά 6 % από 700°C έως 800°C και μπορεί να αποδοθεί στην ελαφρά αύξηση του H₂ και CO, σε συνδυασμό με τη σταθερή συγκέντρωση



Εικόνα 4: Σύσταση αερίου αεριοποίησης και κατώτερη θερμογόνος δύναμη συναρτήσει θερμοκρασίας αεριοποιητή για κάθε βιομάζα

διαδοχικών κύκλων κινητήρα, που έχουν ελαφρώς εξομαλυνθεί [2]. Ο συνολικός ρυθμός έκλυσης θερμότητας προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο, χρησιμοποιώντας την σχέση καθαρής έκλυσης θερμότητας [3]:

$$\frac{dQ_n}{dt} = \frac{\gamma}{\gamma-1} p \frac{dV}{dt} + \frac{1}{\gamma-1} V \frac{dp}{dt}$$

Σε συνδυασμό με το μοντέλο συσχέτισης της μεταφοράς θερμότητας του Hohenberg [4], υποθέτοντας μέσες τιμές συνθηκών ανάμιξης που βασίζονται στην προσέγγιση ενιαίας ζώνης. Για το υπολογισμό του λόγου θερμοχωρητικότητας γ , λήφθηκε υπόψη ο συσχετισμός κατά Egnell [5]. Αναλυτικός υπολογισμός υπάρχει στη βιβλιογραφία [3],[6].

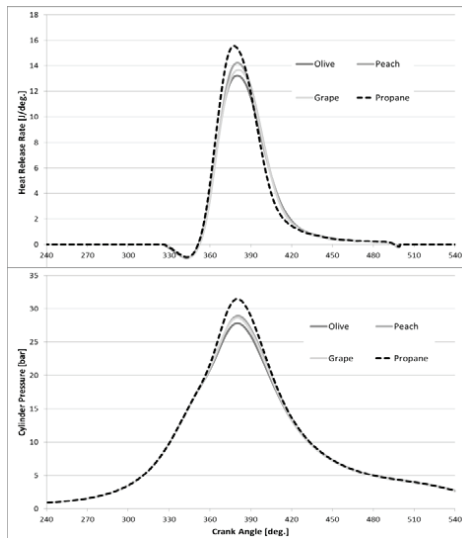
4.2.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Το σημείο λειτουργίας στο οποίο έγινε η σύγκριση ορίστηκε στις 2800rpm στροφές λειτουργίας του κινητήρα και το κλάσμα μάζας του αερίου αεριοποίησης στο μίγμα να ισούται

CH_4 (το άλλο εύφλεκτο συστατικό). Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση των πυρήνων ροδάκινου, μειώνεται η συγκέντρωση CH_4 και η συγκέντρωση H_2 αυξάνει με τη θερμοκρασία αντιδραστήρα του αεριοποιητή, ενώ η συγκέντρωση CO παραμένει πρακτικά σταθερή, ένας συνδυασμός που οδηγεί σε χαμηλότερη τιμή θερμογόνου δύναμης κατά 10 % από 700°C έως 800°C.

4.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΕΡΙΟΥ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

Η απόδοση του κινητήρα επηρεάζεται άμεσα τόσο από το είδος βιομάζας όσο και από το κλάσμα μάζας του αερίου αεριοποίησης που συμμετέχει στο συνολικό αέριο καύσιμο μίγμα. Αυτές οι δύο παράμετροι λαμβάνονται υπόψη σε αυτή την ενότητα για τη μελέτη της επίδρασής τους στη λειτουργία του κινητήρα. Αυτά που εξετάζονται είναι η πίεση κυλίνδρου και η συνολική έκλυση θερμότητας κατά την καύση. Σημειώνεται ότι κάθε καμπύλη πίεσης που παρουσιάζεται είναι ο μέσος όρος 100



Εικόνα 5: Καμπύλη πίεσης και έκλυσης θερμότητας στα 2800 rpm με 55% αέριο αεριοποίησης για κάθε βιομάζα

με 55 %, ενώ η αμιγή λειτουργία με προπάνιο ήταν η κατάσταση αναφοράς. Στη συνέχεια παρουσιάζονται η πίεση του κυλίνδρου και ο αντίστοιχος ρυθμός έκλυσης θερμότητας συναρτήσει της γωνίας στροφάλου για τα τρία διαφορετικά είδη βιομάζας (Εικόνα 6,7).

Όπως φαίνεται, η εισαγωγή αερίου αεριοποίησης στο καύσιμο μίγμα και εν συνεχεία η αντικατάσταση μέρους του εισαγόμενου προπανίου, οδηγεί σε χαμηλότερη μέγιστη πίεση στον κύλινδρο, καθώς επίσης και σε χαμηλότερη έκλυση θερμότητας. Αυτό οφείλεται στη χαμηλή, συγκριτικά με το αντικαθιστάμενο προπάνιο, θερμογόνο δύναμη του αερίου αεριοποίησης, όπως ήδη αναφέρθηκε στον Πίνακα 1 για τα τρία είδη βιομάζας. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν σχετικά με τη θερμογόνο δύναμη των μιγμάτων αερίου αεριοποίησης προπανίου φαίνονται στον κάτω πίνακα (Πίνακας 2). Είναι εμφανές ότι και τα τρία μίγματα έχουν παρόμοιες τιμές θερμογόνου δύναμης, και περίπου το ήμισυ αυτής του προπανίου.

Πίνακας 2: Δεδομένα λειτουργίας κινητήρα για κάθε καύσιμο στις 2800 rpm και 55% αέριο αεριοποίησης				
	Προπάνιο	Ελιά	Ροδάκινο	Σταφύλι
LHV αερίου (MJ/kg)	-	5.40	6.96	4.52
LHV μίγματος (MJ/kg)	46.3	24.43	23.73	24.19
Εξερχόμενη ηλ. ισχύς (kW _{el})	3.9	3.55	3.68	3.56
IMEP (bar)	7.61	7.01	7.3	7.04
Ηλ. βαθμός απόδοσης	23%	23.2%	26.2%	23.4%
Κατανάλωση καυσίμου BSFC (g/kWh)	290.73	546.64	498.28	546.61

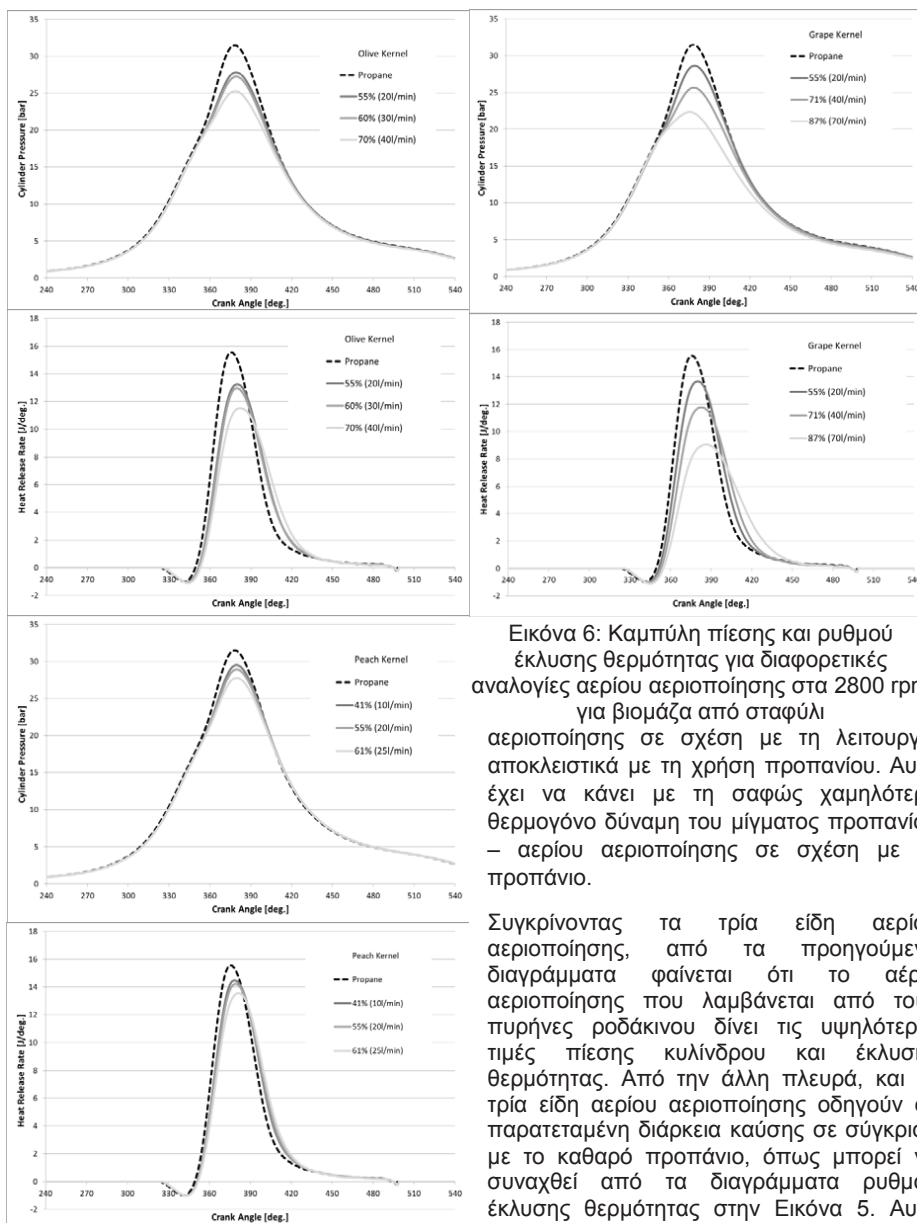
Ο Πίνακας 2 δείχνει επίσης την πτώση ισχύος του κινητήρα, όταν σε αυτόν παρέχεται αέριο αεριοποίησης, σε σύγκριση με τη συμβατική λειτουργία με προπάνιο, όπως υποδεικνύεται τόσο από την εξερχόμενη ηλεκτρική ισχύ όσο και από την IMEP του κινητήρα. Σημειώνεται πώς η IMEP και COV_{IMEP} ορίζεται ως:

$$IMEP = \frac{W_i}{V_d} = \frac{\int p dV}{V_d} \text{ και } COV_{IMEP} = \frac{\sigma_{IMEP}}{IMEP}$$

Όπου: V_d όγκος εμβολισμού σε [m³], W_i το ενδεικνύμενο έργο, σ_{IMEP} η τυπική απόκλιση των IMEP για το σύνολο των μετρήσεων, \overline{IMEP} η μέση τιμή των υπολογισμένων τιμών IMEP του συνόλου των μετρήσεων

Η πτώση της ισχύος είναι 9% για το αέριο αεριοποίησης της ελιάς και πυρήνων από σταφύλι ενώ κυμαίνεται στο 6% για το αέριο αεριοποίησης από πυρήνες ροδάκινου. Οι τιμές αυτές είναι σύμφωνες με αυτές που βρέθηκαν στη βιβλιογραφία [7], αν και χαμηλότερες αποδόσεις αμιγώς με αέριο αεριοποίησης έχουν καταγραφεί [8].

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι το αέριο αεριοποίησης αναμιγνύεται με προπάνιο, έτσι μετριάζεται η πτώση ηλεκτρικής ισχύος. Οι χαμηλότερες πιέσεις κυλίνδρου και έκλυση θερμότητας είναι ο λόγος για την εμφάνιση πτώσης ισχύος καθώς και μειωμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, στον προηγούμενο πίνακα, η συνολική ηλεκτρική απόδοση (που ορίζεται ως η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται διαιρεμένη προς τη συνολική ενέργεια παρεχόμενη στον κινητήρα δηλαδή την θερμογόνο δύναμη επί την μάζα του μίγματος) του ζεύγους κινητήρα-γεννήτρια είναι δεδομένη, όπου μια αξιοσημείωτη διαφορά παρατηρείται μόνο για την περίπτωση χρήσης αερίου αεριοποίησης από πυρήνες ροδάκινου. Φαίνεται ότι η υψηλότερη συγκέντρωση σε μεθάνιο (Πίνακας 1), ενισχύει την εκμετάλλευση της χημικής ενέργειας του καυσίμου. Αυτό που αναμένεται και φυσικά παρατηρούμε εν τέλει είναι ότι η ειδική κατανάλωση καυσίμου (BSFC) είναι σαφώς μεγαλύτερη κατά τη λειτουργία με αέριο



Εικόνα 6: Καμπύλη πίεσης και ρυθμού έκλυσης θερμότητας για διαφορετικές αναλογίες αερίου αεριοποίησης στα 2800 rpm για βιομάζα από σταφύλι

αεριοποίησης σε σχέση με τη λειτουργία αποκλειστικά με τη χρήση προπανίου. Αυτό έχει να κάνει με τη σαφώς χαμηλότερη θερμογόνο δύναμη του μίγματος προπανίου – αερίου αεριοποίησης σε σχέση με το προπάνιο.

Συγκρίνοντας τα τρία είδη αερίου αεριοποίησης, από τα προηγούμενα διαγράμματα φαίνεται ότι το αέριο αεριοποίησης που λαμβάνεται από τους πυρήνες ροδάκινου δίνει τις υψηλότερες τιμές πίεσης κυλίνδρου και έκλυσης θερμότητας. Από την άλλη πλευρά, και τα τρία είδη αερίου αεριοποίησης οδηγούν σε παρατεταμένη διάρκεια καύσης σε σύγκριση με το καθαρό προπάνιο, όπως μπορεί να συναχθεί από τα διαγράμματα ρυθμού έκλυσης θερμότητας στην Εικόνα 5. Αυτό δείχνει βραδύτερη διάδοση φλόγας στο θάλαμο καύσης, αν και η παρουσία του υδρογόνου σε σημαντικές ποσότητες, ειδικά στην περίπτωση του αερίου αεριοποίησης προερχόμενο από πυρήνες σταφυλιών, θα έπρεπε να αυξήσει την ταχύτητα της φλόγας [9]. Ωστόσο, η υψηλή συγκέντρωση αδρανών αερίων (N_2 και CO_2) στα παραγόμενο αέριο αεριοποίησης από τα τρία είδη βιομάζας λειτουργεί εξισορροπητικά με αποτέλεσμα την πιο αργή οξειδωση του καυσίμου.

Εικόνα 7: Καμπύλη πίεσης και ρυθμού έκλυσης θερμότητας για διαφορετικές αναλογίες αερίου αεριοποίησης στα 2800 rpm για βιομάζα ελιάς και ροδάκινο (πάνω και κάτω)

έπρεπε να αυξήσει την ταχύτητα της φλόγας [9]. Ωστόσο, η υψηλή συγκέντρωση αδρανών αερίων (N_2 και CO_2) στα παραγόμενο αέριο αεριοποίησης από τα τρία είδη βιομάζας λειτουργεί εξισορροπητικά με αποτέλεσμα την πιο αργή οξειδωση του καυσίμου.

Σε οποιαδήποτε περίπτωση, θα πρέπει να επισημανθεί ότι ο χρονισμός ανάφλεξης, βελτιστοποιημένος για λειτουργία με προπάνιο, παρέμεινε σταθερός σε όλες τις λειτουργίες. Μεταβολή του χρονισμού ανάφλεξης θα μπορούσε να περιορίσει τις επιπτώσεις της αργής (σε σύγκριση με το προπάνιο) οξείδωσης του αερίου αεριοποίησης και να περιορίσει τη πτώση της ισχύος του κινητήρα. Ένας άλλος τρόπος για να αντισταθμιστεί η απώλεια ισχύος είναι να αυξηθεί η σχέση συμπίεσης του κινητήρα [10], η οποία είναι εφικτή λόγω του υψηλού αριθμού οκτανίων του αερίου αεριοποίησης [11], που είναι πολύ υψηλότερος από τον αντίστοιχο του προπανίου.

4.2.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΚΛΑΣΜΑΤΟΣ ΜΑΖΑΣ ΑΕΡΙΟΥ ΑΕΡΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΟ ΚΑΥΣΙΜΟ ΜΙΓΜΑ

Πίνακας 3: Δεδομένα λειτουργίας κινητήρα για τα τρία καύσιμα βιομάζας σε διαφορετικές αναλογίες στα 2800 rpm						
Ποσοστό αερίου αεριοποίησης (% v/v)	LHV του μίγματος (Mj/kg)	Ηλεκτρική εξερχόμενη ισχύς (kW)	IMEP (bar)	COV _{IMEP} %	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (%)	Ειδική κατανάλωση BSFC (g/kWh)
Ελιά -2800rpm						
0	46.30	3.90	7.61	-	23.0	290.73
55	24.43	3.55	7.01	3.99	23.2	546.64
60	21.83	3.47	6.8	-	21.9	646.94
70	17.68	3.21	6.48	-	22.0	796.72
Ροδάκινο -2800rpm						
0	46.30	3.90	7.61	-	23.0	290.73
41	30.18	3.80	7.40	-	27.9	367.99
55	23.73	3.68	7.30	3.83	16.2	498.28
61	22.42	3.67	7.17	-	27.1	509.69
Σταφύλι -2800rpm						
0	46.30	3.90	7.61	-	23.0	290.73
55	24.19	3.56	7.04	4.8	23.4	546.61
71	16.73	3.22	6.52	-	23.7	780.16
87	10.11	2.67	5.48	-	22.8	1340.03

Τρεις παροχές αερίου αεριοποίησης δοκιμάστηκαν για κάθε καύσιμη ύλη βιομάζας, σε τρεις ταχύτητες του κινητήρα, 2400rpm, 2800rpm και 3400rpm. Εδώ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επίδρασης του κλάσματος μάζας του αερίου αεριοποίησης στο καύσιμο μίγμα, στη λειτουργία του κινητήρα. Για λόγους συνοχής με τα προηγούμενα, παρατίθενται αναλυτικά τα αποτελέσματα μόνο για τις 2800rpm και συγκρίνονται με τη λειτουργία μόνο με προπάνιο.

Μια γενική επισκόπηση των επιδόσεων του κινητήρα παρέχεται για όλα τα σημεία λειτουργίας (στροφές του κινητήρα και αναλογία ανάμειξης κάθε αερίου αεριοποίησης στο προπάνιο) στον Πίνακα 3 για αέριο αεριοποίησης προερχόμενο από ελιά, ροδάκινο και σταφύλι αντίστοιχα. Ειδικά για την BSFC, η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη προς τον βαθμό απόδοσης για ένα δοθέν καύσιμο και για σταθερή θερμογόνου δύναμη, θα πρέπει να επισημανθεί ότι μια άμεση ποσοτική σύγκριση των τιμών μεταξύ των διαφόρων εύφλεκτων μειγμάτων δεν είναι εύκολα εφικτή, λόγω της διαφορετικής θερμογόνου δύναμης σε κάθε καύσιμο. Παραπάνω παρουσιάζονται τα ανωτέρω αποτελέσματα για τις περιπτώσεις του αερίου αεριοποίησης από πυρήνες ελιάς, ροδάκινου και σταφυλιών, αντίστοιχα. Επίσης παρουσιάζονται τα διαγράμματα πίεσης κυλίνδρου για τις τρεις παροχές του αερίου και συνολικής έκλυσης θερμότητας. Παρατηρείται ότι η αύξηση της περιεκτικότητας του καύσιμου μίγματος σε αέριο αεριοποίησης οδηγεί σε χαμηλότερες μέγιστες πιέσεις καύσης, με το

φαινόμενο να είναι πιο έντονο για το αέριο αεριοποίησης από σταφύλι. Ο ρυθμός έκλυσης θερμότητας λαμβάνει χαμηλότερες τιμές, καθώς η παροχή σε αέριο αεριοποίησης στον κινητήρα αυξάνεται, λόγω της χαμηλότερης θερμογόνου δύναμης του καύσιμου μίγματος. Επιπλέον, η επιβράδυνση της διάδοσης της φλόγας στο θάλαμο καύσης αποκαλύπτεται από την διεύρυνση του πλάτους του ρυθμού έκλυσης θερμότητας. Και πάλι, το φαινόμενο είναι πιο έντονο για το αέριο προερχόμενο από σταφύλι και αποδίδεται στην υψηλή συγκέντρωση των αδρανών αερίων (N_2 και CO_2 , Πίνακας 1), με αποτέλεσμα να επιβραδύνεται η συνολική διαδικασία οξειδωσης [8].

Ανεξάρτητα από το είδος της βιομάζας και τις στροφές λειτουργίας του κινητήρα, αντίστοιχη τάση μείωσης εμφανίζεται με την αύξηση του κλάσματος όγκου αερίου αεριοποίησης στο καύσιμο μίγμα, τόσο για τη μέγιστη πίεση και τη θερμοκρασία. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να αποδοθεί στη μείωση του ενεργειακού περιεχομένου του μίγματος (LHV) καθώς αυξάνεται η παροχή του αερίου αεριοποίησης. Η μείωση της μέγιστης θερμοκρασίας καύσης (η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια πρώτη ένδειξη του επιπέδου θερμοκρασίας στον κύλινδρο), όταν περισσότερο αέριο αεριοποίησης (και κατά συνέπεια λιγότερο προπάνιο) παρέχεται στον κινητήρα, συνεπάγεται μείωση στο σχηματισμό NO_x , αν και το τελευταίο στην πραγματικότητα εξαρτάται από την (τοπική) θερμοκρασία των καυσαερίων [3]. Η διαπίστωση αυτή επιβεβαιώνεται και πειραματικά [12] και θεωρητικά [13]. Όπως και προηγουμένως, το φαινόμενο είναι πιο έντονο για το αέριο αεριοποίησης προερχόμενο από σταφύλι, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης των αδρανών αερίων όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τα οποία απορροφούν θερμότητα και χαμηλώνουν την θερμοκρασία (κάτι που στους σύγχρονους κινητήρες επιτυγχάνεται μέσω ανακυκλοφορίας καυσαερίων στο θάλαμο καύσης ή αλλιώς EGR). Τέλος όπως φαίνεται από τον Πίνακα 3 η ανάλυση της κυκλικής διασποράς δίνει τιμές μικρότερες του 10% COV_{IMEP} πράγμα που υποδηλώνει λειτουργία χωρίς αστοχία έναυσης [3], [14].

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα δημοσίευση παρουσιάστηκε μια πειραματική μελέτη, με στόχο τη διερεύνηση της καύσης και της λειτουργικής συμπεριφοράς κινητήρα επιβαλλομένης ανάφλεξης, ο οποίος τροφοδοτείται με αέριο αεριοποίησης προερχόμενο από τρία ειδή βιομάζας. Ο κινητήρας, τροφοδοτήθηκε με μίγματα αερίου αεριοποίησης και προπανίου σε διάφορες στροφές λειτουργίας της μηχανής και αναλογίες ανάμιξης. Τα κύρια πορίσματα της μελέτης μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

- Αέριο αεριοποίησης προερχόμενο από κάθε βιομάζα που μελετήθηκε έχει πολύ χαμηλότερη θερμογόνο δύναμη σε σχέση με το προπάνιο (το μέτρο σύγκρισης στην παρούσα δημοσίευση), λόγω της παρουσίας αδρανών αερίων (N_2 και CO_2).
- Οι πιέσεις στον κύλινδρο και οι ρυθμοί έκλυσης θερμότητας που παρατηρούνται για κάθε αέριο αεριοποίησης, είναι χαμηλότερες σε σύγκριση με τη συμβατική λειτουργία προπανίου. Η πτώση ισχύος αποδίδεται στη χαμηλότερη θερμογόνο δύναμη του αερίου αεριοποίησης. Ωστόσο, η μείωση της ισχύος εξόδου δεν υπερβαίνει το 10 % για τα μίγματα 55 % w/w αέριο και 45 % w/w προπάνιο.
- Τα προφίλ ρυθμού έκλυσης θερμότητας είναι ευρύτερα για κάθε αέριο, σε σύγκριση με τη λειτουργία με «καθαρό» προπάνιο, το οποίο αιτιολογείται από πιο αργή διάδοση της φλόγας στο θάλαμο καύσης. Αύξηση του κλάσματος μάζας αερίου αεριοποίησης στο καύσιμο μίγμα οδηγεί σε μεγαλύτερες μειώσεις της πίεσης στον κύλινδρο και χαμηλής έκλυσης θερμότητας, με ακόλουθη μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ανάλυση των καυσίμων, πραγματοποιήθηκε στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ) / Ινστιτούτο Τεχνολογίας Στερεών Καυσίμων & Εφαρμογές (ΙΤΕΣΚ),

ενώ η ανάλυση τέφρας διεξήχθη στο Ινστιτούτο Γεωλογικών & Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Margaritis N, Grammelis P, Vera D, Jurado F. "Assessment of operational results of a downdraft biomass gasifier coupled with a gas engine". Proc – Soc Behav Sci. 2012, 8:857–67.
- [2] Rakopoulos CD, Antonopoulos KA, Rakopoulos DC. "Experimental heat release analysis and emissions of a HSDI diesel engine fueled with ethanol–diesel fuel blends". s.l. : Energy, 2007. 32:1791–808.
- [3] Heywood, John B. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York : McGraw-Hill Book Company, 1988. ISBN 0-07-028637-X.
- [4] GF, Hohenberg. "Advanced approaches for heat transfer calculations". s.l. : SAE , 1979. 790825.
- [5] R., Egnell. "Combustion diagnostics by means of multizone heat release analysis and NO calculation". s.l. : SAE, 1998. 981424.
- [6] Kirkpatrick, Colin R. Ferguson & Allan T. Internal Combustion Engines: Applied Thermosciences. s.l. : WILEY, 2001. ISBN 978-0-471-35617-2.
- [7] Shashikantha, Parikh PP. "Spark ignition producer gas engine and dedicated compressed natural gas engine – technology development and experimental performance optimisation". s.l. : SAE, 1999. no. 1999-01-3515.
- [8] Sridhar G, Dasappa S, Sridhar HV, Paul PJ, Rajan NKS. "Gaseous emissions using producer gas as fuel in reciprocating engines". s.l. : SAE, 2005. 2005-01-1732.
- [9] Liu C, Yan B, Chen G, Bai XS. "Structures and burning velocity of biomass derived gas flames". s.l. : Int J Hydrogen Energy, 2010. 35:542–55.
- [10] Sridhar G, Sridhar HV, Dasappa S, Paul PJ, Rajan NKS, Mukunda HS. "Development of producer gas engines". Eng : Proc Inst Mech Eng, Part D. J Autom, 2005. 219:423–38..
- [11] ZN, Aung. "Modification of diesel engine to producer gas engine". s.l. : J Ilm Tek Energi, 2008. 1:29–41.
- [12] Papagiannakis RG, Rakopoulos CD, Hountalas DT, Giakoumis EG. "Study of the performance and exhaust emissions of a spark-ignited engine operating on syngas fuel". s.l. : Int J Altern Propul, 2007. 1:190–215.
- [13] Rakopoulos CD, Michos CN. "Development and validation of a multi-zone and nitric oxide formation in syngas fueled spark ignition engine". s.l. : Energy Convers Manage, 2008. 49:2924–38.
- [14] The Fast Burn with Heavy EGR, "New Approach for Low NOx and Improved Fuel Economy". Kuroda, H., Nakajima, Y., Sugihara, K., Takagi, Y., and Muranaka, S. SAE 780006, 1978, SAE Trans., Τόμ. vol. 87.

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΒΙΟΝΤΙΖΕΛ 1^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ ΚΑΙ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΟΥ 2^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΓΧΥΣΗΣ ΣΥΓΧΡΟΝΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΚΙΝΗΤΗΡΑ

Η. Σάλτας¹, Σ. Γκείβανίδης¹, Ζ. Σαμαράς^{1*}

^{1*}Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
541 24, Θεσσαλονίκη, e-mail: zisis@auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ανάγκη μείωσης του ενεργειακού αποτυπώματος στην αυτοκίνηση καθώς επίσης και της απεξάρτησης από εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα οδήγησε στην αναζήτηση καυσίμων για την έστω μερική αντικατάσταση του ορυκτού πετρελαίου. Το πετρέλαιο που διατίθεται σήμερα στην ελληνική αγορά φέρει βιοντίζελ σε ποσοστό έως 7% (B7). Το βιοντίζελ που χρησιμοποιείται είναι 1^η γενιάς αποτελούμενο από μεθυλεστέρες λιπαρών οξέων (Fatty Acid Methyl Esters, FAME). Η ισχύουσα νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης [1] οδηγεί σε σταδιακή αύξηση του ποσοστού βιοκαυσίμων στην αγορά μέχρι το 2020.

Από τεχνική σκοπιά, η μακροχρόνια χρήση του βιοντίζελ έχει δείξει ότι μπορεί να επιδράσει αρνητικά στη λειτουργία των σύγχρονων πετρελαιοκινητήρων. Το βιοντίζελ ενεργοποιεί χημικούς μηχανισμούς που οδηγούν στη δημιουργία επικαθίσεων κυρίως στους εγχυτήρες καυσίμου. Συνέπεια αυτών είναι η υποβάθμιση της λειτουργίας του κινητήρα που μπορεί να οδηγήσει μέχρι και σε αστοχία (μη εκκίνηση) λόγω απόφραξης των εγχυτήρων.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης τεσσάρων καυσίμων στη λειτουργία των εγχυτήρων. Τα καύσιμα αξιολογήθηκαν σε πρότυπη διάταξη δοκιμών συστημάτων έγχυσης. Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει τα εξαρτήματα του συστήματος έγχυσης ενός σύγχρονου πετρελαιοκινητήρα τεχνολογίας κοινού αυλού υψηλής πίεσης. Η διάταξη προσομοιώνει τη λειτουργία αυτοκινήτου μακράς διάρκειας σε σύντομη διάρκεια δοκιμής, επιταχύνοντας με αυτό τον τρόπο το ρυθμό δημιουργίας των επικαθίσεων. Ως καύσιμο αναφοράς επιλέχθηκε ορυκτό πετρέλαιο B0 χωρίς προσθήκη βιοντίζελ ή βελτιωτικών προσθέτων. Δοκιμάστηκε ένα πετρέλαιο αγοράς B7 με σκοπό να εξεταστεί η επίδραση πετρελαίου τωρινών προδιαγραφών στους εγχυτήρες. Επιπλέον, για να μελετηθεί η πιθανή αύξηση περιεκτικότητας σε 1^{ης} γενιάς βιοντίζελ, παράχθηκε και μετρήθηκε ένα καύσιμο B20 με ποσοστό 80% ορυκτό πετρέλαιο και 20% FAME. Τέλος μετρήθηκε υβριδικό καύσιμο S7 το οποίο παράχθηκε με υδρογονοεπεξεργασία μίγματος ορυκτού πετρελαίου, βιοντίζελ 1^{ης} γενιάς και βιοντίζελ 2^{ης} γενιάς.

Παρατηρήθηκε ότι το καύσιμο αναφοράς B0 δεν είχε επίδραση στους εγχυτήρες σε αντίθεση με το πετρέλαιο αγοράς B7 το οποίο προκάλεσε τη δημιουργία επικαθίσεων μετά από δοκιμή εκτεταμένης διάρκειας. Επιπλέον οι δοκιμές με B20 έδειξαν ότι η αύξηση του ποσοστού FAME επιταχύνει τη δημιουργία επικαθίσεων οδηγώντας σε ταχύτερη αστοχία. Η χρήση του υβριδικού καυσίμου δεν οδήγησε σε δημιουργία επικαθίσεων.

Λέξεις Κλειδιά: βιοντίζελ 1^{ης} γενιάς, FAME, βιοκαύσιμο 2^{ης} γενιάς, σύστημα έγχυσης, εγχυτήρας, οξείδωση καυσίμου, επικαθίση

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το τωρινό νομοθετικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης [1] ορίζει το 10% ως ελάχιστο όριο συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο τομέα των μεταφορών μέχρι το 2020 με σκοπό τη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα και των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Λόγω της ευρείας χρήσης αυτοκινήτων πετρελαίου στην Ευρώπη, η προσθήκη βιοντίζελ σαν υποκατάστατο του ορυκτού πετρελαίου είναι το βασικό εργαλείο επίτευξης αυτού του ορίου. Το βιοντίζελ που χρησιμοποιείται είναι 1^{ns} γενιάς αποτελούμενο από μεθυλεστέρες λιπαρών οξέων (Fatty Acid Methyl Esters, FAME). Πρώτη ύλη για την παραγωγή του αποτελούν κυρίως φυτικά έλαια από βιοκαλλιέργειες, χρησιμοποιημένα μαγειρικά λάδια και ζωικά λιπαρά [3], [4]. Το παραγόμενο βιοντίζελ και το πετρελαίο αγοράς πρέπει να πληρούν τις προδιαγραφές ποιότητας που ορίζονται από τα πρότυπα EN590 και EN14214.

Η χρήση πετρελαίου αγοράς το οποίο περιέχει FAME έχει δείξει ότι μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να δημιουργήσει προβλήματα στο σύστηματος έγχυσης του κινητήρα (Fuel Injection Equipment, FIE). Το κρισιμότερο πρόβλημα είναι η δημιουργία επικαθίσεων (deposits) στο εσωτερικό των εγχυτήρων οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την μείωση της παροχής ψεκασμού [5], [6], [7], [8]. Το φαινόμενο αυτό συνδέεται συχνά με προβληματική λειτουργία του κινητήρα όπως ασταθή άφορτη λειτουργία, αυξημένο θόρυβο, απώλεια ισχύος αλλά και αστοχία εκκίνησης [5], [6].

Όπως τεκμηριώνεται από τη διεθνή βιβλιογραφία οι επικαθίσεις οφείλονται κυρίως στην αντίδραση ανόργανων στοιχείων όπως Ασβέστιο (Ca) ή Νάτριο (Na) ή άλλων παραγόντων επιμόλυνσης του καυσίμου, στην αντίδραση καθαριστικών πρόσθετων (detergents) καθώς επίσης και στη γήρανση του καυσίμου με επακόλουθο σχηματισμό προϊόντων οξείδωσης από το βιοντίζελ [5], [6], [8] [10], [11]. Τα καύσιμα που μελετήθηκαν δεν περιέχουν συστατικά επιμόλυνσης ή καθαριστικά πρόσθετα, οπότε η δημιουργία επικαθίσεων οφείλεται μόνο στα προϊόντα της γήρανσης του καυσίμου.

Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης καυσίμων διαφορετικής περιεκτικότητας και σύστασης βιοκαυσίμου στη δημιουργία επικαθίσεων εντός των εγχυτήρων, η ανάλυση και η κατανόηση του μηχανισμού που οδηγεί σε αστοχία των εγχυτήρων από επικαθίσεις.

2. ΚΑΥΣΙΜΑ ΠΟΥ ΕΠΙΛΕΧΘΗΚΑΝ ΓΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Στα πλαίσια της εργασίας δοκιμάστηκαν τα εξής τέσσερα καύσιμα:

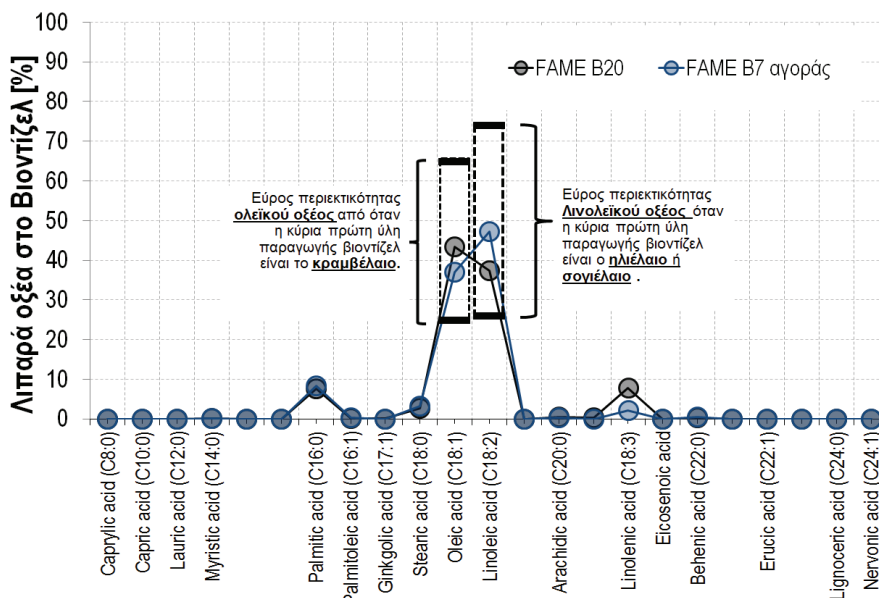
1) Πετρέλαιο αναφοράς B0: Καύσιμο αναφοράς αποτέλεσε το ορυκτό πετρέλαιο χωρίς καθόλου βιοκαύσιμο (B0). Το καύσιμο αναφοράς δεν περιέχει καθόλου πρόσθετα που μπορεί να οδηγήσουν στη δημιουργία επικαθίσεων.

2) Συμβατικό πετρέλαιο αγοράς B7: Το δείγμα αγοράστηκε από πρατήριο υγρών καυσίμων και αναλύθηκε ως προς τη περιεκτικότητα του σε βιοντίζελ αλλά ως προς τη σύστασή του σε λιπαρά οξέα (Εικόνα 1). Το ποσοστό του βιοντίζελ μετρήθηκε στο 6,6% και είναι εντός των ορίων του πρότυπου ποιότητας EN14214.

3) Πειραματικό πετρέλαιο B20 με αυξημένη περιεκτικότητα σε FAME: Το FAME (B100) που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του καυσίμου αυτού παράχθηκε από την εταιρεία ΕΛΙΝ Βιοκαύσιμα Α.Ε. Προέρχεται από την ανάμιξη 50% κ.ο. σογιέλαιου και 50% κ.ο. κραμβέλαιου και στη συνέχεια την εστεροποίηση του μίγματος. Το B100 αναμίχθηκε σε ποσοστό 20% κ.ο. με ορυκτό πετρέλαιο B0, παράγοντας έτσι το B20 που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές.

4) Υβριδικό βιοκαύσιμο 2^{ns} γενιάς S7: Η παραγωγή του συγκεκριμένου καυσίμου έγινε με την υδρογονοεπεξεργασία [9] μίγματος 95% αργού πετρελαίου, 1,6% FAME και 2.5% ανακυκλωμένων μαγειρικών λαδιών (Waste Cooking Oil, WCO). Αξίζει να αναφερθεί ότι σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση [2], το ποσοστό ανάμιξης των ανακυκλωμένων μαγειρικών λαδιών λαμβάνεται υπόψη εις διπλούν στο περιεχόμενο σε βιοκαύσιμα επειδή

προέρχεται από ανακυκλωμένη πρώτη ύλη. Η παραγωγή του συγκεκριμένου καυσίμου πραγματοποιήθηκε από το Εργαστήριο Περιβαλλοντικών Καυσίμων και Υδρογονανθράκων (ΕΠΚΥ) του Εθνικού Κέντρου Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης (ΕΚΕΤΑ).



Εικόνα 1: Περιεκτικότητα FAME σε λιπαρά οξέα των πετρελαίων B20 και B7

Σύμφωνα με στοιχεία του Υπουργείου Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής [12] το βιοντίζελ που παράγεται στην Ελλάδα προέρχεται από βιοκαλλιέργειες ελαιοκράμβης, σογιέλαιου και ηλιάνθου. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1, τα οξέα που κυριαρχούν στο FAME που παράγεται από κραμβέλαιο, σογιέλαιο και ηλιέλαιο είναι το λινολεϊκό και το ολεϊκό οξύ [4]. Το κραμβέλαιο έχει μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε ολεϊκό οξύ ενώ το ηλιέλαιο και το σογιέλαιο σε λινολεϊκό οξύ. Το προφίλ οξέων του βιοντίζελ που περιέχεται στο πετρέλαιο αγοράς B7 δείχνει ελαφρώς μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε λινολεϊκό οξύ και συνεπώς μεγαλύτερο ποσοστό FAME από σογιέλαιο ή ηλιέλαιο.

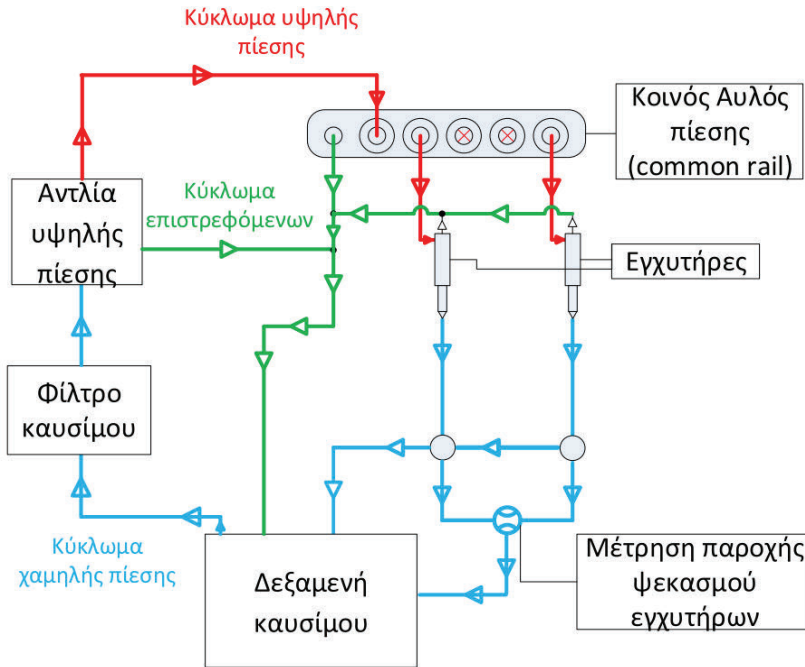
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

3.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΤΥΠΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΔΟΚΙΜΩΝ

Η διάταξη δοκιμών αποτελείται από τα εργοστασιακά εξαρτήματα συστήματος έγχυσης ενός σύγχρονου πετρελαιοκινητήρα επιβατικού αυτοκινήτου τύπου κοινού αυλού υψηλής πίεσης. Πιο αναλυτικά απαρτίζεται από 2 εγχυτήρες ηλεκτρομαγνητικού τύπου με πηνίο (solenoid injectors), τον κοινό αυλό πίεσης (common rail), την αντλία καυσίμου υψηλής πίεσης (HP pump), την αντλία τροφοδοσίας καυσίμου (supply pump), το φίλτρο καυσίμου (fuel filter) και ένα ψυγείο καυσίμου (fuel cooler). Το καύσιμο βρίσκεται εντός μιας ανοξειδωτής δεξαμενής καυσίμου. Την περιστροφή της αντλίας αναλαμβάνει ένας ηλεκτροκινητήρας με ρυθμιστή στροφών. Η διάταξη δοκιμών παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.

Κατά τη λειτουργία της διάταξης, το καύσιμο ανακυκλοφορεί διαρκώς στα επιμέρους εξαρτήματα του συστήματος χωρίς να υπάρχει καύση. Η οξειδωση του καυσίμου επιταχύνεται λόγω της συνεχούς θερμικής καταπόνησης που υφίσταται το καύσιμο κατά τη διέλευσή του από το κύκλωμα. Τα προϊόντα που παράγονται από τις αντιδράσεις οξειδωσης συντελούν στη δημιουργία επικαθίσεων.

Το βασικό μέγεθος που παρακολουθείται και χαρακτηρίζει την κατάσταση του συστήματος είναι η παροχή ψεκασμού καυσίμου των εγχυτήρων. Η δημιουργία επικαθίσεων στο εσωτερικό του εγχυτήρα οδηγεί τελικά σε μείωση της παροχής ψεκασμού. Η εξέλιξη της γήρανσης του καυσίμου παρακολουθείται με τη μέτρηση του αριθμού οξύτητας (Total Acid Number, TAN) μέγεθος χαρακτηριστικό του βαθμού οξείδωσης.



Εικόνα 2: Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης δοκιμών του συστήματος έγχυσης

Η τροφοδοσία και ο συγχρονισμός των σημάτων λειτουργίας της διάταξης πραγματοποιείται από την ηλεκτρονική μονάδα ελέγχου (ECU). Η μονάδα συνεργάζεται με ειδικό λογισμικό ελέγχου που δίνει τη δυνατότητα ρύθμισης βασικών μεγεθών λειτουργίας του συστήματος όπως η πίεση του καυσίμου στο κύκλωμα υψηλής και η παροχή ψεκασμού των εγχυτήρων.

3.2. ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΜΕΓΕΘΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι συνθήκες λειτουργίας της διάταξης προσομοιώνουν τη λειτουργία του συστήματος έγχυσης στο αυτοκίνητο. Το καύσιμο θερμαίνεται εντός της δεξαμενής στους 60°C και οι εγχυτήρες στους 130°C. Η ημερήσια λειτουργία της διάταξης διαρκεί 14 ώρες. Στο διάστημα αυτό η διάταξη λειτουργεί σε 2 σταθερά σημεία, υψηλό φορτίο κινητήρα (επί 12 ώρες) και χαμηλό φορτίο κινητήρα (επί 2 ώρες). Στο σημείο υψηλού φορτίου, το σύστημα λειτουργεί με συνθήκες ανάλογες ενός αυτοκινήτου που ταξιδεύει με ταχύτητα 120 km/h. Στα δυο σημεία λειτουργίας η παροχή ψεκασμού των εγχυτήρων, η ταχύτητα περιστροφής της αντλίας και η πίεση εντός του κυκλώματος υψηλής πίεσης λαμβάνουν διαφορετικές τιμές. Επίσης, στο τέλος της ημερήσιας λειτουργίας της διάταξης, η θέρμανση των εγχυτήρων συνεχίζεται για 30 λεπτά επιπλέον (postheating) ώστε να προσομοιωθεί η θερμική καταπόνηση των εγχυτήρων μετά το σβήσιμο του αυτοκινήτου.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Όπως ήδη αναφέρθηκε, κατά τη λειτουργία της διάταξης ενδεικτικό μέγεθος της κατάστασης των εγχυτήρων είναι η παροχή ψεκασμού. Η δημιουργία επικαθίσεων συνεπάγεται τη σταδιακή μείωση της παροχής. Ως αστοχία ορίζεται η πτώση της παροχής ψεκασμού κάτω από 80% σε σχέση με την παροχή ψεκασμού του καινούριου εγχυτήρα. Ο κινητήρας έχει τη δυνατότητα να αντισταθμίσει μικρή μείωση στην παροχή ψεκασμού. Η περεταίρω μείωση της παροχής ψεκασμού κάτω από το 80% προκαλεί προβλήματα στην εκκίνηση και τη λειτουργία του κινητήρα.

Στην διάρκεια των δοκιμών με τα 4 καύσιμα, παρατηρήθηκε πιο σημαντική μείωση της παροχής ψεκασμού σε χαμηλό φορτίο που είναι και το κρίσιμο σημείο λειτουργίας στο οποίο εμφανίζεται η αστοχία του κινητήρα. Για λόγους απλοποίησης, στα επόμενα διαγράμματα παρουσιάζεται η εξέλιξη της παροχής ψεκασμού στο χαμηλό σημείο λειτουργίας και μάλιστα για τον εγχυτήρα με τη χειρότερη συμπεριφορά εκ των δύο όμοιων που μετρούνταν παράλληλα.

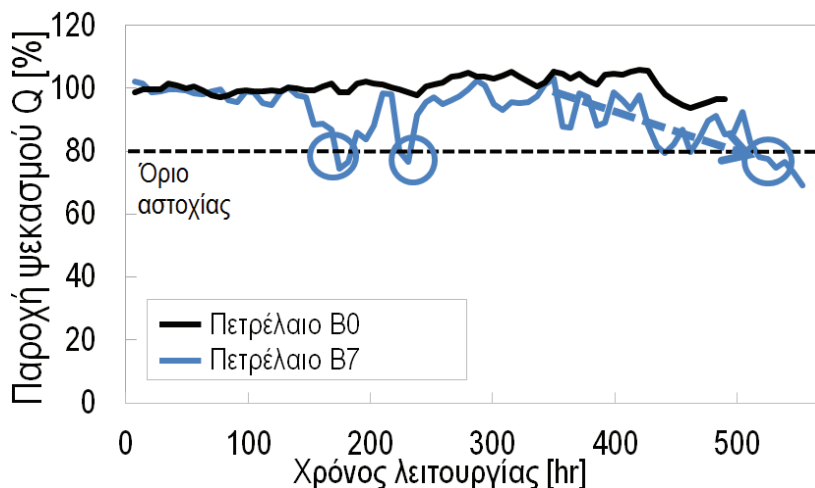
4.1. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΕΓΧΥΤΗΡΩΝ

4.1.1. ΚΑΥΣΙΜΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ Β0

Κατά τη λειτουργία με καύσιμο αναφοράς Β0 (καθαρό ορυκτό πετρέλαιο χωρίς πρόσθετα ή βιοκαύσιμο) παρατηρήθηκε όπως αναμένονταν ότι το καύσιμο δεν είχε καμία επίδραση στο σύστημα έγχυσης. Στις επόμενες παραγράφους, στα διαγράμματα που περιγράφουν την συμπεριφορά των καυσίμων δοκιμών προστίθεται και αυτή του Β0 για λόγους καλύτερης κατανόησης.

4.1.2. ΣΥΜΒΑΤΙΚΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ ΑΓΟΡΑΣ Β7

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται η εξέλιξη της μετρούμενης παροχής ψεκασμού με καύσιμο αγοράς Β7 σε σχέση με το καύσιμο αναφοράς.



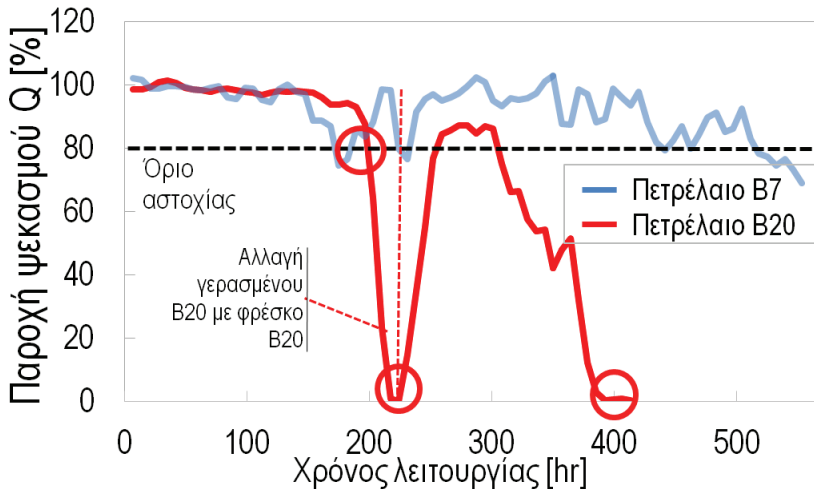
Εικόνα 3: Εξέλιξη της παροχής ψεκασμού του εγχυτήρα κατά τη λειτουργία με πετρέλαιο αναφοράς Β0 και πετρέλαιο αγοράς Β7

Παρατηρείται ότι ο εγχυτήρας εμφανίζει τα πρώτα σημάδια δημιουργίας επικαθίσεων παρατηρούνται μετά από 160 ώρες λειτουργίας. Στις 320 ώρες λειτουργίας παρατηρείται

σταδιακή μείωση της παροχής ψεκασμού που σημαίνει ότι η εναπόθεση των επικαθίσεων σταδιακά αυξάνεται. Ο εγχυτήρας φαίνεται να αστοχεί οριστικά μετά από 500 ώρες λειτουργίας στη διάταξη. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι μακροχρόνια χρήση πετρελαίου αγοράς B7 μπορεί να οδηγήσει σε κάποιες περιπτώσεις σε επικαθίσεις στους εγχυτήρες σε σύγκριση με το καθαρό ορυκτό πετρέλαιο.

4.1.2. ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΟ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ B20 ΑΥΞΗΜΕΝΗΣ ΠΕΡΙΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ FAME

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4 η χρήση του δοκιμαστικού πετρελαίου B20 με αυξημένο ποσοστό FAME είχε ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση της δημιουργίας επικαθίσεων. Οι εγχυτήρες αστόχησαν ολοκληρωτικά μετά από 220 ώρες λειτουργίας. Η ανανέωση του καυσίμου με νέο B20 είχε ως αποτέλεσμα την μερική αποκατάσταση της παροχής ψεκασμού η οποία μηδενίστηκε όμως και πάλι μετά από 200 ώρες επιπλέον ώρες λειτουργίας της διάταξης.

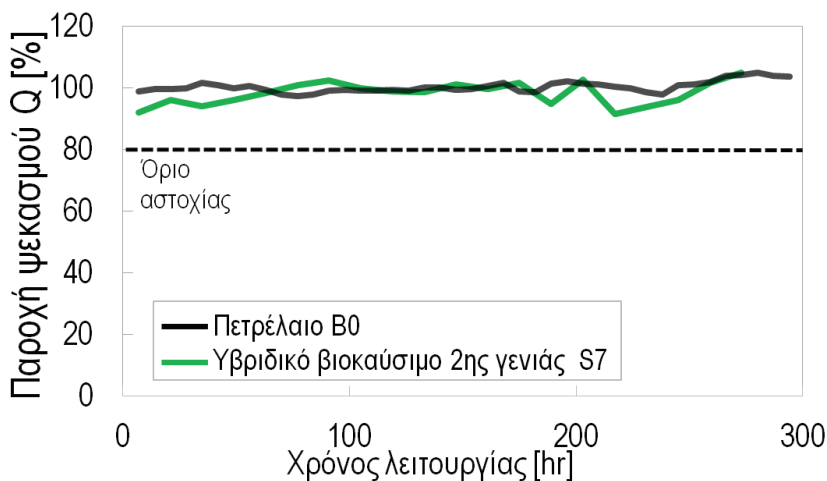


Εικόνα 4: Εξέλιξη της παροχής ψεκασμού των εγχυτήρων κατά τη λειτουργία με πετρέλαιο B20 και πετρέλαιο αγοράς B7

Τα παραπάνω δείχνουν ότι αύξηση του ποσοστού FAME από 7% που χρησιμοποιείται σήμερα στην αγορά σε 20% οδηγεί σε ταχύτερη ανάπτυξη επικαθίσεων. Η παρατήρηση αυτή λήφθηκε με δοκιμές σε ένα σύστημα έγχυσης τρέχουσας τεχνολογίας. Για να επιτευχθούν οι στόχοι μείωσης κατανάλωσης και ρύπων στους πετρελαιοκινητήρες, η τεχνολογία των εγχυτήρων γίνεται όλο και πιο πολύπλοκη με συνέπεια κατασκευές υψηλότερης ακρίβειας και υψηλότερης ευαισθησίας σε επικαθίσεις. Κατά συνέπεια ο υψηλότερος ρυθμός επικαθίσης όταν αυξάνεται το FAME στο καύσιμο πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό των μελλοντικών συστημάτων έγχυσης.

4.1.3. ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΟ ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΟ 2^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ S7

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5 οι εγχυτήρες έμειναν εντελώς ανεπηρέαστοι από τη χρήση του υβριδικού βιοκαυσίμου επί 300 h. Η παροχή ψεκασμού δεν μειώθηκε στη διάρκεια των μετρήσεων και η εξέλιξη της είναι όμοια αυτή του πετρελαίου αναφοράς B0. Ο χαμηλός ρυθμός γήρανσης του S7 (Εικόνα 6) οδήγησε στο συμπέρασμα ότι δεν αναμένεται αστοχία του συστήματος όσο και να αυξηθεί η διάρκεια δοκιμής πέραν των 300 h.

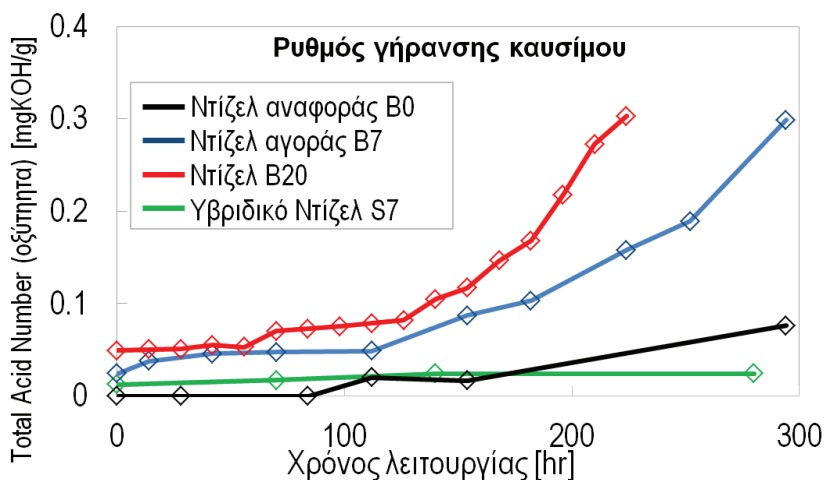


Εικόνα 5: Εξέλιξη της παροχής ψεκασμού των εγχυτήρων κατά τη λειτουργία με υβριδικό βιοκαύσιμο 2^{ης} γενιάς S7 σε συνθήκες χαμηλού φορτίου

Συνεπώς σ' αυτή την πρώτη δοκιμή πειραματικού υβριδικού βιοκαυσίμου 2^{ης} γενιάς φάνηκε ότι δεν δημιουργούνται επικαθίσεις όπως στο βιοκαύσιμο 1^{ης} γενιάς (FAME).

4.2. ΡΥΘΜΟΣ ΟΞΕΙΔΩΣΗΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

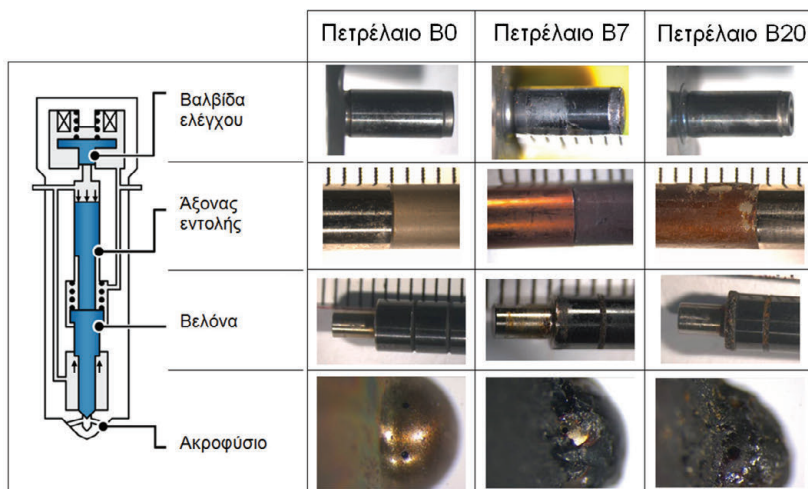
Ο αριθμός οξύτητας (TAN) είναι μέγεθος ενδεικτικό του βαθμού οξείδωσης και ισοδύναμα, του βαθμού γήρανσης του καυσίμου. Με δεδομένο ότι οι επικαθίσεις στο εσωτερικό των εγχυτήρων σχηματίζονται από αντιδράσεις οξείδωσης, αναμένεται ότι καύσιμα με υψηλό TAN οδηγούν σε ταχύτερη αστοχία των εγχυτήρων [13] κάτι που επαληθεύεται και από την Εικόνα 6. Επιπλέον ο ρυθμός οξείδωσης γίνεται πιο έντονος με την αύξηση της περιεκτικότητας σε βιοντίζελ 1^{ης} γενιάς από 7% σε 20%. Το υβριδικό βιοκαύσιμο έδειξε ότι έχει μεγάλη αντοχή στην οξείδωση. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι η τιμή του TAN τη χρονική στιγμή που αστόχησαν οι εγχυτήρες με B7 και B20 βρισκόταν πάνω από 0.2 mgKOH/g.



Εικόνα 6: Ρυθμός γήρανσης του καυσίμων κατά τη διάρκεια των δοκιμών

5. ΕΠΙΚΑΘΙΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΩΝ ΕΓΧΥΤΗΡΩΝ

Για την επιβεβαίωση των παραπάνω παρατηρήσεων, μετά το τέλος των δοκιμών οι εγχυτήρες αποσυναρμολογήθηκαν με σκοπό να μελετηθούν οι επικαθίσεις στο εσωτερικό του εγχυτήρα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7, ο εγχυτήρας που λειτουργήσε με Β0, ήταν καθαρός χωρίς επικαθίσεις που συμφωνεί με την μη μείωση της παροχής ψεκασμού. Επιπλέον τα κινούμενα μέρη αφαιρέθηκαν εύκολα, χωρίς την ανάγκη εφαρμογής υψηλής δύναμης αφαίρεσης. Αντίθετα, επικαθίσεις παρατηρήθηκαν στους εγχυτήρες που αστόχησαν κατά τη λειτουργία με καύσιμο Β7 και Β20. Η αφαίρεση των επιμέρους εξαρτημάτων τους έγινε με δυσκολία και σε μερικές περιπτώσεις έγινε χρήση ειδικών εργαλείων αφαίρεσης.



Εικόνα 7: Επικαθίσεις σε εξαρτήματα εντός του εγχυτήρα μετά το τέλος των δοκιμών

Παρουσία επικαθίσεων εντοπίστηκε εντός των αυλακώσεων της βελόνας του εγχυτήρα. Οι ανοχές μεταξύ σώματος εγχυτήρα και βελόνας στο συγκεκριμένο σημείο είναι εξαιρετικά μικρές. Κατά τη διάρκεια του ψεκασμού καυσίμου, οι επικαθίσεις δημιουργούν δύναμη τριβής αντίθετη της μετατόπισης της βελόνας. Όταν η δύναμη τριβής γίνει συγκρίσιμη με την δύναμη ενεργοποίησης της βελόνας τότε η διάρκεια ανοίγματος αυτής μειώνεται με αποτέλεσμα τη μείωση της παροχής ψεκασμού.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε μία πρότυπη διάταξη προσομοίωσης της λειτουργίας του συστήματος έγχυσης αυτοκινήτου. Με τη διάταξη επιτεύχθηκε επιτάχυνση της γήρανσης του καυσίμου και αναπαραγωγή του μηχανισμού δημιουργίας επικαθίσεων στο εσωτερικό των εγχυτήρων. Οι μετρήσεις έγιναν με 4 καύσιμα δοκιμών. Τα 3 καύσιμα περιείχαν διαφορετικό ποσοστό FAME (0%, 7%, 20%) ενώ το τέταρτο ήταν υβριδικό βιοκαύσιμο 2^{ης} γενιάς S7. Σκοπός ήταν να μελετηθεί η επίδραση των τωρινών και μελλοντικών εναλλακτικών καυσίμων στους εγχυτήρες και την παροχή έγχυσης. Τα βασικά συμπεράσματα συνοψίζονται ως εξής:

Κατά τη λειτουργία με ορυκτό πετρέλαιο Β0 χωρίς βιοντίζελ δεν παρατηρήθηκε ανάπτυξη επικαθίσεων.

Το πετρέλαιο αγοράς προκάλεσε περιορισμένες επικαθίσεις στο εσωτερικό των εγχυτήρων και μείωση της παροχής έγχυσης. Οι επικαθίσεις οφείλονται στα προϊόντα της οξείδωσης του βιοντίζελ. Η παρατήρηση αυτή συμφωνεί με την εμφάνιση βλαβών σε περιορισμένο αριθμό

οχημάτων στην αγορά, είτε λόγω της μεγάλης ηλικίας τους, είτε λόγω της χρήσης καυσίμων με επιβαρυμένη ποιότητα βιοντίζελ (οξειδωση του καυσίμου πριν τον ανεφοδιασμό κατά την αποθήκευση, κακή ποιότητα αρχικού βιοντίζελ κλπ.).

Οι αρνητικές επιδράσεις των επικαθίσεων είναι περισσότερο εμφανείς σε χαμηλά σημεία λειτουργίας (όπως η άφορτη λειτουργία, ρελαντί) όπου η πίεση καυσίμου εντός του εγχυτήρα δεν μπορεί να υπερνικήσει τις αυξημένες δυνάμεις τριβών που αναπτύσσονται.

Το καύσιμο B20 (αυξημένη περιεκτικότητα σε FAME) προκάλεσε πιο εκτεταμένες επικαθίσεις στο εσωτερικό των εγχυτήρων και γρηγορότερη αστοχία του συστήματος. Η ανανέωση του B20 με μη οξειδωμένο αποκατέστησε μερικώς τη μειωμένη παροχή ψεκασμού εγχυτήρων. Πιθανή αύξηση του ποσοστού βιοντίζελ 1^{ης} γενιάς στο πετρέλαιο αγοράς πρέπει να ληφθεί υπόψη στον σχεδιασμό των συστημάτων έγχυσης των αυτοκινήτων ώστε να αποφευχθεί ενδεχόμενη αύξηση του ποσοστού αστοχίας των εγχυτήρων. Η δημιουργία επικαθίσεων στο εσωτερικό ενός εγχυτήρα δείχνει να εξαρτάται από το επίπεδο της οξειδωσης του καυσίμου. Υψηλός αριθμός οξύτητας (TAN) συνεπάγεται ταχύτερη αστοχία του εγχυτήρα.

Κατά τη λειτουργία με το υβριδικό καύσιμο 2^{ης} γενιάς δεν παρατηρήθηκε καμία υποβάθμιση της λειτουργίας των εγχυτήρων και του συστήματος έγχυσης.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εργασία αυτή αποτελεί μέρος του προγράμματος «Συνεργασία» 09ΣΥΝ-32-328, «Βελτίωση Αειφορίας Τεχνολογίας Παραγωγής Ντίζελ (SustainDiesel)».

Οι συγγραφείς ευχαριστούν την εταιρία ΕΛΙΝ Βιοκαύσιμα για την παραγωγή του FAME και την υποστήριξη σε υλικό και τεχνογνωσία, το Εργαστήριο Περιβαλλοντικών Καυσίμων και Υδρογονανθράκων του ΕΚΕΤΑ για την ανάπτυξη και παραγωγή του υβριδικού βιοκαυσίμου 2ης γενιάς και την συνεργασία κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, καθώς επίσης και το Εργαστήριο Μεταλλογνωσίας του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του ΑΠΘ για την αξιολόγηση των εξαρτημάτων των συστημάτων έγχυσης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] European Union Directive 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources, <http://www.ebb-eu.org/legislation.php>
- [2] Official Journal of the European Union 2010/C 160/02, Communication from the Commission on the practical implementation of the EU biofuels and bioliquids sustainability scheme and on counting rules for biofuels, paragraph 5.2
- [3] Fukuda, H., et al., "Biodiesel fuel production by transesterification of oils: review", Journal of Bioresource and Bioengineering, 2001, ISSN: 13897723, Vol. 92, Issue 5
- [4] Mittelbach, M. and Remschmidt, C. "Biodiesel The comprehensive book, 2004, ISBN: 3-200-00249-2, pp 9-91.
- [5] Ullmann, J. et al. "Investigation into the Formation and Prevention of Internal Diesel Injector Deposits", SAE Technical Paper 2008-01-0926, 2008
- [6] Quigley, R. et al., "A Study of the internal Diesel Injector Deposit Phenomenon", TAE 8th International Colloquium paper, 2001
- [7] Caprotti, R. et al., "RME Behavior in Current and Future Diesel Fuel FIE's", SAE Technical Paper 2007-01-3982, 2007
- [8] Ullman, J. et al., "Effects of Fuel Impurities and Additive Interactions on the Formation of Internal Diesel Injector Deposits", TAE 7th International Colloquium paper, 2009

- [9] Bezergianni, S. et al., "Hydro treating of waste cooking oil for biodiesel production. Part I: Effect of temperature on product yields and heteroatom removal", *Bioresour Technol*, 101 (2010), pp. 6651–6656
- [10] Jain, S., Sharma, M.P., "Thermal stability of Biodiesel and its blends: A review", *Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, ISSN: 1364-0321, Vol. 15, pp. 438-448
- [11] Yamane, K. et al., "Oxidation stability of Biodiesel and its effects on Diesel combustion and emission characteristics", *International Journal of Engine Research*, 2007 Vol. 8, pp 307-319
- [12] Κατανομή έτους 2014 ποσότητας 133.000 χιλιολίων αυτούσιου βιοντίζελ, σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 15Α παρ. 7 του ν. 3054/2002, όπως ισχύει (ΦΕΚ Β' 2220/13.08.2014), <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=292>
- [13] Omori, T. et al., "Biodiesel deposit formation mechanism and improvement of Fuel Injection Equipment (FIE)", *JSAE technical paper*, 2011

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΗΠΙΑΣ ΠΥΡΟΛΥΣΗΣ (ΦΡΥΞΗΣ) ΣΤΕΡΕΑΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Ηλίας Χριστοφόρου, Πάρις Α. Φωκαΐδης

Σχολή Μηχανικής και Εφαρμοσμένων Επιστημών, Πανεπιστήμιο Frederick
Φρειδερίκου 7, 1036, Λευκωσία, Κύπρος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η πυρόλυση αποτελεί μια δόκιμη θερμοχημική διαδικασία επεξεργασίας και ενεργειακής αξιοποίησης της στερεάς βιομάζας. Στον ελληνικό χώρο υπάρχουν στο παρόν στάδιο σειρά εφαρμογών, τόσο σε πιλοτικό-ερευνητικό επίπεδο, όσο και σε βιομηχανικές εφαρμογές. Για την περιβαλλοντική αποτίμηση της πυρόλυσης έναντι άλλων μορφών θερμοχημικής επεξεργασίας στερεάς βιομάζας, απαιτείται μεταξύ άλλων η εκπόνηση μελέτης ανάλυσης του κύκλου ζωής της διαδικασίας.

Η εργασία αυτή παρουσιάζει την ολοκληρωμένη περιβαλλοντική αποτίμηση της διαδικασίας πυρόλυσης στερεάς βιομάζας με την εφαρμογή ολοκληρωμένης ανάλυσης κύκλου ζωής. Συγκεκριμένα η εργασία αυτή εκπονήθηκε θεωρώντας συνθήκες ήπιας βιομάζας (φρύξης), μιας τεχνικής η οποία βιβλιογραφικά θεωρείται ως η ενεργειακά και περιβαλλοντικά βέλτιστη. Ως πηγή στερεάς βιομάζας έχει επιλεγεί ξύλο από ευκάλυπτο. Για την ανάλυση λήφθηκαν υπόψη ολοκληρωμένα ισοζύγια μάζας και ενεργειακά ισοζύγια, και οι δείκτες περιβαλλοντικής επιβάρυνσης για τα διάφορα στάδια της διεργασίας καθορίστηκαν με την χρήση του λογισμικού Gabi. Η ανάλυση των εξερχομένων δεικτών περιβαλλοντικής επιβάρυνσης δίνουν την δυνατότητα τεχνικής αξιολόγησης της διαδικασίας της φρύξης, καθώς επίσης και την προώθηση δυνατοτήτων βελτιστοποίησης της όλης διαδικασίας.

Λέξεις Κλειδιά: Φρύξη, Βιομάζα, Ανάλυση Κύκλου Ζωής

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η φρύξη αποτελεί μια μορφή ήπιας πυρόλυσης σε θερμοκρασίες 200-300°C σε απουσία οξυγόνου. Η θερμική διεργασία της φρύξης αποτελεί μια δόκιμη θερμοχημική διαδικασία επεξεργασίας στερεάς βιομάζας η οποία στο παρόν στάδιο βρίσκει εφαρμογή σε σειρά πιλοτικών μονάδων ενώ παράλληλα αποτελεί σημείο έρευνας για περαιτέρω βελτιστοποίηση της συνολικής απόδοσης της διεργασίας. Η ανάλυση κύκλου ζωής αποτελεί μια δόκιμη μεθοδολογία για την ποσοτική εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός συστήματος, διεργασίας ή προϊόντος επιτρέποντας παράλληλα την σύγκριση και ταυτόχρονα αξιολόγηση εναλλακτικών τεχνολογικών εφαρμογών και μεθόδων με σκοπό την βελτίωση τους.

Στην παρούσα μελέτη εφαρμόζεται η μεθοδολογία της ανάλυσης κύκλου ζωής της διεργασίας φρύξης στερεάς βιομάζας. Συνολικά εξετάζονται τρία διαφορετικά σενάρια σχετικά με την μέθοδο παραγωγής της απαιτούμενης θερμικής ενέργειας ως ακολούθως:

- i. Παραγωγή θερμότητας με χρήση λέβητα πετρελαίου.
- ii. Παραγωγή θερμότητας με χρήση λέβητα βιομάζας
- iii. Παραγωγή θερμότητας με χρήση ηλιοθερμικού συστήματος και συστήματος αποθήκευσης θερμότητας (buffer tank)

Στην ενότητα 2 γίνεται μια σύντομη περιγραφή των χαρακτηριστικών και βασικών σταδίων της θερμικής διεργασίας της φρύξης καθώς και αναφορά στα βασικά στάδια της μεθόδου ανάλυσης κύκλου ζωής. Στην ενότητα 3 περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας μελέτης, ενώ στην ενότητα 4 φαίνονται τα δεδομένα, οι παραδοχές και η ανάλυση των διαφόρων σεναρίων που εξετάστηκαν. Το οικολογικό αποτύπωμα καθενός από τα σενάρια παρουσιάζεται στην ενότητα 5.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1. ΦΡΥΞΗ (TORREFACTION)

2.1.1. ΓΕΝΙΚΑ

Η φρύξη αποτελεί μια θερμική διεργασία προεπεξεργασίας βιομάζας για σκοπούς ενεργειακής αξιοποίησης. Λαμβάνει χώρα υπό συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης και σε απουσία οξυγόνου σε θερμοκρασίες περίπου 200-300 °C. Από την διεργασία της φρύξης προκύπτει ως τελικό προϊόν (torrefied biomass) ένα ομοιογενές στερεό, χαμηλής περιεκτικότητας σε υγρασία, με βελτιωμένα θερμικά χαρακτηριστικά (ενεργειακή πυκνότητα, υδροφοβικές ιδιότητες κ.α) σε σχέση με την ακατέργαστη βιομάζα (raw biomass). Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες, παρατηρείται μείωση της τάξης του 30% στο βάρος και μόλις 10% μείωση στο ενεργειακό περιεχόμενο. [1] [2] [3] [4] [5]. Παράλληλα το τελικό προϊόν παρουσιάζει βελτιωμένες ιδιότητες στο στάδιο της κονιοποίησης γεγονός που επιφέρει σημαντικά ενεργειακά οφέλη κατά το στάδιο της επεξεργασίας και μεταφοράς από το σημείο παραγωγής στο σημείο ενεργειακής αξιοποίησης.

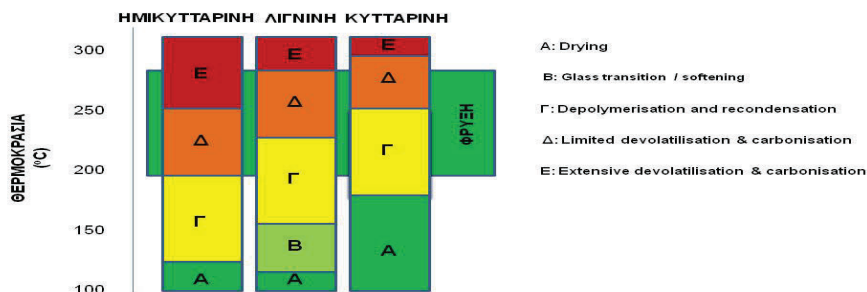
2.1.2. ΣΤΑΔΙΑ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ ΦΡΥΞΗΣ

Η ξυλώδης και ποώδης βιομάζα αποτελείται κυρίως από λιγνίνη (lignine), κυτταρίνη (cellulose) και ημικυτταρίνη (hemicellulose). Στην Εικόνα 1 παρουσιάζονται τα διάφορα στάδια αποσύνθεσης βιομάζας σε συνθήκες ήπιας πυρόλυσης / φρύξης.

Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες η φρύξη βιομάζας πραγματοποιείται σε διάφορα στάδια [6]. Τα πέντε κύρια στάδια που ορίζονται κατά την διαδικασία της φρύξης είναι:

1. Αρχική θέρμανση (Initial Heating): Αρχική θέρμανση βιομάζας ωστόσο ξεκινάει η διαδικασία ξήρανσης της βιομάζας. Σε αυτό το στάδιο, η θερμοκρασία αυξάνεται, ενώ στο τέλος αυτού του σταδίου υγρασία αρχίζει να εξατμίζεται.
2. Προ-ξήρανση (Pre-drying): στους 100 °C το ελεύθερο νερό εξατμίζεται από την βιομάζα σε σταθερή θερμοκρασία.

3. Μετά-ξηράνση και ενδιάμεση θέρμανση (Post-drying and intermediate heating): Η θερμοκρασία της βιομάζας αυξάνεται στους 200 °C ενώ συνεχίζεται η απελευθέρωση δεσμευμένου νερού. Κατά το στάδιο παρατηρείται μικρή απώλεια μάζας.
4. Φρύξη (Torrefaction): Αποτελεί το κύριο στάδιο της διαδικασίας. Η φρύξη ξεκινά όταν η θερμοκρασία φτάσει τους 200 °C και τελειώνει όταν αυτή πέσει κάτω από τους 200 °C. Η θερμοκρασία φρύξης (torrefaction temperature) ορίζεται ως η μέγιστη σταθερή θερμοκρασία. Κατά το στάδιο αυτό παρατηρείται η μεγαλύτερη απώλεια μάζας της βιομάζας.
5. Ψύξη (Cooling): Το προϊόν της φρύξης (torrefied biomass) ψύχεται σε θερμοκρασία δωματίου.



Εικόνα 1: Κύρια θερμοχημικά φαινόμενα κατά την θέρμανση λιγνοκυτταρινούχας βιομάζας σε συνθήκες ήπιας πυρόλυσης – φρύξης. [5]

2.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΦΡΥΞΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Η ανάλυση κύκλου ζωής αποτελεί μια δόκιμη μεθοδολογία η οποία επιτρέπει την περιβαλλοντική αποτίμηση ενός προϊόντος, μιας διεργασίας ή ενός συστήματος. Η πρότυπη μεθοδολογία εκπόνησης ανάλυσης κύκλου ζωής περιγράφεται από το διεθνές πρότυπο ISO 14040 [7]. Τα βασικά στάδια της ανάλυσης κύκλου ζωής είναι τα εξής (Εικόνα 2):

1. Καθορισμός του σκοπού και των στόχων της μελέτης
2. Συλλογή δεδομένων που αφορούν την μελέτη - καθορισμός των εισροών και εκροών του συστήματος
3. Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων - Προσδιορισμός των αντίστοιχων περιβαλλοντικών επιδράσεων για κάθε εισροή και εκροή του συστήματος
4. Εξαγωγή και ερμηνεία αποτελεσμάτων

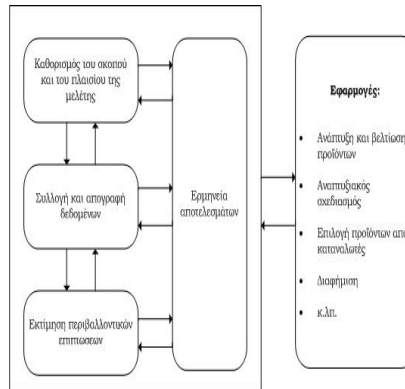
Στη βιβλιογραφία υπάρχει πολύ περιορισμένος αριθμός αναφορών σχετικά με την ανάλυση κύκλου ζωής φρύξης στερεάς βιομάζας. [8][9]

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η ανάλυση κύκλου ζωής της θερμικής διεργασίας της φρύξης έγινε βάσει της πρότυπης μεθοδολογίας που περιγράφεται στο διεθνές πρότυπο ποιότητας ISO 14040 [7]. Για τον σκοπό της μελέτης αυτής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό GaBi [10] και η δόκιμη μεθοδολογία υπολογισμού περιβαλλοντικής επίδρασης CML 2001 [11]. Οι κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη είναι οι ακόλουθες:

- Φαινόμενο θερμοκηπίου (Global Warming Potential-GWP 100 years),
- Οξίνιση (Acidification potential -AP),
- Ευτροφισμός (Eutrophication potential - EP),

- Αλλοίωση στοιβάδας του όζοντος – (Ozone layer depletion potential - ODP, steady state),
- Μείωση μη ανανεώσιμων υλικών (Abiotic depletion potential -ADP),



Εικόνα 2: Στάδια ανάλυσης κύκλου ζωής. [7]

Στην παρούσα μελέτη εξετάζονται συνολικά οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις τριών εναλλακτικών σεναρίων φρύξης ξυλώδους βιομάζας, και συγκεκριμένα λαμβάνεται ως πρώτη ύλη ξυλεία από ευκάλυπτο. Το στοιχείο που διαφοροποιεί τα υπό μελέτη σενάρια αφορά την πηγή θερμότητας για κάλυψη των αναγκών που προκύπτουν κατά το στάδιο της ξήρασης και φρύξης της βιομάζας. Τα σενάρια που εξετάζονται είναι τα ακόλουθα:

- Παραγωγή θερμότητας με χρήση λέβητα πετρελαίου θερμικής απόδοσης 90% και ταυτόχρονη αξιοποίηση αερίων φρύξης (torgas)
- Παραγωγή θερμότητας με χρήση λέβητα βιομάζας, θερμικής απόδοσης 90% και ταυτόχρονη αξιοποίηση αερίων φρύξης (torgas). Για την κάλυψη των θερμικών αναγκών θεωρήθηκε χρήση του ίδιου τύπου βιομάζας με αυτήν που υπόκειται σε φρύξη.
- Παραγωγή θερμότητας με χρήση ηλιοθερμικού συστήματος και συστήματος αποθήκευσης θερμότητας (buffer tank)

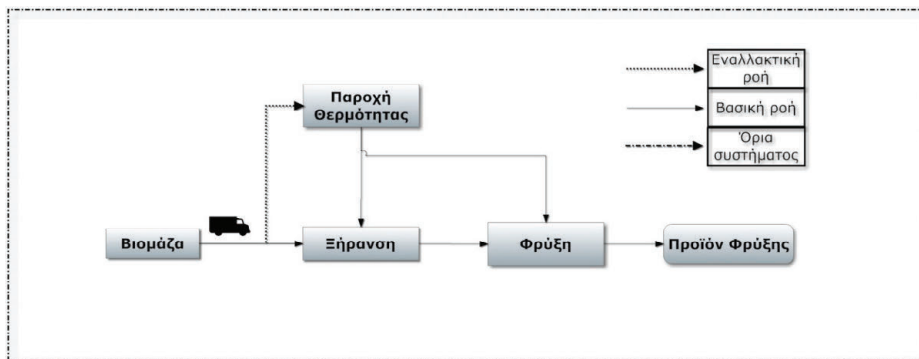
Η ανάλυση ξεκινά από την μεταφορά της πρώτης ύλης στο σημείο όπου τυγχάνει θερμικής επεξεργασίας μέχρι την παραγωγή του τελικού προϊόντος. Η σύγκριση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος κάθε σεναρίου γίνεται εφικτή με την χρήση κοινής λειτουργικής μονάδος αναφοράς (functional unit). Για τον σκοπό της παρούσας μελέτης έχει επιλεγεί ως λειτουργική μονάδα αναφοράς η "θερμική επεξεργασία 1000 kg υγρής βιομάζας".

4. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΦΡΥΞΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ (LIFE CYCLE INVENTORY)

Η αξιοπιστία της ΑΚΖ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια και την πληρότητα των δεδομένων που χρησιμοποιούνται [12]. Στην παρούσα εργασία, για την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των διάφορων σεναρίων, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα και υποθέσεις που λήφθηκαν από προηγούμενη μελέτη [13]. Στην εργασία αυτή εξετάζεται η θερμική διεργασία της φρύξης σε τεχνοοικονομικό επίπεδο και παρουσιάζεται σχετική ανάλυση του ισοζυγίου μάζας – ενέργειας ενός συστήματος φρύξης βιομάζας, όπου χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη ξυλεία και συγκεκριμένα ευκάλυπτος.

4.1. ΟΡΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζονται τα όρια του συστήματος και οι διεργασίες που εξετάζονται στο σύστημα φρύξης στερεής βιομάζας.



Εικόνα 3: Όρια συστήματος φρύξης

Στην μελέτη λαμβάνονται υπόψη τα ακόλουθα:

1. Η μεταφορά της πρώτης ύλης στο χώρο θερμικής επεξεργασίας.
2. Οι θερμικές ανάγκες για μείωση της περιεχόμενης υγρασίας της πρώτης ύλης
3. Οι ενεργειακές ανάγκες στο στάδιο της φρύξης της πρώτης ύλης

Πρέπει να σημειωθεί ότι ενεργειακές ανάγκες για παραγωγή της πρώτης ύλης, του εξοπλισμού και των οχημάτων μεταφοράς δεν λαμβάνονται υπόψη στην παρούσα εργασία. Επίσης, έχει θεωρηθεί ότι η θερμογόνος δύναμη της βιομάζας στα διάφορα στάδια επεξεργασίας παραμένει σταθερή στα διάφορα σενάρια. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει τις βασικές παραδοχές που γίνονται για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των τριών εναλλακτικών σεναρίων φρύξης σε συνθήκες σχεδόν αυτόθερμης λειτουργίας (Auto thermal Operation) [13], δηλαδή οι ανάγκες σε θερμότητα καλύπτονται ως επί το πλείστον από το υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο των αερίων φρύξης ενώ η υπόλοιπη απαιτούμενη ενέργεια εξασφαλίζεται από άλλες πηγές.

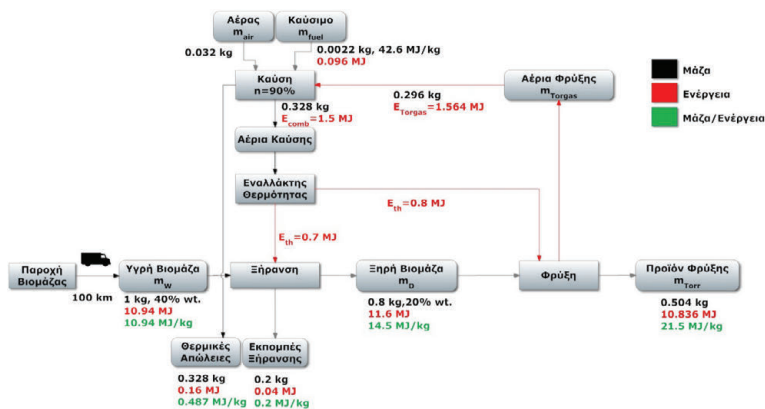
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΖΗΤΗΣΗ

5.1. ΙΣΟΖΥΓΙΑ ΜΑΖΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

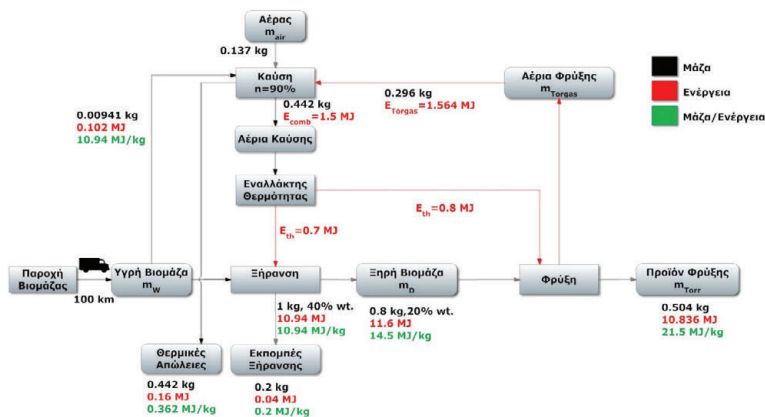
Τα δεδομένα στα οποία βασίστηκε η ανάλυση του κύκλου ζωής των τριών σεναρίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 2. Από τα δεδομένα αυτά καθώς και τις παραδοχές όπως φαίνονται στον Πίνακα 1 προκύπτουν επίσης τα ισοζύγια μάζας και ενέργειας για κάθε σενάριο. Τα απλοποιημένα ισοζύγια απεικονίζονται στις Εικόνες 4-6.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά συστήματος φρύξης	
Παράμετρος	Χαρακτηριστικά
Παραγωγή Πρώτης ύλης	Δεν λαμβάνεται υπόψη
Παραγωγή Μεταφορικών Μέσων	Δεν λαμβάνεται υπόψη
Παραγωγή Εξοπλισμού	Δεν λαμβάνεται υπόψη
Μέσο Μεταφοράς πρώτης ύλης	Φορητό μεικτού βάρους 7.5t, μέγιστου φορτίου 3.3 t
Απόσταση [km]	100
Ενεργειακές ανάγκες για ξήρανση και φρύξη βιομάζας	Κάλυψη αναγκών από τα αέρια της καύσης με ταυτόχρονη αξιοποίηση των αερίων φρύξης
Περιεχόμενη Υγρασία πρώτης ύλης [%]	40
Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη Υγρής Βιομάζας (LHV) [MJ/kg]	10.94
Περιεχόμενη Υγρασία Ξηρής Βιομάζας [%]	20
Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη Ξηρής Βιομάζας (LHV) [MJ/kg]	14.5
Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη Τελικού Προϊόντος (LHV) [MJ/kg]	21.5
Θερμική απόδοση λέβητα [%]	90

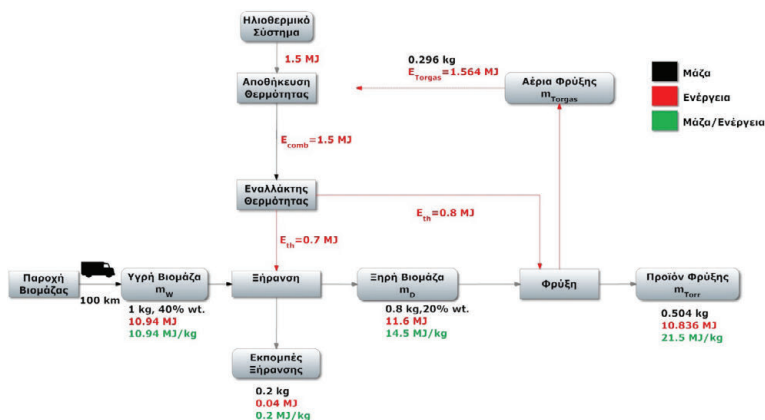
Πίνακας 2: Δεδομένα συστήματος φρύξης ανά σενάριο			
	Σενάριο		
	1	2	3
Εισερχόμενα			
Βιομάζα (kg)	1000	1009	1000
Συμβατικά καύσιμα – (Diesel) (kWh)	80.6	51.7	51.2
Εξερχόμενα			
Τελικό προϊόν (torrefied biomass)(kg)	504	504	504
Θερμικές Απώλειες (στάδιο καύσης)(MJ)	0.16	0.16	-
Αέρια φρύξης (kg)	296	296	296
Απώλειες Ξήρανσης (kg)	200	200	200
Ανόργανες αέριες εκπομπές (kg)			
CO	0.0181	0.0171	0.0169
CO ₂	14.7	14.1	14.0
NO _x (eq. NO ₂)	0.00706	0.0047	0.0046
NO	0.0765	0.0773	0.0765
SO ₂	0.0125	0.0081	0.0080
Σωματίδια (kg)			
PM _{2,5} -PM ₁₀	4.06E-4	2.75E-4	2.72E-4
PM _{2,5}	1.55E-3	1.53E-3	1.52E-3



Εικόνα 4: Φρύξη στερεάς βιομάζας – Σενάριο 1



Εικόνα 5: Φρύξη στερεάς βιομάζας – Σενάριο 2



Εικόνα 6: Φρύξη στερεάς βιομάζας – Σενάριο 3

Το σύνολο της υγρής βιομάζας μεταφέρεται από απόσταση 100 km οδικώς με την χρήση φορτηγού οχήματος μέγιστου φορτίου 3.3 τόνων. Η υγρή βιομάζα με περιεκτικότητα σε υγρασία 40%, τυγχάνει ξήρανσης για μείωση της περιόδου στο 20%. Ακολουθεί το στάδιο της φρύξης ωστόσο επιτευχθεί η επιθυμητή θερμογόνος δύναμη και υγρασία του βιοκαυσίμου. Κατά την φρύξη της βιομάζας παρατηρείται μείωση της μάζας σε ποσοστό περίπου 37% (0.8 kg σε 0.504 kg). Η ταυτόχρονη μείωση του ενεργειακού περιεχομένου ανέρχεται μόλις σε 7% (11.6MJ σε 10 836 MJ), οδηγώντας έτσι σε αύξηση της ενεργειακή πυκνότητας του βιοκαυσίμου σε ποσοστό της τάξης του 48% (14.5 MJ σε 21.5 MJ). Σύμφωνα με το πρώτο σενάριο, οι θερμικές ανάγκες στο στάδιο της ξήρανσης της εισερχόμενης βιομάζας και το στάδιο της φρύξης εξασφαλίζονται από την αξιοποίηση των αερίων φρύξης και την ταυτόχρονη καύση πετρελαίου σε λέβητα με ενεργειακή απόδοση 90%. Στο δεύτερο σενάριο, αντί της χρήσης πετρελαίου, γίνεται αξιοποίηση μέρους της βιομάζας για κάλυψη των θερμικών αναγκών. Τέλος, στο τρίτο σενάριο αξιοποιείται ηλιακό θερμικό σύστημα για την παραγωγή της συνολικής απαιτούμενης θερμικής ενέργειας από το σύστημα.

5.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα της περιβαλλοντικής επίπτωσης κάθε σεναρίου εξετάζοντας συνολικά 6 κατηγορίες οι οποίες εμπίπτουν στην μεθοδολογία CML 2001, όπως αναφέρεται στην ενότητα 3.

Η Εικόνα 7 απεικονίζει στα αριστερά την περιβαλλοντική επίδραση κάθε σεναρίου όσον αφορά το φαινόμενο του θερμοκηπίου (Global Warming Potential-GWP 100 years) σε περίοδο 100 χρόνων, με μονάδα μέτρησης τα ισοδύναμα κιλά διοξειδίου του άνθρακα (kg of equivalent CO₂). Στα δεξιά παρουσιάζεται η εκπομπή αερίων που προκαλούν οξίνιση (acidification potential - AP) μετρούμενα σε ισοδύναμα κιλά διοξειδίου του θείου (kg of equivalent SO₂).

Οι εκπομπές αερίων που προκαλούν ευτροφισμό (Eutrophication potential - EP) μετρούμενα σε PO₄-ισοδ. και αερίων που επηρεάζουν την στοιβάδα του όζοντος (Ozone Depletion Potential - ODP) μετρούμενα σε CFC 11-ισοδ., φαίνονται στην Εικόνα 8 αριστερά και δεξιά αντίστοιχα. Ο ευτροφισμός ορίζεται ως η υπέρμετρη αύξηση των θρεπτικών στοιχείων σε συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Η εκτίμηση της αλλοίωση της στοιβάδας του όζοντος προκύπτει από τον υπολογισμό του δυναμικού διαφόρων ουσιών που σχετίζονται με το όζον οι οποίες κατηγοριοποιούνται σε δύο ομάδες: τους χλωροφθοράνθρακες (CFCs) και τα οξείδια του αζώτου (NO_x).

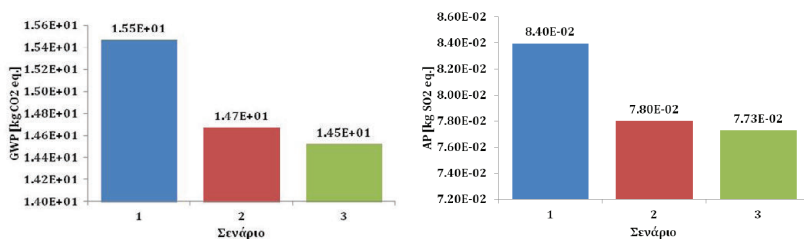
Η τελευταία κατηγορία που εξετάστηκε αφορά την μείωση μη ανανεώσιμων υλικών. (Εικόνα 9). Η επίδραση των τριών σεναρίων στη μείωση μη ανανεώσιμων υλικών εξετάστηκε μέσα από δύο υποκατηγορίες όπως προβλέπονται στην μεθοδολογία CML 2001. Οι δύο υποκατηγορίες είναι:

- Στοιχεία (Elements) μετρούμενα σε Sb-ισοδ.
- Συμβατικά καύσιμα. (Fossils) μετρούμενα σε MJ

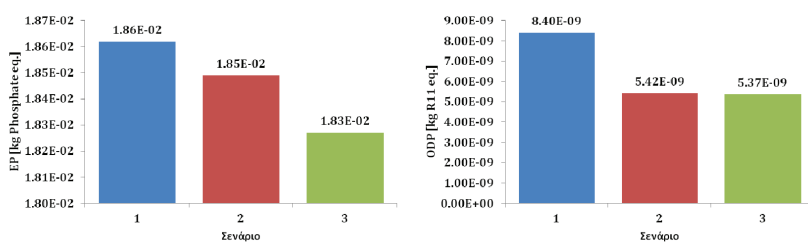
Τα αποτελέσματα της περιβαλλοντικής αποτίμησης των τριών σεναρίων καταδεικνύουν την βελτίωση που προκύπτει από την εφαρμογή των σεναρίων 2 και 3 συγκριτικά με τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από την αξιολόγηση του σεναρίου 1. Η αξιοποίηση μέρους της βιομάζας στο σενάριο 2 και η χρήση ηλιοθερμικού συστήματος στο σενάριο 3 για την παραγωγή θερμότητας, οδηγούν σε βελτίωση των δεικτών αερίων εκπομπών που προκύπτουν. Ενδεικτικά καταγράφεται μείωση 5.6% και 6.7% στις εκπομπές CO, 4.1% και 4.8% στις εκπομπές CO₂, 33.5% και 34.9% στις εκπομπές NO_x και 35.2% και 36% στις εκπομπές SO₂ αντίστοιχα. Όσον αφορά τις εξεταζόμενες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων που αναφέρονται στην ενότητα 3, με βάση την ανάλυση κύκλου ζωής των τριών σεναρίων παρατηρείται βελτίωση στα σενάρια 2 και 3 έναντι του πρώτου ως ακολούθως:

- GWP 100 years: 5.2% και 6.5%,

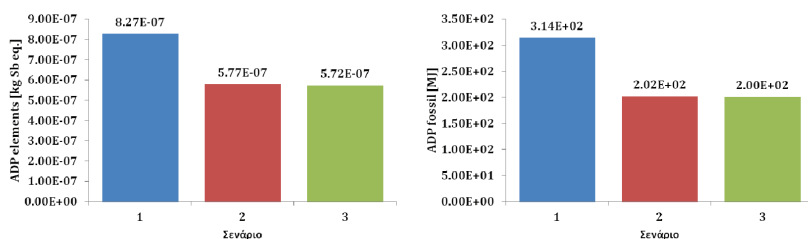
- AP: 7.2% και 8%,
- EP: 0.06% και 0.017%,
- ODP: 35.5% και 36.1%,
- ADP elements: 30.3% και 30.9%,
- ADP fossils: 35.7% και 36.3%.



Εικόνα 7: GWP (αριστερά) και AP (δεξιά) των συστημάτων φρύξης βιομάζας



Εικόνα 8: EP (αριστερά) και ODP (δεξιά) των συστημάτων φρύξης βιομάζας



Εικόνα 9: ADP-(elements) (αριστερά) και ADP (fossil) (δεξιά) των συστημάτων φρύξης βιομάζας

Η διαδικασία της μεταφορά της βιομάζας στο σημείο ενεργειακής αξιοποίησης της επηρεάζει σημαντικά την συνολική περιβαλλοντική αποτίμηση ενός συστήματος ή προϊόντος όπως αναφέρεται και σε άλλες μελέτες ανάλυσης κύκλου ζωής. [14]

Πίνακας 3: Περιβαλλοντική αποτίμηση σεναρίων - συγκριτικά αποτελέσματα

Σενάριο	GWP [kg CO ₂ - Equiv.]	AP [kg SO ₂ - Equiv.]	EP [kg Phosphate- Equiv.]	ODP [kg R11- Equiv.]	ADP Elements [kg Sb- Equiv.]	ADP Fossils [MJ]
1	1.55E+01	8.40E-02	1.86E-02	8.40E-09	8.27E-07	3.14E+02
2	1.47E+01	7.80E-02	1.85E-02	5.42E-09	5.77E-07	2.02E+02
3	1.45E+01	7.73E-02	1.83E-02	5.37E-09	5.72E-07	2.00E+02

6. ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η ποσοτική εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός συστήματος είναι δυνατή μέσω της μεθοδολογίας της ανάλυσης κύκλου ζωής. Στην παρούσα μελέτη παρουσιάστηκε το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της θερμοχημικής διεργασίας της φρύξης και αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα όπως έχουν προκύψει από την εξέταση διαφορετικών σεναρίων που αφορούν την κάλυψη των θερμικών αναγκών που προκύπτουν στα πλαίσια της διεργασίας. Η ανάλυση κύκλου ζωής και τα αποτελέσματα της μελέτης υποδεικνύουν φανερά την ύπαρξη περιθωρίων βελτίωσης και ανάπτυξης της διεργασίας της φρύξης σε επίπεδο ενεργειακής κατανάλωσης και αποδοτικότητας μέσω της αντικατάστασης των συμβατικών καυσίμων και την προώθηση της χρήσης βιομάζας και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εξέταση των διαφόρων σεναρίων, η αξιοποίηση μέρους της πρώτης ύλης για παραγωγή θερμότητας και η χρήση ηλιοθερμικού συστήματος για κάλυψη των θερμικών αναγκών στα στάδια της ξήρανσης και φρύξης μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τους δείκτες περιβαλλοντικής επίδρασης του συστήματος και να μειώσουν τις αέριες εκπομπές που προκύπτουν από το σύστημα φρύξης βιομάζας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Uslu, A., Faaij, A. P. C., Bergman, P. C. A., 2008, "Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation," Energy, 33, pp. 1206-1233.
- [2] Bergman, P. C. A., 2005, "Combined torrefaction and pelletisation - the TOP process," ECN Report, ECN-C--073.
- [3] Bergman, P. C. A., Boersma, A. R., Kiel, I. H. A., Prins, M.J., Ptasiński, K.J., Janssen, F. G. G. J., 2005, "Torrefied biomass for entrained-flow gasification of biomass," ECN Report, ECN-C--05-026.
- [4] Bergman, P. C. A., Boersma, A. R., Kiel, J. H. A., Zwart, R. W. R., 2005, "Development of torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations." BIOCOAL concept version, ECN report.
- [5] Bergman, P. C. A., Boersma, A. R., Zwart, R. W. R., Kiel, J. H. A., 2005, "Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations," BIOCOAL concept version, ECN report, ECN-C--05-013.
- [6] van der Stelt, M. C. J., Gerhauser, H., Kiel, J. H. A., Ptasiński, K. J., 2011, "Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review," Biomass Bioenerg., 35, pp. 3748-62.
- [7] EN ISO 14040:2006: Environmental management - Life cycle assessment – Principles and framework (ISO 14040:2006).

- [8] Kaliyan, N., Morey, R. V., Tiffany, D. G., Lee, W. F., 2014, "Life cycle assessment of a corn stover torrefaction plant integrated with a corn ethanol plant and a coal fired power plant," *Biomass Bioenerg*, 63, pp. 92-100.
- [9] Pirraglia, A., Gonzalez, R., Saloni, D., Denig, J., 2013, "Technical and economic assessment for the production of torrefied ligno-cellulosic biomass pellets in the US," *Energy Convers Manage*, 66, pp. 153-164.
- [10] GaBi 6: Software-System and Databases for Life Cycle Engineering. Copyright, TM. Stuttgart, Echterdignen. 1992-2013
- [11] CML, 2001, "CML's impact assessment methods and characterisation factors," Leiden University, Institute of Environmental Science (CML).
- [12] Gursel, A. P., Masanet, E., Horvath, A., Stadel, A., 2014, "Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review," *Cement Concrete Comp*, 51, pp. 38-48.
- [13] Batidzirai, B., Mignot, A. P. R., Schakel, W. B., Junginger, H. M., Faaij, A. P. C., 2013, "Biomass torrefaction technology: Techno-economic status and future prospects," *Energy*, 62, pp. 196-214.
- [14] Christoforou, E., Kylili, A., Fokaides, P. A., Ioannou, I., 2014, "The life cycle assessment (LCA) of adobe as a construction material," *J. Cleaner Prod.*, Submitted.

