

Αιολική - Υδραυλική - Κυματική ενέργεια

ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: ΥΠΑΡΧΟΥΝ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ;

Ιάσωνας Κρητικός^{1*}, Κων/νος Γκαράκης²

^{1*} Διπλ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός ΕΜΠ

² Τμήμα Μηχανικών Ενεργειακής Τεχνολογίας, ΤΕΙ Αθήνας
e-mail: jasonkritikos@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με βάση τα στοιχεία που έχει συλλέξει η ερευνητική ομάδα από την αναπτυσσόμενη δραστηριότητα στο χώρο της θαλάσσιας αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα, επιχειρείται μια αποτίμηση της μέχρι σήμερα προόδου σε ρυθμιστικό και αδειοδοτικό πλαίσιο, καθώς και μία εκτίμηση των δυνατοτήτων και της προοπτικής ανάπτυξης θαλασσίων αιολικών πάρκων (ΘΑΠ) μέχρι το 2030.

Λαμβάνονται υπόψη οι νέες νομοθετικές ρυθμίσεις στα πλαίσια των στόχων του "Target model" και αξιολογείται η ως τώρα πρόοδος των επενδυτικών σχεδίων για την υλοποίηση ΘΑΠ στην Ελλάδα μέσα από την αγορά αιολικής ενέργειας. Παρουσιάζεται ένα case study ανάπτυξης ΘΑΠ στον ελλαδικό χώρο όπου αναλύονται όλες οι τεχνικές, κατασκευαστικές και οικονομικές παράμετροι ενός τέτοιου εγχειρήματος. Επιπλέον εντοπίζονται προβλήματα που αναμένεται να προκύψουν ενώ τέλος επιχειρείται μια εκτίμηση της μελλοντικής ανάπτυξης των ΘΑΠ στην Ελλάδα.

Λέξεις Κλειδιά: ελληνικά θαλάσσια αιολικά πάρκα, προοπτική, ρυθμιστικό & αδειοδοτικό καθεστώς, υποβρύχια καλώδια, υπεράκτιος υποσταθμός.

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.

Η νέα κοινή Ευρωπαϊκή πολιτική για την ενέργεια επιβάλλει στα Κράτη Μέλη δεσμευτικούς στόχους για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (ΑΤΘ), την εξοικονόμηση ενέργειας και τη διείσδυση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο ενεργειακό τους σύστημα. Η πολιτική αυτή, γνωστή και ως «Ενεργειακό Πακέτο» ή «τα τρία 20», στοχεύει σε ισόποσες βελτιώσεις στους τρεις παραπάνω ενεργειακούς άξονες μέχρι το 2020. Συγχρόνως τίθεται και ο μακροπρόθεσμος στόχος για μείωση των εκπομπών ΑΤΘ κατά 60-80% μέχρι το 2050 [1].

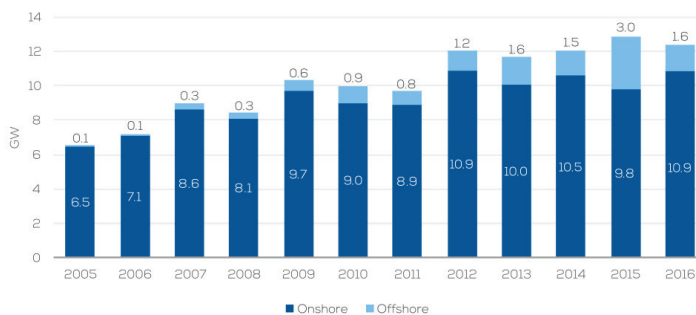
Βάσει των κοινοτικών και εθνικών ενεργειακών στόχων του 2030, πρόταση της Ελλάδας είναι να αυξηθεί ο στόχος για τη διείσδυση στο ενεργειακό μείγμα των ΑΠΕ από το 27% στο 30%. Όμως η πρωτοφανής οικονομική κρίση και η ύφεση που πλήττει την Ελλάδα δεν επέτρεψε την επίτευξη ικανού ρυθμού εγκατάστασης αιολικής ισχύος που να προοιωνίζει την επίτευξη όχι μόνον αυτού του στόχου αλλά και του προϋφιστάμενου για διείσδυση ΑΠΕ σε ποσοστό 20% έως το 2020.

Οι αναλύσεις δείχνουν ότι οι τεχνολογίες που θα χρησιμοποιηθούν στην ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ μέχρι το 2020 είναι αυτές που είναι ήδη διαθέσιμες στην αγορά, τεχνικά ώριμες και οικονομικά αποδοτικές. Για τη χώρα μας αυτό σημαίνει την αξιοποίηση της αιολικής και υδροηλεκτρικής ενέργειας κατά κύριο λόγο, αλλά και της ηλιακής και γεωθερμικής. Ειδικά για την αιολική ενέργεια, η επιδιωκόμενη εγκατεστημένη ισχύς για αιολικά πάρκα για το 2014 ισούται με 4.000 MW ενώ για το 2020, 7.500MW συμπεριλαμβανομένων των θαλάσσιων αιολικών πάρκων (εξαιρούνται τα έργα που θα ενταχθούν στη διαδικασία της ταχείας αδειοδότησης “fast track”) [2].

Σύμφωνα με την EWEA και την έκθεση Pure Power III (2011) [3] για την Ελλάδα αναφέρεται στο απαισιόδοξο σενάριο της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος των 6500MW το 2020, ότι δεν θα έχει υλοποιηθεί κανένα ΘΑΠ. Στο αισιόδοξο σενάριο της εγκατάστασης 8500MW αιολικών εγκαταστάσεων το 2020, εκτιμάται ότι θα έχουν εγκατασταθεί 200 MW ΘΑΠ στη χώρα μας.

Δεδομένης της κατάληψης των πλέον ανεμολογικά ικανοποιητικών τοποθεσιών στην ξηρά από επενδυτικές προτάσεις οι οποίες βρίσκονται είτε σε φάση σχεδιασμού ή υλοποίησης ή λειτουργίας, είναι σκόπιμο να εξεταστεί η βιωσιμότητα επενδύσεων στον τομέα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα, η οποία εμφανίζει πρωτόγνωρη ανάπτυξη την τελευταία πενταετία στην Ευρώπη [4] και έχει ήδη καταφέρει την επίτευξη ευθέως ανταγωνιστικού κόστους ενέργειας σε σύγκριση με συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [5]. Στην εικόνα 1 παρουσιάζεται η εγκατεστημένη ισχύς αιολικών στη ξηρά και στη θάλασσα ανά έτος στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε).

Annual onshore and offshore wind installations in the EU



Εικόνα 1: Εγκατεστημένη ισχύς αιολικών στη ξηρά και στη θάλασσα ανά έτος στην Ε.Ε. [5].

Αρκετές επενδυτικές προτάσεις στον τομέα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα βρίσκονται σε αρκετά προκαταρκτικό στάδιο, η υλοποίησή τους όμως είναι αμφίβολη εξαιτίας του υψηλού επενδυτικού κόστους σε συνάρτηση με την πολιτική αστάθεια και τα δημοσιονομικά προβλήματα της χώρας κατά την τελευταία οκταετία.

2. ΣΚΟΠΟΣ

Στην παρούσα εργασία η ερευνητική ομάδα μέσα από την επαγγελματική της ενασχόληση με τον κλάδο της αιολικής ενέργειας επιχειρεί την αποτίμηση της μέχρι τώρα πορείας της θαλάσσιας αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα μέσα από το ρυθμιστικό και αδειοδοτικό πλαίσιο και την αγορά. Εκτιμούνται οι δυνατότητες και οι προοπτικές της ανάπτυξης ΘΑΠ μέχρι το 2030 και παρουσιάζεται ως περίπτωση μελέτης το ΘΑΠ Αλεξανδρούπολης με ανάλυση των τεχνικών/κατασκευαστικών και οικονομικών παραμέτρων του.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η έρευνα είναι κατά βάση περιγραφική, λόγω της επιθυμίας μας να εκτιμήσουμε τα χαρακτηριστικά μιας δεδομένης κατάστασης. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην αμεροληψία όσο αναφορά την οργάνωση της έρευνας, τις προδιαγραφές της και το σχεδιασμό της. Επιπλέον ενσωματώνει μια μελέτη περίπτωσης ΘΑΠ στην Ελλάδα.

Πραγματοποιείται ανασκόπηση και έλεγχος των διαθέσιμων πληροφοριών από διαθέσιμες πηγές αλλά και το προσωπικό αρχείο των συγγραφέων σχετικά με την θαλάσσια αιολική ενέργεια στην Ελλάδα για την εκπλήρωση των στόχων της έρευνας. Δευτερογενή στοιχεία αντλούνται από τα τεχνικά φυλλάδια και την τεχνική βιβλιογραφία περί ανάπτυξης και χωροθέτησης ΘΑΠ. Η έρευνα είναι μεϊκή, ποσοτική και ποιοτική. Η ποιοτική έρευνα στοχεύει στη συλλογή στοιχείων που δεν μπορούν να μετρηθούν άμεσα και είναι βοηθητική της ποσοτικής. Το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας σε αυτή την εργασία είναι ποσοτική.

4. ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΟ & ΑΔΕΙΟΔΟΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Τον Ιούνιο του 2010 το νομοθετικό πλαίσιο άλλαξε εντελώς όσο αναφορά την ανάπτυξη ΘΑΠ στην Ελλάδα (Ν. 3851/2010) και προβλέπει διαγωνιστική διαδικασία. Σύμφωνα με το νέο νόμο, μέσω των ειδικών σχεδίων που υποβάλλονται σε διαδικασία Στρατηγικής Περιβαλλοντικής Εκτίμησης, κατά τις διατάξεις της ΚΥΑ ΥΠΕΧΩΔΕ/ΕΥΠΕ/οικ.107017/2006 (Β' 1225), καθορίζεται η ακριβής θέση των θαλάσσιων αιολικών πάρκων, η θαλάσσια έκταση που καταλαμβάνουν και η μέγιστη εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς τους.

Η αλλαγή αυτή στην ουσία ακύρωσε κάθε προσπάθεια επενδυτών από το 2001 για την ανάπτυξη ΘΑΠ στην Ελλάδα και έβαλε τέλος στην χρηματοδότηση δραστηριοτήτων για την τεχνική ανάπτυξη-μελέτη και αδειοδότηση αυτών των έργων (ακύρωση μετρητικών προγραμμάτων ακόμη και εντός θαλασσίων περιοχών αλλά και ειδικών μελετών απεικόνισης βυθού κτλ). Επίσης, συνεργασίες ελληνικών εταιρειών με ειδικευμένες εταιρείες-συμβούλους και utilities του εξωτερικού πάγωσαν.

Ο νόμος αυτός επέτρεψε την δημιουργία αιολικών πάρκων εντός του εθνικού θαλάσσιου χώρου και εγκαίνιασε μια καινούργια κεντρική διαδικασία για την αδειοδότηση τους. Το πρώτο βήμα της διαδικασίας ήταν η εκπόνηση Στρατηγικών Μελετών Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΣΜΠΕ) για διάφορες πιθανές περιοχές. Η πιθανές αυτές περιοχές επιλέχθηκαν βάσει μιας προκαταρκτικής χωροθέτησης και παρουσιάστηκαν σε σχετική εκδήλωση του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής τον Ιούνιο του 2010. Στην συνέχεια οι αναλυτικές μελέτες αυτές υποβλήθηκαν σε μια διαδικασία στρατηγικής περιβαλλοντικής εκτίμησης και έτσι καθορίστηκαν οι ακριβείς θέσεις, η θαλάσσια έκταση που καταλαμβάνουν και η μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς των πιθανών υπεράκτιων θαλάσσιων πάρκων που θα μπορούσαν να έχουν κατασκευαστεί από το 2012 έως το 2017 (1η φάση προγράμματος ΘΑΠ).

Βάσει του νόμου αυτού (3851/2010) θεωρήθηκε ότι για να εξασφαλιστεί η οικονομική απόδοση μιας τέτοιας επένδυσης η οποία θα εξασφάλιζε με την σειρά της την ταχύτητα ανάπτυξης επιλέχθηκαν ανεμογεννήτριες πακτωμένες στον πυθμένα (τύποι θεμελιώσεων tripod, monopile, jacket, combined jacket with tower) και οι περιοχές που εξετάστηκαν ήταν με μικρά (< 30 m) και μέσα βάθη (< 50m). Η τεχνολογία των πλωτών ανεμογεννητριών (floating) δεν λήφθηκε υπόψη για αυτή την 1η φάση γιατί

θεωρήθηκε ότι δεν είχε μελετηθεί ακόμα αρκετά αλλά αναφέρεται ότι θα εξεταστεί στην 2η φάση του προγράμματος που αφορά τα έτη 2017-2025.

Ελήφθησαν υπόψη οι προτάσεις διαφόρων υποψήφιων επενδυτών τα κριτήρια για την επιλογή των θαλάσσιων περιοχών που τέθηκαν στην προκαταρκτική χωροθέτηση ήταν :

- Το αιολικό δυναμικό της περιοχής (χρησιμοποιήθηκε μόνο ως κριτήριο αξιολόγησης και όχι απόρριψης)
- Η συμβατότητα των αιολικών πάρκων με άλλες χρήσεις της συγκεκριμένης περιοχής εντός των 6 ναυτικών μιλίων
- Οι επιπτώσεις στο περιβάλλον
- Η υπάρχουσα τεχνολογία
- Η δυνατότητα σύνδεσης με το Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
- Η οπτική όχληση

Όσο αναφορά τις επιπτώσεις στο περιβάλλον επειδή δεν ήταν δυνατή η εκπόνηση αναλυτικών μελετών απορρίφθηκαν εξ αρχής όλες οι περιοχές του δικτύου NATURA.

Για την οπτική όχληση και την αποφυγή συγκέντρωσης μεγάλου αριθμού Α/Γ κοντά σε ακτές τέθηκαν κριτήρια καθορισμού της μέγιστης συγκέντρωσης σε συνάρτηση με το μέγεθος τους και την απόσταση από την ακτογραμμή. Οι αποστάσεις που οφείλουν να τηρηθούν από τις ακτές για πάρκα μεγάλης ισχύος είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες στο εξωτερικό για τον λόγο ότι στην Ελλάδα οι περιοχές με αβαθή νερά είναι πολύ λίγες και δεν υπήρχε η δυνατότητα απόρριψης περισσότερων περιοχών. Για αυτό τον λόγο πριν από την κατασκευή ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου θα κρινόταν απαραίτητη η πραγματοποίηση μιας έρευνας για την αποδοχή της τοπικής κοινωνίας. Επίσης περιορίστηκαν περιοχές δεσμευμένες από ΓΕΕΘΑ για στρατιωτικούς λόγους και περιοχές από όπου περνούν γνωστά υποθαλάσσια καλώδια.

Τα αποτελέσματα της προκαταρκτικής χωροθέτησης παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1: Τα αποτελέσματα της επιλογής των περιοχών κατά τη φάση της προκαταρκτικής χωροθέτησης ΘΑΠ.

	Θαλάσσιο Αιολικό Πάρκο	Προτεινόμενο Εμβαδό Πολυγώνου (km ²)	Αέρας	Δίκτυο	Βάθος	Μέγεθος	Βαθμός
		274					
1	Αη Σιράη	5	☺	☺	☺	☺	-1
2	Αλεξανδρουπολης	55	☺☺	☺	☺	☺	+2
3	Θάσου	35	☺☺	☺	☺	☺	+1
4	Καρπάθου	6	☺	☺	☺	☺	-1
5	Κέρκυρας	8	☺	☺	☺	☺	+1
6	Κρουονερίου		☺	☺	☺	☺	-1
7	Κύμης	9	☺	☺	☺	☺	+1
8	Λευκάδας	8	☺	☺	☺	☺	0
9	Λημνου	49	☺	☺	☺	☺	+1
10	Πεταλιών	25	☺	☺	☺	☺	+1
11	Σαμοθρακης	33	☺	☺	☺	☺	+1
12	Φαναρίου	41	☺☺	☺	☺	☺	+2

(Ανάλογα με την έκφραση των smiles η παράμετρος είναι ικανοποιητική, πχ γελαστό προσωπάκι σημαίνει ότι είναι θετική η παράμετρος που αναφέρεται).

Στη Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΣΜΠΕ) που εκπονήθηκε εν τέλει τον 9/2015 αντί στο τέλος του 2011 όπως προβλεπόταν, εκτιμήθηκε η προστασία του θαλάσσιου φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος και των εν γένει οικοσυστημάτων του, με έμφαση στη βιωσιμότητα της θαλάσσιας χλωρίδας, πανίδας και ορνιθοπανίδας, η εθνική ασφάλεια, η κατά προτεραιότητα ενεργειακή εξασφάλιση των νησιών και η ασφάλεια των θαλάσσιων μεταφορών. Οριζόταν ότι θα εκδοθούν προεδρικά διατάγματα για τις περιοχές αυτές, οριστική προσφορά σύνδεσης με τον Αρμόδιο Διαχειριστή και τελικά Άδεια για την υλοποίηση του ΘΑΠ με συγκεκριμένη μέγιστη ισχύ.

Μετά την έκδοση των παραπάνω Αδειών θα προκηρυσσόταν ανοιχτός δημόσιος διαγωνισμός για την εκτέλεση με χρηματοδότηση ή αυτοχρηματοδότηση των ΘΑΠ, με αντάλλαγμα την παραχώρηση, εν

όλω ή εν μέρει της εκμετάλλευσης του στον ανάδοχο για ορισμένο χρόνο. Για τη κατασκευή και τη λειτουργία του κάθε αιολικού πάρκου θα απαιτηθεί έγκριση περιβαλλοντικών όρων. Η άδεια λειτουργίας θα χορηγείτο από το Υπουργείο Ενέργειας (ΥΠΕΚΑ τότε) στον ανάδοχο.

Στις αρχές Νοεμβρίου 2010 ανακοινώθηκε ότι στην διαδικασία “fast track” θα συμπεριληφθούν και τα ΘΑΠ [6].

Κριτήρια προκαταρκτικής χωροθέτησης ΘΑΠ που ελήφθησαν υπόψη στη ΣΜΠΕ είναι τα εξής:

- Α. Αποκλεισμός προφανών περιοχών όπου η ανάπτυξη ΘΑΠ είναι ασύμβατη με άλλες χρήσεις παραμένοντας, εντός των 6 ναυτικών μιλίων
- Β. Χωροθέτηση ΘΑΠ σε απόσταση 1,5km από την ακτογραμμή
- Γ. Χωροθέτηση των ΘΑΠ σε βάθη μικρότερα των 50m για την εξασφάλιση της τεχνικής δυνατότητας εγκατάστασης ανεμογεννητριών στις συγκεκριμένες θέσεις
- Δ. Χωροθέτηση ΘΑΠ εκτός περιοχών του δικτύου NATURA 2000
- Ε. Ελαχιστοποίηση οπτικής όχλησης

Στους πίνακες 2 και 3 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι επιπτώσεις της ΣΜΠΕ.

Πίνακας 2 – Πίνακας 3: Συγκεντρωτικοί πίνακες επιπτώσεων της ΣΜΠΕ

Α/Α	Σ.Β.	Παράμετροι πολυκριτηριακής ανάλυσης	ΘΑΠ Αλιεί/πολις		ΘΑΠ Σαμοθράκης		ΘΑΠ Φαναρίου		ΘΑΠ Θάσου		ΘΑΠ Β. Αιγαίου		ΘΑΠ Ν. Αιγαίου		ΘΑΠ Αχ. Στράτης		ΘΑΠ Κύμης		ΘΑΠ Πεταλίων		ΘΑΠ Καρπάθου		ΘΑΠ Λευκάδας		ΘΑΠ Οθυνών	
			*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**
1	2	Κλιματική Αλλαγή	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	2	2	0	1	1	1	1	2	1
2	1	Φυσικό Περιβάλλον	-3	-2	-2	-1	-3	-2	-3	-1	-2	-1	-2	-1	-2	0	-1	0	-3	0	0	0	-2	-1	-2	-1
3	1	Ακουστικό Περιβάλλον	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1	Τοπίο	-3	-2	-1	-1	-2	-2	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-1	0	-2	-2	-3	-1	-2	-1	-3	-2	-2	-1
5	1	Υποδομές	-3	-2	-1	0	-1	-1	-2	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0	-3	-1	-2	-1	-3	-2	-2	-1
6	1	Παραγωγικές δραστηριότητες	-3	-2	-2	-1	-2	-1	-3	-1	-2	-1	-1	0	-1	0	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-3	-2	-2	-1
7	1	Άμεσο οικονομικό Όφελος ΟΤΑ	3	3	2	2	3	3	3	2	3	2	2	1	1	1	2	1	2	0	1	1	2	1	2	2
8	0,5	Φάση υλοποίησης	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-1	0	0	0	-2	-1	1	1	-1	-1
Σύνολο με Συντελεστής Βαρύτητας (Σ.Β.)			-3	-1	1,5	4,5	0,5	2,5	-1,5	3,5	2	4	0	2	0	4	1,5	2	-5	-3	-4	-0,5	-6,5	-3,5	-2,5	-0,5

(Κλίμακα από -3 έως +3 (από ασθενείς έως σημαντικές σε στρατηγικό επίπεδο)

Α/Α	Παράμετροι ειδικής σημασίας και προτεραιότητας	ΘΑΠ Αλιεί/πολις		ΘΑΠ Σαμοθράκης		ΘΑΠ Φαναρίου		ΘΑΠ Θάσου		ΘΑΠ Β. Αιγαίου		ΘΑΠ Ν. Αιγαίου		ΘΑΠ Αχ. Στράτης		ΘΑΠ Κύμης		ΘΑΠ Πεταλίων		ΘΑΠ Καρπάθου		ΘΑΠ Λευκάδας		ΘΑΠ Οθυνών	
		*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**	*	**
1	Ιστορικό – πολιτιστικό περιβάλλον	Γ	Δ	Β	Γ	Γ	Γ	Γ	Δ	Γ	Δ	Γ	Δ	Γ	Δ	Γ	Γ	Β	Γ	Β	Γ	Α	Β	Γ	Δ
2	Αεροπορία	Β	Β	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Β	Γ	Β	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Α	Α	Δ	Δ
3	Εθνική Άμυνα	Α	Α	Δ	Δ	Β	Β	Δ	Δ	Β	Β	Β	Β	Δ	Δ	Β	Β	Β	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	Β	Β

Όπου: * Περιοχή Εφαρμογής ΘΑΠ
 ** Προτεινόμενη Περιοχή Χωροθέτησης Α/Γ
 0 Ουδέτερη συμπεριφορά – Σχέση
 1 Ασθενής επίδραση – Επίπτωση
 2 Μέτρια επίδραση – Επίπτωση
 3 Σημαντική επίδραση – Επίπτωση

Όπου: * Περιοχή Εφαρμογής ΘΑΠ
 ** Προτεινόμενη Περιοχή Χωροθέτησης Α/Γ
 Δ Καταρχήν χωρίς προβλήματα
 Γ Πιθανό πρόβλημα
 Β Πολύ πιθανό πρόβλημα
 Α Σοβαρό θέμα – Ανάγκη επανεξέτασης

Με το Ν. 4030/2011 ανατέθηκε και πάλι στη ΡΑΕ η εξέταση των αιτήσεων που είχαν υποβληθεί προ του ν. 3851/2010 για χορήγηση άδειας παραγωγής σε ΘΑΠ, αφού στο μεσοδιάστημα το ΥΠΕΚΑ επιχείρησε να οργανώσει την εκπόνηση στρατηγικής περιβαλλοντικής μελέτης βάσει της οποίας θα ορίζονταν θέσεις για την εγκατάσταση ΘΑΠ και εν συνεχεία θα προκηρύσσονταν διαγωνισμοί για την ανάθεση των έργων σε επενδυτές. Στην ουσία καταργήθηκε το προηγούμενο καθεστώς αδειοδότησης μέσω διαγωνισμού για ΘΑΠ.

Το σχέδιο αυτό εκ των πραγμάτων αποδείχθηκε εξαιρετικά φιλόδοξο, αφού δεν κατέστη δυνατή ούτε καν η καταρχήν συνεννόηση με το Υπουργείο Εθνικής Άμυνας ενώ το χρονοδιάγραμμα που δόθηκε για διενέργεια των πρώτων διαγωνισμών εντός του 2012 ήταν ουτοπικό. Με βάση αυτά τα δεδομένα ο το ΥΠΕΚΑ επέλεξε την επαναφορά του προηγούμενου καθεστώτος ως λύση για την απεμπλοκή επενδύσεων που είχαν ήδη σχεδιαστεί. Παράλληλα μέσω της νέας ρύθμισης παρέιχε ισχυρά κίνητρα υλοποίησης των ΘΑΠ, αφού οριζόταν ως τιμή αγοράς της ενέργειας από το σύστημα τα 108,3 ευρώ

ανά MWh, η οποία μπορεί να προσαυξάνεται έως και 30% της τιμής βάσης σε περιπτώσεις έργων με σημαντικές τεχνοοικονομικές ιδιαιτερότητες όπως τα μεγαλύτερα θαλάσσια βάθη, ο βραχύδης πυθμένας κ.λπ. Επιπλέον με το νόμο αυτό απαγορεύτηκε η αίτηση για λήψης Αδειας Παραγωγής για ΘΑΠ.

Η ΡΑΕ προκειμένου να προχωρήσει στην αξιολόγηση των αιτήσεων κατάρτισε από κοινού με το ΚΑΠΕ οδηγό αξιολόγησης (ΥΑ 54/2012 – ΦΕΚ 308Β) παρόμοιων έργων λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως το βάθος ο τρόπος θεμελίωσης, το κόστος κλπ. Επίσης ζητήθηκε από τους επενδυτές να επικαιροποιήσουν τα οικονομικά στοιχεία των φακέλων τους, προκειμένου να προχωρήσει και το τελευταίο στάδιο αυτό της αξιολόγησης και της χορήγησης άδειας παραγωγής.

Στο Ν. 4414/2016 (Νέο καθεστώς στήριξης των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας) ορίστηκε ότι η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 122,5 ευρώ/MWh (1,25 x τιμή αναφοράς – 98 ευρώ/MWh) ενώ τα ΘΑΠ τίθενται εκτός διαγωνιστικών διαδικασιών.

5. ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΘΑΠ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Το επενδυτικό ενδιαφέρον για την ανάπτυξη ΘΑΠ ξεκίνησε σχετικά πρώιμα το 2001 με αιτήσεις για λήψη αδειών παραγωγής από την εταιρεία Ελληνική Energiekontor ΑΕ, (θυγατρικής της γερμανικής Energiekontor AG) και συνεχίστηκε το 2004 από αιτήσεις ελληνικών και ξένων εταιρειών το 2004 αλλά και τη περίοδο 2007-2009 και εντάθηκε μερικούς μήνες και ημέρες πριν τη ψήφιση του νόμου 3851/2010. Το πρώτο εξάμηνο του 2010 υπήρξε πληθώρα αιτήσεων για τη λήψη αδειών παραγωγής από ΘΑΠ κυρίως σε περιοχές που παλαιότερα είχαν κατατεθεί αιτήσεις και υπήρξαν αρνητικές γνωμοδοτήσεις αλλά και σε νέες περιοχές, στα πλαίσια της επικείμενης αλλαγής του νομοθετικού πλαισίου για την αξιολόγηση αυτού του είδους έργα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπήρχαν προτάσεις για διασυνδέσεις νησιών του Αιγαίου στα οποία συμπεριλαμβάνονται ΘΑΠ.

Τον Ιούλιο του 2010 υπήρχαν αιτήσεις λήψης αδειών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΘΑΠ συνολικής ισχύος περίπου 7 GW και από αυτές τα 6,5 GW βρίσκονταν σε φάση αξιολόγησης. Σε φάση Προκαταρκτικής Περιβαλλοντικής Εκτίμησης και Αξιολόγησης (ΠΠΕΑ) βρισκόταν μόνο μία αίτηση ισχύος 450MW στο Κόλπο των Πεταλιών, ανατολικά του Μαραθώνα.

Συνοπτικά το επενδυτικό ενδιαφέρον για την ανάπτυξη ΘΑΠ επικεντρώθηκε στις ακόλουθες περιοχές:

Θρακικό Πέλαγος, Νήσος Λήμνος και Νήσος Αγ. Ευστράτιος, Θαλάσσια περιοχή Β & ΒΔ της Ν. Κέρκυρας- Διαπόντιοι Νήσοι, Θαλάσσια περιοχή Β & ΒΑ της Ν. Άνδρου, Στενό του Καφηρέα, Κόλπος Πεταλιών – Κόλπος Κύμης, Όρμος Καλυδώνος – Αιτωλοακαρνανία, Κάσος – Κάρπαθος και Κως.

Συνολικά ως το Νοέμβριο του 2011 υπήρχαν 36 αιτήσεις για ΘΑΠ στην Ελλάδα ισχύος 5,5GW (πίνακας 4).

Πίνακας 4: Αιτήσεις Αδειών Παραγωγής για ΘΑΠ στη ΡΑΕ.

Επ. Αδ.	Ημ. Καταρ.	Εταιρεία	Ισχύς (MW)	Θέση	Δήμος	Νομός
Γ-00751	23/6/2004	ΚΟΙΝΟΤΡΑΣΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΠΡΑΓΕΤΑ ΜΑΡΒΑΚΙΟΥ - ΕΝ ΤΕΛΕΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΑΕ - ENORA ΕΕ - Κ. ΦΙΛΙΠΠΙΔΗΣ	30,25	ΠΑΛΑΤΕΙΑ	ΚΟΙΝ. ΜΑΡΒΑΚΙΟΥ	ΚΕΡΚΥΡΑΣ
Γ-01858	10/4/2007	ΠΛΕΙΑΔΕΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΑΕ	450	ΚΟΛΠΟΣ ΠΕΤΑΛΙΩΝ	ΝΕΑΣ ΜΑΚΡΗΣ	ΑΤΤΙΚΗΣ
Γ-02853	9/8/2007	ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΕΛΥΜΕΝΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΕΜΠΟΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΤΑΡΡΑ ΑΕ & ΣΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΠΡΟΒΑΤΑ	585	ΘΡΑΚΙΚΟ ΠΕΛΑΓΟΣ ΝΟΤΙΑ ΤΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ	ΑΛΕΞΙΠΟΛΗΣ	ΕΒΡΟΥ
Γ-02863	9/10/2007	ΘΡΑΚΙΚΗ ΑΙΟΛΙΚΗ Σ.Α.Ε.	24	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΝΟΤΙΩΣ ΤΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ	ΑΛΕΞΙΠΟΛΗΣ	ΕΒΡΟΥ
Γ-02864	9/10/2007	ΘΡΑΚΙΚΗ ΑΙΟΛΙΚΗ Σ.Α.Ε.	24	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΝΟΤΙΩΣ ΤΗΣ ΑΛΕΞΙΠΟΛΗΣ	ΑΛΕΞΙΠΟΛΗΣ	ΕΒΡΟΥ
Γ-02865	9/10/2007	ΘΡΑΚΙΚΗ ΑΙΟΛΙΚΗ Σ.Α.Ε.	24	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΝΟΤΙΩΣ ΤΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ	ΑΛΕΞΙΠΟΛΗΣ	ΕΒΡΟΥ
Γ-02866	9/10/2007	ΘΡΑΚΙΚΗ ΑΙΟΛΙΚΗ Σ.Α.Ε.	24	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΝΟΤΙΩΣ ΤΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ	ΑΛΕΞΙΠΟΛΗΣ	ΕΒΡΟΥ
Γ-02867	9/10/2007	ΘΡΑΚΙΚΗ ΑΙΟΛΙΚΗ Σ.Α.Ε.	24	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΝΟΤΙΩΣ ΤΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ	ΑΛΕΞΙΠΟΛΗΣ	ΕΒΡΟΥ
Γ-02868	9/10/2007	ΘΡΑΚΙΚΗ ΑΙΟΛΙΚΗ Σ.Α.Ε.	24	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΝΟΤΙΩΣ ΤΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ	ΑΛΕΞΙΠΟΛΗΣ	ΕΒΡΟΥ
Γ-02870	9/10/2007	ΘΡΑΚΙΚΗ ΑΙΟΛΙΚΗ Σ.Α.Ε.	24	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΝΟΤΙΩΣ ΤΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ	ΑΛΕΞΙΠΟΛΗΣ	ΕΒΡΟΥ
Γ-02871	9/10/2007	ΘΡΑΚΙΚΗ ΑΙΟΛΙΚΗ Σ.Α.Ε.	24	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΝΟΤΙΩΣ ΤΗΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ	ΑΛΕΞΙΠΟΛΗΣ	ΕΒΡΟΥ
Γ-03080	10/12/2007	ΚΟΙΝΟΤΡΑΣΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΚΑΛΥΔΩΝΟΣ II	141	ΟΡΜΟΣ ΚΑΛΥΔΩΝΟΣ	ΧΑΛΚΙΔΑΣ	ΑΙΤΩΛΟΑΚΑΡΝΑΝΙΑΣ
Γ-03254	8/2/2008	ΚΥΜΕ ΕΠΕ	300	ΘΑΛΑΣΣΙΟΣ ΧΩΡΟΣ ΔΗΜΟΥ ΚΥΜΗΣ ΚΑΙ ΔΗΜΟΥ ΑΓΑΘΩΝΟΣ	ΚΥΜΗΣ	ΕΥΒΟΙΑΣ
Γ-03552	8/8/2008	ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΕΜΟΣ Α.Ε.	162	ΣΤΟ ΘΑΛΑΣΣΙΟ ΧΩΡΟ ΒΟΡΕΙΟΔΥΤΙΚΑ ΝΗΣΩΝ ΚΕΡΚΥΡΑΣ	ΜΑΡΚΥΡΑΙΟΥ	ΚΕΡΚΥΡΑΣ
Γ-03738	10/12/2008	ΔΙΑΠΟΝΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΑ - Μ.Ε. ΤΖΑΒΑΡΑΣ ΚΑΙ ΣΙΑ Ε.Ε.	15	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΑΠΟΝΤΙΩΝ ΝΗΣΩΝ	ΟΣΙΟΝΟΝ	ΚΕΡΚΥΡΑΣ
Γ-03739	10/12/2008	ΔΙΑΠΟΝΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΠΤΑ - Ι. ΤΖΑΒΑΡΑΣ ΚΑΙ ΣΙΑ Ε.Ε.	20	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΑΠΟΝΤΙΩΝ ΝΗΣΩΝ	ΟΣΙΟΝΟΝ	ΚΕΡΚΥΡΑΣ
Γ-03737	10/12/2008	ΔΙΑΠΟΝΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΠΕΝΤΕ - Μ.Ε. ΤΖΑΒΑΡΑΣ ΚΑΙ ΣΙΑ Ε.Ε.	20	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΑΠΟΝΤΙΩΝ ΝΗΣΩΝ	ΟΣΙΟΝΟΝ	ΚΕΡΚΥΡΑΣ
Γ-03738	10/12/2008	ΔΙΑΠΟΝΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΝΕΑ - Μ.Ε. ΤΖΑΒΑΡΑΣ ΚΑΙ ΣΙΑ Ε.Ε.	30	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΑΠΟΝΤΙΩΝ ΝΗΣΩΝ	ΟΣΙΟΝΟΝ	ΚΕΡΚΥΡΑΣ
Γ-03739	10/12/2008	ΔΙΑΠΟΝΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΠΤΑ - Ι. ΤΖΑΒΑΡΑΣ ΚΑΙ ΣΙΑ Ε.Ε.	30	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΑΠΟΝΤΙΩΝ ΝΗΣΩΝ	ΟΣΙΟΝΟΝ	ΚΕΡΚΥΡΑΣ
Γ-03741	10/12/2008	ΔΙΑΠΟΝΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΤΕΣΣΕΡΑ - Ι. ΤΖΑΒΑΡΑΣ ΚΑΙ ΣΙΑ Ε.Ε.	20	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΑΠΟΝΤΙΩΝ ΝΗΣΩΝ	ΟΣΙΟΝΟΝ	ΚΕΡΚΥΡΑΣ
Γ-03742	10/12/2008	ΔΙΑΠΟΝΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΤΡΙΑ - Μ.Ε. ΤΖΑΒΑΡΑΣ ΚΑΙ ΣΙΑ Ε.Ε.	20	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΑΠΟΝΤΙΩΝ ΝΗΣΩΝ	ΟΣΙΟΝΟΝ	ΚΕΡΚΥΡΑΣ
Γ-03743	10/12/2008	ΔΙΑΠΟΝΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΟΚΤΩ - Ι. ΤΖΑΒΑΡΑΣ ΚΑΙ ΣΙΑ Ε.Ε.	5	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΑΠΟΝΤΙΩΝ ΝΗΣΩΝ	ΟΣΙΟΝΟΝ	ΚΕΡΚΥΡΑΣ
Γ-03744	10/12/2008	ΔΙΑΠΟΝΤΙΑ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΠΤΑ - Μ.Ε. ΤΖΑΒΑΡΑΣ ΚΑΙ ΣΙΑ Ε.Ε.	15	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΑΠΟΝΤΙΩΝ ΝΗΣΩΝ	ΟΣΙΟΝΟΝ	ΚΕΡΚΥΡΑΣ
Γ-03862	10/4/2009	ENERGIA ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Ε.	96	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΑΠΟΝΤΙΩΝ ΝΗΣΩΝ	ΟΣΙΟΝΟΝ	ΚΕΡΚΥΡΑΣ
Γ-04107 (Συνολική ισχύς 150MW)	12/10/2009	ARGOS AIOLIS A.E.	135	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΝΟΤΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΑ ΤΗΣ ΕΥΒΟΙΑΣ	ΚΑΡΥΣΤΙΟΥ	ΕΥΒΟΙΑΣ
Γ-04121	12/10/2009	ΤΖΑΣΤΕΡ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΛΛΑΔΟΣ ΑΕ & ΣΙΑ ΚΕΡΚΥΡΑ	275	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΑΠΟΝΤΙΩΝ ΝΗΣΩΝ	ΜΑΡΚΥΡΑΙΟΥ	ΚΕΡΚΥΡΑΣ
Γ-04122	12/10/2009	ΤΖΑΣΤΕΡ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΛΛΑΔΟΣ ΑΕ & ΣΙΑ ΚΕΡΚΥΡΑ	220	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΑΠΟΝΤΙΩΝ ΝΗΣΩΝ	ΟΣΙΟΝΟΝ	ΚΕΡΚΥΡΑΣ
Γ-04158	9/12/2009	CITY ELECTRIC AE	500	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΑ ΤΗΣ ΛΗΜΝΟΥ	ΜΟΥΔΡΟΥ	ΛΕΙΒΟΥ
Γ-04271	10/2/2010	ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΒΕΤΕ	20	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΒΟΡΕΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΑ ΤΗΣ ΛΗΜΝΟΥ	ΜΟΥΔΡΟΥ	ΛΕΙΒΟΥ
Γ-04374	12/4/2010	ΜΙΝΟΙΚΑ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ Α.Ε. (υπό σύσταση)	300	Θαλάσσια περιοχή δυτικά της Κάρπαθου και βόρεια της Κάσου	ΚΑΡΠΑΘΟΥ	ΔΥΔΗΝΗΣΟΥ
Γ-04374	12/4/2010	ΤΖΑΣΤΕΡ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΛΛΑΔΟΣ ΑΕ & ΣΙΑ ΑΝΔΡΟΣ Ε.Ε.	350	Θαλάσσιος χώρος βόρεια και βορειοανατολικά της Άνδρου	ΑΝΔΡΟΥ	ΚΥΚΛΑΔΩΝ
Γ-04372	9/4/2010	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΒΟΡΕΙΑΣ ΑΙΩΝ ΑΒΕΕ	486	Θαλάσσιος χώρος ανατολικά και νοτιοανατολικά της Σύρου	ΣΥΡΟΥ	ΛΕΙΒΟΥ
Γ-04381	12/4/2010	ΤΖΑΣΤΕΡ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΛΛΑΔΟΣ Α.Ε. & ΣΙΑ ΑΓ. ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΥ Ε.Ε.	445	Θαλάσσιος χώρος βόρεια και βορειοανατολικά Αγ. Ευστατίου	ΑΓ. ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΥ	ΛΕΙΒΟΥ
Γ-04380 (Συνολική ισχύς 98MW)	12/4/2010	ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΒΕΤΕ	35	ΑΓΙΟΣ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ και στο θαλάσσιο χώρο ΒΑ αυτού	ΑΓ. ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΥ	ΛΕΙΒΟΥ
Γ-04442	1/9/2010	ΒΟΥΛΓΑΡΑΚΗΣ Ε. ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΜΟΝΟΠΡΟΣΩΠΗ ΕΠΕ	50	ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗ ΔΙΚΕΛΛΑ - ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ	ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ	ΕΒΡΟΥ

Σύμφωνα με το Εθνικό Σχέδιο Δράσης (Ν. 3851/2010), για την επίτευξη της συμβολής των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας σε ποσοστό 20% ως το 2020, στόχος είναι να εγκατασταθούν μονάδες συνολικής ισχύος 7.500 MW αιολικής ενέργειας μέχρι το 2020, από τα οποία τα 300 MW θα προέρχονται από υπεράκτια αιολικά πάρκα. Τα αποτελέσματα Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Εθνικού Προγράμματος ανάπτυξης ΘΑΠ έδειξε όμως ότι πολλές υποψήφιες περιοχές για ΘΑΠ στην Ελλάδα αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα σχετικά με το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό τους, το κόστος ηλεκτρικής διασύνδεσής τους λόγω της απομακρυσμένης θέσης τους αλλά και το αδειοδότηση τους.

Μία από τις βασικές παραμέτρους που σχετίζονται με την επίτευξη των στόχων για τις ΑΠΕ το 2020 είναι το ρίσκο της επένδυσης λόγω της οικονομικής κρίσης και της αδυναμίας του τραπεζικού συστήματος να δώσει επαρκείς χρηματοδοτήσεις. Συγκεκριμένα, για τα ΘΑΠ η διαδικασία αδειοδότησης και οι συνεχείς μεταβολές της, το αυξημένο κόστος σε σχέση με τα χερσαία Α/Π και τα περαιτέρω περιθώρια ανάπτυξης στο χερσαίο χώρο (αλλά και σε νησιά και βραχονησίδες), θεωρείται ότι αποθαρρύνουν την προοπτική ανάπτυξής τους.

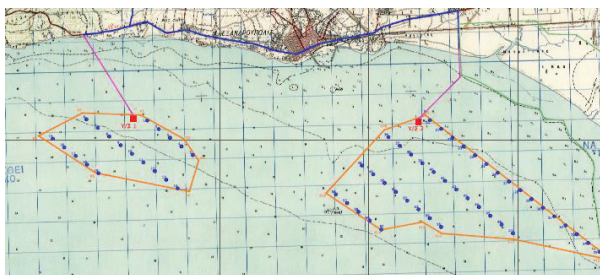
Σύμφωνα με την έκθεση της Ευρωπαϊκής Ένωσης αιολικής ενέργειας για το 2030 [7] εκτιμάται ότι στο αισιόδοξο σενάριο αν εγκατασταθούν 12.500 MW Α/Π, τα 500 MW εξ' αυτών να είναι ΘΑΠ. Οι συγγραφείς θεωρούν πολύ δύσκολη την υλοποίηση ΘΑΠ στον Ελλαδικό χώρο το 2030 και φυσικά το 2020. Η περαιτέρω ωρίμανση της τεχνολογίας και η πτώση των τιμών του εξοπλισμού μαζί με τη βελτίωση της οικονομίας της χώρας και τη συνειδητοποίηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής είναι οι παράγοντες που θα συμβάλλουν στην υλοποίηση ενός ΘΑΠ έστω με επιδεικτικό χαρακτήρα.

7. ΘΑΠ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗΣ

7.1. Συνοπτική τεχνική περιγραφή

Ο ΘΑΠ Αλεξανδρούπολης είναι συνολικής ονομαστικής ισχύος 216 MW, αποτελούμενος από συνολικά 60 α/γ τύπου Siemens SWT-3.6-120, έκαστη ονομαστικής ισχύος 3,6 MW, με διάμετρο πτερωτής 120m και ύψος πλήμνης 90m, που θα εγκατασταθούν στην θαλάσσια περιοχή νότια της πόλης της Αλεξανδρούπολης. Η χωροθέτηση των α/γ πραγματοποιείται σε παράλληλες γραμμές, κάθετα στην κύρια διεύθυνση του ανέμου με απόσταση μεταξύ των α/γ σε 4 διαμέτρους και 11 διαμέτρους μεταξύ των γραμμών. Το βάθος της θάλασσας στη περιοχή του έργου δε ξεπερνά τα 30m ενώ η απόσταση από την ακτή κυμαίνεται από 1,8 – 5,5 χλμ.

Στην εικόνα 2, παρουσιάζεται η χωροθέτηση των ανεμογεννητριών του ΘΑΠ ενώ στην εικόνα 3 παρουσιάζεται η προτεινόμενη α/γ εγκατεστημένη σε ΘΑΠ στη Βόρεια Θάλασσα.



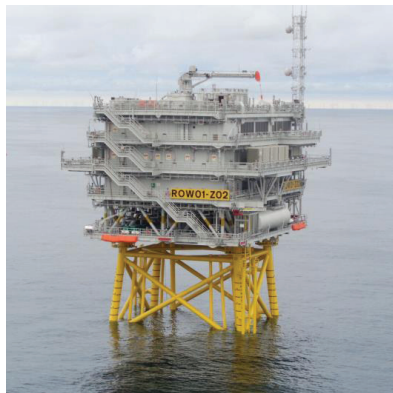
Εικόνα 2: Χωροθέτηση του ΘΑΠ Αλεξ/πολης.



Εικόνα 3: Α/γ Siemens SWT-3.6-120.

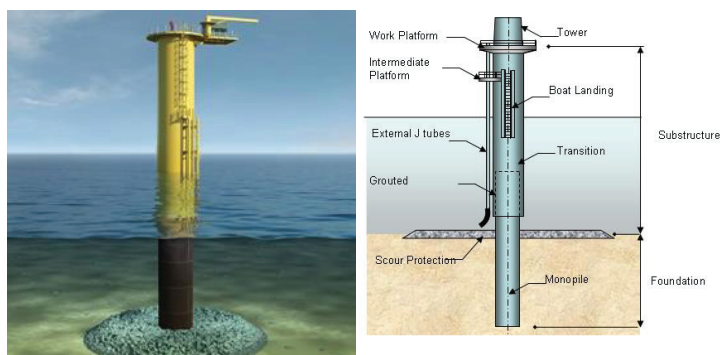
Οι Α/Γ του αιολικού σταθμού θα συνδέονται μεταξύ τους, σε κλάδους, με τριπολικά υποβρύχια καλώδια, ονομαστικής τάσεως 18/33 (36kV max.), με μόνωση από διασταυρωμένο πολυαιθυλένιο (XLPE) και με αγωγούς αλουμινίου (Al) διατομής 95, 150, 240 και 400mm². Η διατομή των καλωδίων βαίνει αυξανόμενη ανάλογα με το πλήθος των Α/Γ που συνδέονται εν σειρά σε κάθε κλάδο και ανάλογα του μήκους αυτού. Κάθε κλάδος καταλήγει στους ζυγούς Μ.Τ. ενός εκ των δύο Υ/Σ ανύψωσης τάσης 33/150kV και συνδέεται σε αυτούς μέσω κατάλληλου πεδίου Μ.Τ.

Στην εικόνα 4, παρουσιάζεται η φωτογραφία υπερράκιου υποσταθμού ανύψωσης τάσης.



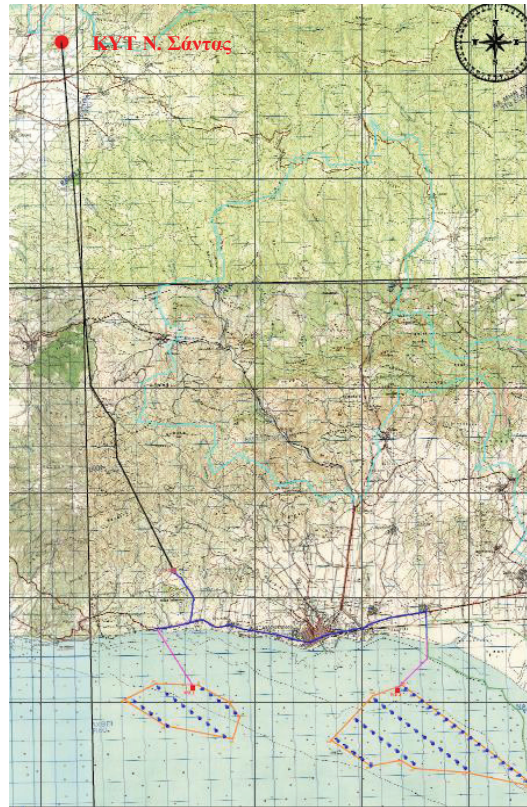
Εικόνα 4: Υπεράκτιος υποσταθμός ανύψωσης τάσης (DONG Energy's 580MW Race Bank).

Οι υπερράκτιοι υποσταθμοί ανύψωσης τάσης θα είναι κλειστού τύπου (GIS) και θα εγκατασταθούν σε καταλλήλες μεταλλικές εξέδρες κατάλληλων διαστάσεων οι οποίες θα εδράζονται σε πασσάλους πακτωμένους στον πυθμένα, όπως και οι ανεμογεννήτριες. Η μέθοδος θεμελίωσης των ανεμογεννητριών στον πυθμένα θα είναι τύπου μονοπάσσαλου (monopile). Επί του μονοπάσσαλου εγκαθίσταται το transition piece όπου τελικά πακτώνεται η ανεμογεννήτρια (Εικόνα 5).



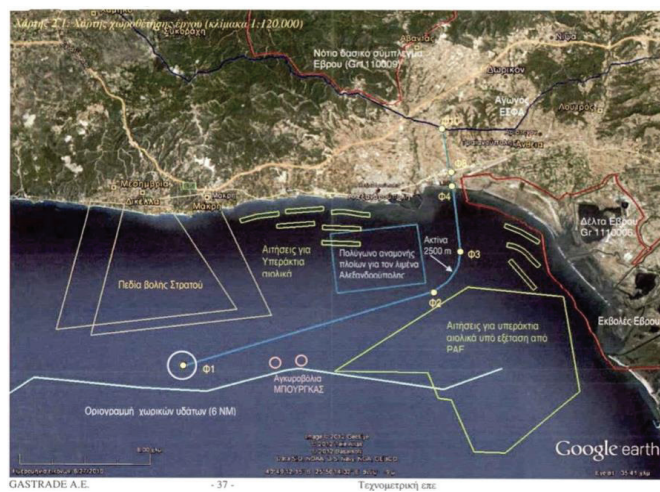
Εικόνα 5 : Μονοπάσσαλο σύστημα θεμελίωσης και transition piece.

Από κάθε υπερράκτιο υποσταθμό αναχωρεί ένα τριπολικό υποβρύχιο καλώδιο εναλλασσομένου ρεύματος 150kV, με μόνωση XLPE και με αγωγούς αλουμινίου κατάλληλης διατομής, το οποίο προσαιγιαλώνεται στην απέναντι ακτή όπου και συνδέεται, μέσω ειδικού συνδέσμου θάλασσας-ξηράς (sea-land joint), με υπόγειο κύκλωμα υψηλής τάσης. Τα δύο υπόγεια κυκλώματα υψηλής τάσης συγκλίνουν σε κοινό σκάμμα και λίγο βόρεια της Αλεξανδρούπολης ενώνονται σε εναέρια γραμμή μεταφοράς (Γ.Μ.) Υψηλής Τάσης 150kV, διπλού κυκλώματος, βαρέως τύπου (2B/150) με αγωγούς ACSR Grosbeak, εκπιμώμενου μήκους περίπου 26 χλμ, η οποία θα καταλήγει στους ζυγούς 150kV του ΚΥΤ Νέας Σάντας. Η γενική διάταξη της διασύνδεσης δίνεται στην Εικόνα 6.



Εικόνα 6 : Γενική διάταξη της διασύνδεσης.

Στην εικόνα 7 παρουσιάζονται οι χρήσεις και οι περιορισμοί της ευρύτερης περιοχής του έργου.



Εικόνα 7 : Περιορισμοί και χρήσεις στην ευρύτερη περιοχή του έργου.

7.2. Αιολικό δυναμικό και ενεργειακή εκτίμηση

Η χωροθέτηση των α/γ πραγματοποιείται σε παράλληλες γραμμές, κάθετα στην κύρια διεύθυνση του ανέμου με απόσταση μεταξύ των α/γ σε 4 διαμέτρους και 11 διαμέτρους μεταξύ των γραμμών. Σύμφωνα με δημοσιευμένους χάρτες από το Riso (DTU Wind πλέον) και την εταιρεία συμβούλων Garrad Hassan για τη περιοχή του ενδιαφέροντος δίνουν ταχύτητες ανέμου 6-7,5 m/s σε απόσταση μεγαλύτερη από τα 10km από την ακτή και 7-8m/s [8]. Στη θέση εγκατάστασης βασισμένοι στους προαναφερθέντες αιολικούς άπλαντες και τις υπάρχουσες μετρήσεις διάρκειας ενός έτους από παράκτιο ανεμολογικό ιστό η μέση ταχύτητα στο ύψος πλήμνης των α/γ (90m) ισούται με 5,6-5,7m/s σύμφωνα με τους ενεργειακούς υπολογισμούς της ερευνητικής ομάδας.

Η εκτίμηση της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής του έργου (μακροχρόνια διορθωμένης) είναι 387,8 GWh με καθαρό συντελεστή εκμετάλλευσης (Capacity Factor Net) ίσο με 20,5%. Συνοπτικά τα αποτελέσματα της ενεργειακής μελέτης παρουσιάζονται στην εικόνα 8.

Loss&Uncertainty - Main result

Calculation: Offshore windfarm 216MW - 11.2017

Main data for PARK

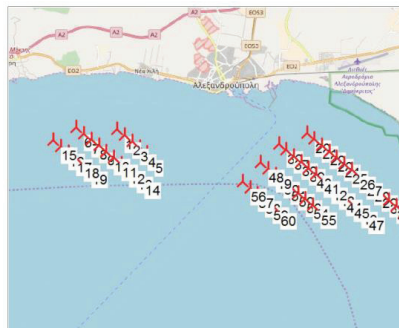
PARK calculation 3.0.654: Offshore windfarm 216MW - 11.2017

Count	60
Rated power	216.0 MW
Mean wind speed	5.6 m/s at hub height
Sensitivity	2.0 %AEP / %Mean Wind Speed
Expected lifetime	20 Years

LOSS	Method *)	Loss [%]	Loss [GWh/y]
Wake effects			
Wake effects, all WTGs	Calculation	10.6	52.7
Availability			
Turbine availability	Estimate	3.0	14.9
Grid availability	Estimate	1.0	5.0
Turbine performance			
High wind hysteresis	Calculation	0.1	0.4
Electrical			
Electrical losses	Estimate	4.0	19.8
Environmental			
Performance degradation not due to icing	Estimate	4.0	19.8
Site access and other force majeure events	Estimate	1.0	5.0
Curtailment			
Other			
LOSS, total		21.8	107.9

RESULTS

	P50
NET AEP	387.8
Capacity factor	20.5
Full load hours	1,795



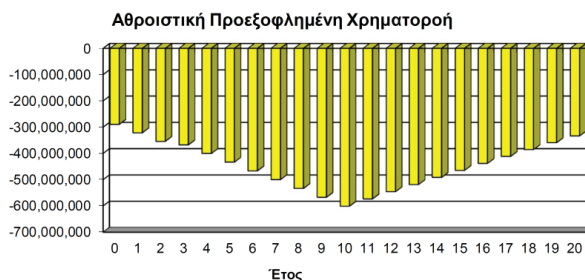
Εικόνα 8 : Συνοπτικά αποτελέσματα ενεργειακής μελέτης για το ΘΑΠ Αλεξ/πολης.

7.3. Οικονομική αξιολόγηση

Τα συνοπτικά αποτελέσματα της οικονομικής αξιολόγησης της επένδυσης παρουσιάζονται στο πίνακα 5 και στην εικόνα 9. Το έργο κρίνεται οικονομικά μη βιώσιμο.

Πίνακας 5 : Συνοπτικά αποτελέσματα οικονομικής ανάλυσης ΘΑΠ Αλεξ/πολης.

Εγκατεστημένη ισχύς	216 MW
Ετήσια ενεργειακή παραγωγή	387.893,8 MWh
Τελικός συντελεστής εκμετάλλευσης (CFnet)	20,5%
Τιμή πώλησης Η.Ε.	122,5 ευρώ/MWh
Κόστος επένδυσης	723.045.000 ευρώ
Κόστος επένδυσης ανά kW	3347 ευρώ/kW
Δάνειο	433.827.000 ευρώ (60%)
Ίδια κεφάλαια	289.218.000 ευρώ (40%)
Επιτόκιο δανεισμού	7%
Συνολικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης	17.981.210 ευρώ/έτος (2,5% CAPEX)
Έσοδα ενεργειακής παραγωγής	47.516.868 ευρώ
Καθαρή παρούσα αξία (NPV) – 20ετία	-381,27 εκ. ευρώ
Εσωτερικός βαθμός απόδοσης ιδ. κεφαλαίων	-6,4%
Χρόνος ανάκτησης κεφαλαίου (discounted)	-



Εικόνα 9 : Αθροιστική προεξοφλημένη χρηματοροή.

7.4. Πιθανά προβλήματα

Σύμφωνα με τη Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Εθνικού Προγράμματος ανάπτυξης ΘΑΠ [9] για το ΘΑΠ της Αλεξ/πολης παρουσιάζονται σοβαρά εμπόδια ως προς την δυνατότητα υλοποίησης του πέρα από τη εκτιμώμενη χαμηλή ενεργειακή του παραγωγή.

Τα κυριότερα θέματα του έργου είναι τα εξής:

- i. Ύπαρξη ισχυρών θαλασσίων ρευμάτων (θαλάσσιο αβιοτικό περιβάλλον)
- ii. Εγγύτητα σε περιοχές περιβαλλοντικής προστασίας
- iii. Επίδραση στο θαλάσσιο βιοτικό περιβάλλον (θηλαστικά, κητώδη)
- iv. Επίδραση στην ορνιθοπανίδα (σημαντικά είδη ευπαθών ειδών) – κύριος μεταναστευτικός διάδρομος.
- v. Επίδραση στις χρήσεις γης – κοινωνικο-οικονομικό περιβάλλον – τεχνικές υποδομές – ναυσιπλοΐα. Συχνή ακτοπλοϊκή συγκοινωνία, έντονη κίνηση αλιευτικών σκαφών- σκαφών αναψυχής, αυξημένη αλιευτική δραστηριότητα, κυκλοφορία τουριστικών σκαφών- κρουαζιερόπλοιων διεθνών πλόων.
- vi. Εκτείνεται εντός αλιευτικού καταφυγίου Ποταμιάς - Μπαλαούστρος
- vii. Σε μικρή απόσταση από την πόλη της Αλεξανδρούπολης και 4-7 ακτών κολύμβησης
- viii. Επίδραση στις ενόργανες διαδικασίες πτήσεις των αεροσκαφών προς το Αεροδρόμιο «Δημόκριτος» της Αλεξ/πολης. Αποκλεισμός συγκεκριμένων περιοχών από την Υπηρεσία Πολιτικής Αεροπορίας (ΥΠΑ).
- ix. Αρνητική γνωμοδότηση του ΓΕΕΘΑ για το σύνολο του ΘΑΠ Αλεξ/πολης δεδομένου ότι επηρεάζει πληθώρα συστημάτων-δραστηριοτήτων των τριών κλάδων των Ενόπλων Δυνάμεων.

Κυριότερα προβλήματα είναι η αρνητική γνωμοδότηση για μέρος του ΘΑΠ Αλεξ/πολης και η αρνητική γνωμοδότηση για το σύνολο του έργου από το ΓΕΕΘΑ. Επιπλέον η εγγύτητα στη πόλη της Αλεξ/πολης απαιτεί την διενέργεια πλήρους μελέτης θέασης (σε απόσταση 10km από το έργο). Συνάμα, η ύπαρξη του κύριου μεταναστευτικού διαδρόμου απαιτεί την εκπόνηση Ειδικής Ορνιθολογικής Μελέτης (ΕΟΜ).

Η ερευνητική ομάδα λαμβάνοντας όλα τα παραπάνω εκτιμά ότι το ΘΑΠ Αλεξ/πολης δεν είναι δυνατό να υλοποιηθεί αφού είναι οικονομικά μη βιώσιμο ενώ αδειοδοτικά παρουσιάζει σοβαρότατα προβλήματα.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αγορά της θαλάσσιας αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα παραμένει σε εμβρυακό στάδιο και τα ΘΑΠ που έχουν λάβει Άδεια Παραγωγής πλέον δεν φαίνεται να υπάρχει προοπτική υλοποίησης δεδομένης της δύσκολης δημοσιονομικής κατάστασης της χώρας, ενώ συγχρόνως στην Ευρώπη ο κλάδος αυτός αναπτύσσεται ραγδαία επιταχύνοντας οικονομίες κλίμακας και μείωση του σταθμισμένου κόστους ενέργειας ώστε να είναι ευθέως ανταγωνιστικές με συμβατικές μορφές ηλεκτροπαραγωγής.

Δεν διαφαίνεται ως το 2020 ακόμη και το 2030 ότι θα υπάρξει ανάπτυξη ΘΑΠ στην Ελλάδα, παρότι υπάρχει πρόβλεψη για 500MW από την EWEA στο αισιόδοξο σενάριο ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας.

Οι κύριοι παράγοντες που δυσχεραίνουν την ανάπτυξη της θαλάσσιας αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα είναι οι χωροταξικοί, περιβαλλοντικοί και αδειοδοτικοί περιορισμοί, το υψηλό επενδυτικό κόστος, η έλλειψη ισχυρών ηλεκτρικών δικτύων στη περιοχή του Αιγαίου, γεωπολιτικοί παράγοντες (αμφισβήτηση θαλασσίων συνόρων), υψηλό κόστος δανεισμού, υψηλή φορολογία επιχειρήσεων και επενδυτικός κίνδυνος (country risk). Εξαιτίας του υψηλού επενδυτικού κόστους των ΘΑΠ, οι επενδύσεις αυτές καθίστανται ελκυστικές μόνο σε περιοχές με ισχυρό αιολικό δυναμικό.

Η ερευνητική ομάδα θεωρεί ότι η ωρίμανση της τεχνολογίας των πλωτών α/γ τα επόμενα χρόνια, δύναται να αποτελέσει παράγοντα αξιοποίησης της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας στις Ελληνικές θάλασσες και ιδιαίτερα σε περιοχές με μεγάλα βάθη.

Αναφορικά με το ΘΑΠ Αλεξ/πολης η τεχνικο-οικονομική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε ως αποτέλεσμα της εκτίμησης ενεργειακής παραγωγής του οδηγεί με μια επένδυση μη βιώσιμη και άρα μη ελκυστική.

Συνοψίζοντας, για να ξεπεράσει το εμβρυακό στάδιο η αγορά ΘΑΠ στην Ελλάδα και να υπάρχει προοπτική εγκατάστασης τους μέχρι το 2030 απαιτείται μακροχρόνιος ενεργειακός σχεδιασμός, αποσαφήνιση του επιθυμητού ενεργειακού μείγματος και παροχή ενός πιο σταθερού και ορθότερου φορολογικού και εν γένει επενδυτικού περιβάλλοντος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ερευνητική Πρόταση στη ΓΓΕΤ “Δημιουργία Εθνικού Προγράμματος Αξιοποίησης του Υπεράκτιου Αιολικού Δυναμικού του Αιγαίου - ΑΥΡΑ”, σελ.11, Αθήνα Οκτώβριος 2009.
- [2] Υ.Α Φ1/οικ 19598 11/10/2010 - ΦΕΚ Β' 1630/11-10-2010.
- [3] Justin Wilkes, Christian Kjaer and Rémi Gruet, European Wind Energy Association, 2011 “Pure Power Wind energy targets for 2020 and 2030” Διαθέσιμο: http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Pure_Power_III.pdf (πρόσβαση 01.11.2017)
- [4] WindEurope, 2/2017, “Wind in Europe ” 2016 European statistics. Διαθέσιμο: <https://windeurope.org/about-wind/statistics/european/wind-in-power-2016/> (πρόσβαση 01.11.2017)
- [5] EWEA report “Delivering offshore wind power in Europe” Διαθέσιμο: http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/Delivering_Offshore_Wind_Power_in_Europe.pdf, (πρόσβαση 04.11.2017)
- [6] Ιστοσελίδα energia.gr – “Μεσω fast track τα θαλάσσια αιολικά» Διαθέσιμο: www.energia.gr/article.asp?art_id=41656, (πρόσβαση 04.11.2017)
- [7] EWEA, 2015 “Wind energy scenarios for 2030”, pp.15. Διαθέσιμο: <https://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/EWEA-Wind-energy-scenarios-2030.pdf> (πρόσβαση 04.11.2017)
- [8] Gkarakis, K., Spentos Z., Yannopoulos An., Kiosses I., 2009. Offshore wind sector and wind energy potential in Greece. EWEA European Offshore Wind 2009 Conference, Stockholm.
- [9] ΚΑΠΕ, 2015 Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Εθνικού Προγράμματος ανάπτυξης ΘΑΠ. Διαθέσιμο: http://www.cres.gr/kape/publications/pdf/MIS_sept15/MIS%20375406%20_ENVECO_SMPE.pdf (πρόσβαση 04.11.2017)

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΟΥΡΥΞΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΕΠΑΓΟΜΕΝΩΝ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ

Ηρώ Μαλεφάκη¹, Ευστάθιος Κωνσταντινίδης^{1*}

¹Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας
Μπακόλα και Σιαλβέρα, Κοζάνη 50132, Ελλάδα
e-mail: ekonstantinidis@uowm.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Συνήθως οι κατασκευές που υπόκεινται σε ρευστοδυναμικά επαγόμενες ταλαντώσεις σχεδιάζονται με σκοπό να ελαχιστοποιείται η κόπωση που προκαλείται λόγω αυτού του φαινομένου. Ωστόσο, άρχισε πρόσφατα να εξετάζεται η ιδέα να ενισχυθούν οι ταλαντώσεις αυτές προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η συγκομιδή ενέργειας από περιβαλλοντικές ροές όπως ο άνεμος και τα υδάτινα ρεύματα. Στην παρούσα μελέτη έγινε μαθηματική μοντελοποίηση ενός τέτοιου μετατροπέα υδροκινητικής ενέργειας μέσω μηχανικών γωνιακών ταλαντώσεων ενός κυλινδρικού σώματος οι οποίες επάγονται ρευστοδυναμικά εξαιτίας της περιοδικής έκλυσης δινών στον ομόρροο. Αναπτύχθηκαν κατάλληλα μοντέλα για την περιγραφή της κίνησης του κυλίνδρου ο οποίος μπορεί να εκτελεί γωνιακές ταλαντώσεις ως προς το κέντρο στήριξης ενός μοχλοβραχίονα ενώ ο κύλινδρος βρίσκεται εγκάρσια σε ελεύθερο ρεύμα και των δυνάμεων που ασκούνται στον κύλινδρο από το ρευστό. Το υδροδυναμικό μοντέλο βασίζεται στην αποικοδόμηση της συνολικής δύναμης που ασκείται στον κύλινδρο σε συνιστώσες διέγερσης και αντίδρασης με βάση τη στιγμιαία σχετική ταχύτητα μεταξύ του ταλαντούμενου κυλίνδρου και του ελεύθερου ρεύματος. Η μη-γραμμική διαφορική εξίσωση του συζευγμένου μοντέλου επιλύθηκε αριθμητικά για την παραγωγή αποτελεσμάτων. Εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις ανάλογα με το εάν ο κύλινδρος είναι τοποθετημένος ανάντη ή κατάντη του στροφέα και διερευνήθηκε διεξοδικά η επίδραση του μήκους του μοχλοβραχίονα στήριξης καθώς και του συντελεστή απόσβεσης της κίνησης του συστήματος μετατροπής. Τα αποτελέσματα έδειξαν γενικά ότι η επίδραση των διάφορων παραμέτρων του μετατροπέα είναι αρκετά περίπλοκη λόγω της μη-γραμμικότητας της εξίσωσης κίνησης. Συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η περίπτωση όπου ο ταλαντούμενος κύλινδρος βρίσκεται ανάντη του στροφέα είναι πιο κατάλληλη από ενεργειακή σκοπιά καθώς εκμεταλλευόμαστε ταλαντώσεις υψηλότερων συχνοτήτων. Ανεξάρτητα από τη διάταξη του μετατροπέα, υπάρχει ένας βέλτιστος λόγος απόσβεσης του συστήματος με τιμή κοντά στο 10% για τον οποίο ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα μεγιστοποιείται και φτάνει μια τιμή κοντά στο 12%.

Λέξεις Κλειδιά: *Υδροκινητική ενέργεια, Εξόρυξη ενέργειας, Ανανεώσιμες πηγές, Αλληλεπίδραση ροής και κατασκευής, Μαθηματική μοντελοποίηση.*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Λαμβάνοντας υπόψη την εξάντληση των ενεργειακών αποθεμάτων που βασίζονται κατά κύριο λόγο στα συμβατικά καύσιμα, όπως οι γαιάνθρακες (ανθρακίτης, λιγνίτης, λιθάνθρακες), το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, καθώς και τις σοβαρές περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις εξαιτίας της χρήσης τους, κρίνεται επιβεβλημένη η αναζήτηση καινούργιων και νέων τεχνολογιών για την παραγωγή ενέργειας. Τα υδάτινα σώματα της Γης, αντιπροσωπεύουν τεράστιο τμήμα του πλανήτη και η αργή και σταθερή κίνησή τους, αντιπροσωπεύει, επίσης, έναν πολύ μεγάλο αλλά μέχρι στιγμής αναξιοποίητο ενεργειακό πόρο. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που αξιοποιείται προκύπτει από τη χρήση φαγμάτων σε συνδυασμό με υδροηλεκτρικές γεννήτριες. Σήμερα, υφίστανται πολλές τεχνολογίες εξόρυξης υδροκινητικής ενέργειας αλλά δε βρίσκονται ακόμη σε ανταγωνιστική θέση να ανταποκριθούν λόγω ποικίλων περιορισμών. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως απαιτείται νεότερη και λιγότερο παρεμβατική τεχνολογία, περιβαλλοντολογικά, ικανή να ανταποκριθεί στην ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας.

Μια υποσχόμενη νέα τεχνολογία είναι η εκμετάλλευση ρευστοδυναμικά επαγόμενων μηχανικών ταλαντώσεων για την εξόρυξη υδροκινητικής ενέργειας. Τέτοιες ταλαντώσεις είναι γνωστές από και παίζουν σημαντικό ρόλο σε πληθώρα εφαρμογών της μηχανικής. Για παράδειγμα, είναι γνωστό ότι ο άνεμος μπορεί να δημιουργήσει μεγάλες και ενδοχόμενες επικίνδυνες δυνάμεις εφελκυσμού σε κατασκευές όπως καμινάδες ή κρεμαστές γέφυρες ενώ τα θαλάσσια ρεύματα μπορούν παρομοίως να προκαλέσουν ταλαντώσεις σε υπεράκτιες κατασκευές όπως είναι οι πλατφόρμες και οι υποβρύχιοι αγωγοί άντλησης υδρογονανθράκων από τον πυθμένα της θάλασσας, με αποτέλεσμα να δημιουργείται κόπωση στους αγωγούς και κατά συνέπεια να μειώνεται η διάρκεια ζωής τους. Είναι γνωστό ότι τέτοιες ταλαντώσεις οφείλονται στην περιοδική έκλυση δινών στον ομόρρου των κατασκευών και την ρευστό-ελαστική αλληλεπίδραση ροής και κατασκευής, ένα φαινόμενο που είναι γνωστό με τον αγγλικό όρο Vortex-Induced Vibration εν συντομία VIV.

Σε αντίθεση με τις ανεπιθύμητες επιπτώσεις που έχει η διέγερση ρευστοδυναμικών ταλαντώσεων σε ορισμένες εφαρμογές όπως αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω, η ιδέα να εκμεταλλευτούμε τέτοιες ταλαντώσεις για την παραγωγή ενέργειας έχει αρχίσει να συγκεντρώνει ενδιαφέρον καθώς η ερευνητική κοινότητα στρέφεται σε νέες τεχνολογίες αξιοποίησης των καθαρών πηγών ενέργειας, όπως η αιολική και η υδροκινητική ενέργεια. Ως πλεονεκτήματα τέτοιων διατάξεων αναφέρονται εδώ η απλότητά τους και το εύρος δυνατής λειτουργίας, δηλαδή η αποδοτική λειτουργία τους σε μεταβαλλόμενες συνθήκες, π.χ. απρόβλεπτες μεταβολές της ταχύτητας ροής με τον χρόνο, συνθήκες κάτω από τις οποίες η λειτουργία συμβατικών τεχνολογιών όπως οι ανεμογεννήτριες και οι υδροστρόβιλοι, γίνεται προβληματική. Σε αυτές τις νέες τεχνολογίες αξιοποίησης του ενεργειακού δυναμικού, η ερευνητική προσπάθεια αποσκοπεί στην ενίσχυση της ενέργειας της ταλάντωσης ώστε να είναι δυνατή η τεχνική και οικονομική αξιοποίησή της. Ωστόσο, η έρευνα στο πεδίο αυτό βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο, και απαιτείται εντατικοποίηση της βασικής έρευνας, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε χρήσιμο τελικό αποτέλεσμα.

Λόγω του τεχνολογικού και επιστημονικού ενδιαφέροντος που παρουσιάζει το φαινόμενο VIV υπάρχει σχετικά εκτενής βιβλιογραφία που συνοψίζεται σε άρθρα ανασκόπησης [1-3]. Συνήθως, οι κατασκευές που υπόκεινται σε VIV ταλαντώσεις σχεδιάζονται με σκοπό να ελαχιστοποιείται η κόπωση που προκαλείται λόγω αυτού βασιζόμενοι σε μαθηματικά μοντέλα που προβλέπουν την απόκρισή τους. Πρόσφατα, όμως, προτάθηκε η ιδέα, να γίνει εκμετάλλευση τέτοιων ρευστοδυναμικά επαγόμενων ταλαντώσεων με στόχο την συγκομιδή ενέργειας από περιβαλλοντικές ροές.

Η πιο γνωστή διάταξη για την αξιοποίηση της ενέργειας από το VIV κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας μια ερευνητική ομάδα στο πανεπιστήμιο του Michigan [4]. Οι Bernitsas *et al.* σχεδίασαν έναν μετατροπέα ενέργειας τον οποίο ονόμασαν VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy). Ο μετατροπέας VIVACE λειτουργεί χρησιμοποιώντας ένα κύλινδρο τοποθετημένο οριζόντια στο νερό και περιορίζοντάς τον σ' ένα βαθμό ελευθερίας με κίνηση κάθετη στο επίπεδο της ταχύτητας του ρέοντος ρευστού. Ασκοούνται εναλλασσόμενες δυνάμεις διέγερσης στον κύλινδρο, ωθώντας τον πάνω και κάτω. Αυτή η κίνηση μετατρέπεται στη συνέχεια σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω ενός μηχανισμού εκμετάλλευσης της παραγόμενης ισχύος.

Πιο πρόσφατα, οι Koide *et al.* [5] μελέτησαν μια πιο πολύπλοκη διάταξη που περιελάμβανε έναν ταλαντούμενο κύλινδρο και ένα δευτερεύον σώμα τοποθετημένο εγκάρσια στον πρωτεύων κύλινδρο με στόχο την επαύξηση του πλάτους ταλάντωσης για την ενεργειακή τροφοδοσία αυτόνομων οργάνων μέτρησης. Οι Wang *et al.* [6], εκμεταλλεύτηκαν τις διακυμάνσεις της πίεσης του ομόρρου ενός

τραπεζοειδούς μη αεροδυναμικού σώματος για την ταλάντωση ενός εύκαμπτου διαφράγματος που συνδέεται με ένα μόνιμο μαγνήτη. Έπειτα, αναπτύχθηκε ένα θεωρητικό μοντέλο για τη μελέτη της επίδρασης των παραμέτρων του συστήματος στην παραγωγή ενέργειας. Οι Mehmood *et al.* [7], ερεύνησαν αριθμητικά τη συγκομιδή ηλεκτρικής ενέργειας από το VIV κυλίνδρου χρησιμοποιώντας ένα πιεζοηλεκτρικό μετατροπέα. Βρέθηκε πως υφίσταται μια βέλτιστη τιμή της αντίστασης του φορτίου για την οποία μεγιστοποιείται η ισχύς, αλλά η βέλτιστη αυτή περίπτωση, δε συμπίπτει με το μεγαλύτερο εύρος ταλαντώσεων. Οι Hobbs και Hu [8], διερεύνησαν πειραματικά την εξόρυξη ενέργειας από μια γραμμική συστοιχία τεσσάρων κυλίνδρων, όπου κάθε κύλινδρος ήταν προσαρτημένος σε έναν αισθητήρα πιεζοηλεκτρικής ενέργειας. Έγινε μελέτη της επίδρασης της απόστασης μεταξύ των κυλίνδρων και της ταχύτητας της ροής στην παραγόμενη ισχύ. Οι κύλινδροι που ήταν τοποθετημένοι κατάντη, βρέθηκε ότι παράγουν μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας από αυτούς που ήταν τοποθετημένοι ανάντη. Επίσης, διαπιστώθηκε πως η ισχύς αυξάνεται μόνο μέχρι τον τρίτο κύλινδρο για χαμηλές ταχύτητες ανέμου, αλλά συνεχίζει να αυξάνεται για υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, γεγονός που υποδηλώνει πως ο βέλτιστος αριθμός συσκευών συλλογής ενέργειας εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds. Τέλος, οι Barrero-Gil *et al.* [9] μελέτησαν τη συγκομιδή υδραυλικής ισχύος από το VIV χρησιμοποιώντας ένα ημι-εμπειρικό μοντέλο. Η διαδικασία παραλαβής της ενέργειας μοντελοποιήθηκε με ένα γραμμικό αποσβεστήρα, ενώ για τις ανεξάρτητες μεταβλητές της εξίσωσης κίνησης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από πειράματα εξαναγκασμένων ταλαντώσεων. Επίσης, εξετάστηκε η επίδραση του λόγου μαζών και του συντελεστή απόσβεσης στην απόδοση και βρέθηκε σχετικά υψηλή απόδοση σε ένα μεγάλο εύρος της μειωμένης ταχύτητας για μικρότερες τιμές του αδιάστατου λόγου μαζών.

Από την παραπάνω βιβλιογραφική ανασκόπηση, προκύπτει εύκολα το συμπέρασμα πως η συγκομιδή ενέργειας από ρευστοδυναμικά επαγόμενες ταλαντώσεις είναι μια αρκετά πρόσφατη τεχνολογία. Η τεχνολογία αυτή έχει ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές τεχνικές εξόρυξης υδροκινητικής ενέργειας. Οι περισσότεροι μετατροπείς που βασίζονται σε υδροστρόβιλους λειτουργούν αποτελεσματικά μόνο σε ρεύματα μεγαλύτερα από 2 m/s, ενώ ένας μετατροπέας που εκμεταλλεύεται την έκλυση των δινών, ενδεχομένως, να μπορεί να ανταπεξέλθει και σε βραδύως κινούμενα ρεύματα. Συγκεκριμένα, η συσκευή VIVACE μπορεί να εξαγάγει ενέργεια από ρεύματα ταχύτητας 0.25 m/s, ενώ ο μέγιστος βαθμός απόδοσης είναι 22%. Επίσης, μια σημαντική πτυχή αυτής της τεχνολογίας, είναι πως υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής ενέργειας χωρίς να υπάρξει παρέμβαση και αλλοίωση του φυσικού περιβάλλοντος.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μαθηματική μοντελοποίηση μιας καινοτόμας διάταξης για την εξόρυξη υδροκινητικής ενέργειας που βασίζεται σε γωνιακές ταλαντώσεις υψηλών συχνοτήτων ενός κυλινδρικού σώματος ως προς κάποιο σημείο στήριξης με τη χρήση μοχλοβραχίονα. Μια τέτοια διάταξη μελετήθηκε πρόσφατα με εκτέλεση πειραματικών μετρήσεων της απόκρισης [10]. Μέσω της μελέτης που παρουσιάζεται στη συνέχεια, επιθυμούμε να διερευνήσουμε διεξοδικά την επίδραση που έχουν οι διάφορες παράμετροι και να εκτιμήσουμε το βαθμό απόδοσης ενός ανάλογου μετατροπέα υδροκινητικής ενέργειας.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1. Μηχανολογικό μοντέλο

Η παρούσα μελέτη βασίζεται στη μοντελοποίηση μιας καινοτόμου διάταξης για την εξόρυξη υδροκινητικής ενέργειας μέσω ρευστοδυναμικά επαγόμενων ταλαντώσεων. Η διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 1 και περιλαμβάνει ένα επιμήκη κύλινδρο διαμέτρου, D , ο οποίος συνδέεται με μοχλοβραχίονα μήκους, r . Ο άξονας του κυλίνδρου βρίσκεται εγκάρσια σε ελεύθερο ρεύμα ρευστού και μπορεί να εκτελεί περιστροφικές (γωνιακές) ταλαντώσεις ως προς το κέντρο στήριξης του μοχλοβραχίονα λόγω του φαινομένου VIV. Στην γωνιακή κίνηση του μοχλοβραχίονα ανθίσταται η δύναμη ελατηρίων τα οποία τείνουν να επαναφέρουν τον κύλινδρο σε μια κεντρική θέση ισορροπίας. Εξετάζονται δύο διαφορετικές διευθετήσεις της μηχανολογικής διάταξης. Στην πρώτη περίπτωση ο άξονας περιστροφής βρίσκεται ανάντη του ταλαντούμενου κυλίνδρου ενώ στη δεύτερη περίπτωση ο άξονας περιστροφής τοποθετείται κατάντη του κυλίνδρου. Η βασική υπόθεση που εξετάζεται στην παρούσα μελέτη είναι ποια είναι η επίδραση του μήκους του μοχλοβραχίονα στην ταλαντωτική απόκριση του κυλίνδρου καθώς υπόκειται σε VIV.

Η μηχανολογική διάταξη μοντελοποιήθηκε ως ένα σύστημα μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα όπου τα ρευστοδυναμικά φορτία θεωρούνται ομοιόμορφα διανεμημένα κατά τον άξονα του κυλίνδρου. Στον πλαισίο αυτό αρκεί να ληφθεί υπόψη η δύναμη που ασκεί το ρευστό σε μια δισδιάστατη τομή του

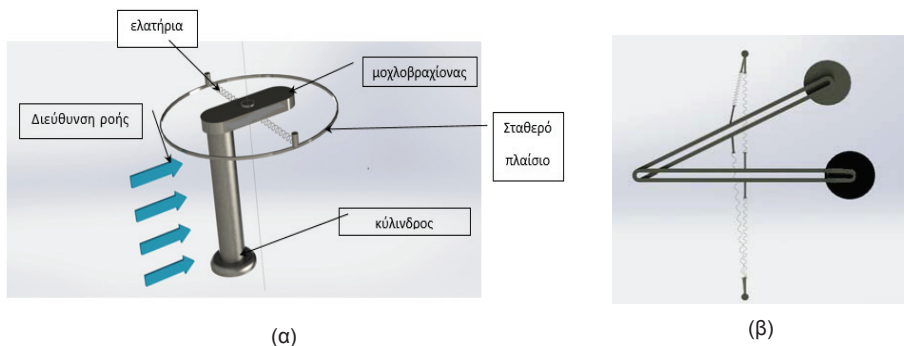
κύλινδρου. Η εξίσωση κίνησης του κύλινδρου προκύπτει από το ισοζύγιο ροπής ως προς τον άξονα περιστροφής και γράφεται ως εξής:

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + c \frac{d\theta}{dt} + k\theta = F_\theta r \quad (1)$$

όπου I είναι η ροπή αδράνειας, c είναι το μέτρο απόσβεσης, k είναι ο συντελεστής στιβαρότητας και F_θ η προβολή της συνολικής δύναμης που ασκεί το ρευστό στον κύλινδρο στην κατεύθυνση της στιγμιαίας γραμμικής ταχύτητάς του. Η σκληρότητα των ελατηρίων σε συνδυασμό με τη ροπή αδράνειας του κύλινδρου καθορίζουν την ιδιοσυχνότητα του μηχανολογικού συστήματος. Εισάγοντας τη φυσική ιδιοσυχνότητα του συστήματος, $f_N = (1/2\pi)\sqrt{k/I}$, και το λόγο απόσβεσης, $\zeta = c/2\sqrt{kI}$, η εξίσωση κίνησης παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + 4\pi\zeta f_N \frac{d\theta}{dt} + 4\pi^2 f_N^2 \theta = \frac{r}{I} F_\theta \quad (2)$$

Η ροπή αδράνειας υπολογίζεται δίνεται από τη σχέση $I = m(r^2 + D^2/8)$ όπου m είναι η μάζα του κύλινδρου, ο οποίος θεωρείται ότι είναι ομοιογενές σώμα. Η παραπάνω διαφορική εξίσωση μπορεί να επιλυθεί στο χρόνο δεδομένης της υδροδυναμικής δύναμης F_θ που ασκεί το ρευστό στο κύλινδρο, η οποία μοντελοποιείται στη συνέχεια.



Εικόνα 1: Η μηχανική διάταξη που μελετήθηκε: (α) τρισδιάστατη απεικόνιση, (β) τομή.

2.2. Υδροδυναμικό μοντέλο

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε ένα αναλυτικό μοντέλο για τη δύναμη που ασκεί το ρευστό στον κύλινδρο. Το υδροδυναμικό μοντέλο βασίζεται στην αποικοδόμηση της ολικής δύναμης που ασκείται στον κύλινδρο σε συνιστώσες αντίδρασης και διέγερσης με βάση τη στιγμιαία σχετική ταχύτητα μεταξύ του κινούμενου κύλινδρου και του ελεύθερου ρεύματος. Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2, το ελεύθερο ρεύμα έχει ομοιόμορφη ταχύτητα, U_∞ , και ο κύλινδρος έχει γραμμική ταχύτητα, U_c , σε κάποια χρονική στιγμή. Προσέξτε ότι το ελεύθερο ρεύμα ρέει από τα αριστερά προς τα δεξιά.

Η δύναμη αντίδρασης, F_R , είναι αντίθετη προς τη στιγμιαία σχετική ταχύτητα, U_{rel} , η οποία προκύπτει από τη διανυσματική διαφορά των ταχυτήτων του κύλινδρου μείον του ελεύθερου ρεύματος ενώ η δύναμη διέγερσης δρα κάθετα προς τη στιγμιαία σχετική ταχύτητα. Μπορεί να αποδειχθεί ότι η δύναμη διέγερσης οριζόμενη κατά αυτό τον τρόπο οφείλεται αποκλειστικά στις εκλυόμενες δίνες που διαμορφώνουν το πεδίο στροβιλότητας στον ομόρροτο του κύλινδρου [11].

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα των διανυσμάτων στην Εικόνα 2, η συνολική υδροδυναμική δύναμη κατά τη διεύθυνση της στιγμιαίας γραμμικής ταχύτητας του κύλινδρου είναι

$$F_{\theta} = F_{L_{\theta}} + F_{R_{\theta}} = F_L \left(\frac{U_{\infty} \cos \theta}{U_{rel}} \right) - F_R \left(\frac{r\dot{\theta} + U_{\infty} \sin \theta}{U_{rel}} \right) \quad (3)$$

όπου θ είναι η γωνία που σχηματίζει ο μοχλοβραχίονας με την διεύθυνση του ελεύθερου ρεύματος (οριζόντιο) και $\dot{\theta} = d\theta/dt$ είναι η γωνιακή ταχύτητα του κυλίνδρου.

Η δύναμη αντίδρασης περιλαμβάνει τόσο τη δύναμη λόγω αντίστασης όσο και τη δύναμη λόγω προστιθέμενης μάζας και μοντελοποιείται μέσω της μιας εξίσωσης τύπου Morison [12], ήτοι

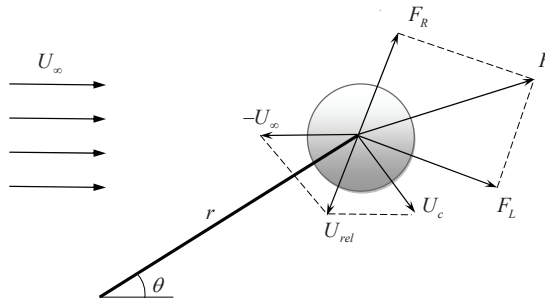
$$F_R = \frac{1}{4} \rho \pi D^2 C_A \frac{dU_{rel}}{dt} + \frac{1}{2} \rho D C_D U_{rel}^2 \quad (4)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού, C_A και C_D είναι οι υδροδυναμικοί συντελεστές προστιθέμενης μάζας και αντίστασης, αντίστοιχα. Η δύναμη αντίδρασης επιλέγεται να μοντελοποιηθεί μέσω της εξίσωσης Morison με στόχο να εισαχθεί και η δύναμη που ασκείται στον κύλινδρο λόγω της προστιθέμενης (ή υδροδυναμικής) μάζας. Το προτεινόμενο μοντέλο βασίζεται σε μια νέα προσέγγιση για την προστιθέμενη μάζα, όπου η δύναμη αντίδρασης δρα κατά μήκος της στιγμιαίας σχετικής ταχύτητας μεταξύ του ταλαντούμενου κυλίνδρου και του ρευστού [13]. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρητική προσέγγιση ο συντελεστής προστιθέμενης μάζας λαμβάνει τιμή $C_A = 1$.

Η δύναμη διέγερσης που οφείλεται στην περιοδική έκλυση των δινών μοντελοποιείται μέσω μιας ημιτονοειδούς συνάρτησης στο χρόνο:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2 D C_L \sin(\omega t) \quad (5)$$

όπου ω είναι η συχνότητα έκλυσης δινών, t είναι ο χρόνος και C_L ο συντελεστής δυναμικής άντωσης.



Εικόνα 2: Διάγραμμα διανυσμάτων δύναμης και ταχύτητας στην πρώτη περίπτωση όπου ο κέντρο περιστροφής βρίσκεται ανάντη του κυλίνδρου.

Μια εγγενής δυσκολία στα προβλήματα δυναμικής αλληλεπίδρασης ροής και κατασκευής είναι ότι οι υδροδυναμικοί συντελεστές C_D και C_L καθώς και η συχνότητα έκλυσης δινών εξαρτώνται από την κίνηση του κυλίνδρου, δηλαδή το πλάτος και τη συχνότητα ταλάντωσης. Περαιτέρω, αυτή η εξάρτηση μεταβάλλεται με τον αριθμό Reynolds της ροής, $Re = U_{\infty} D / \nu$ όπου ν είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού. Εδώ υποθέτουμε καταρχήν ότι ο αριθμός Reynolds, $Re = U_{\infty} D / \nu$ όπου ν είναι το κινηματικό ιξώδες του ρευστού, είναι πρακτικά σταθερός. Επίσης, θεωρούμε ότι βρισκόμαστε στην περιοχή του συντονισμού (lock-in), δηλαδή η συχνότητα με την οποία εκλύονται οι δίνες ταυτίζεται με τη συχνότητα ταλάντωσης του κυλίνδρου και οι υδροδυναμικοί συντελεστές C_D και C_L λαμβάνουν σταθερές τιμές αλλά προσαυξημένες σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές για τον ίδιο αριθμό Reynolds στην περίπτωση όπου ο κύλινδρος δεν ταλαντώνεται.

2.3. Το συζευγμένο μοντέλο αλληλεπίδρασης

Αντικατάσταση των δυνάμεων αντίδρασης (4) και διέγερσης (5) στη συνολική δύναμη (3) και του αποτελέσματος στην εξίσωση κίνησης του κυλίνδρου (2), δίνει τελικά για την περίπτωση όπου το κέντρο στήριξης του μοχλοβραχίονα (στροφάς) βρίσκεται ανάντη του κυλίνδρου

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{m^* + C_A \left(L^* \frac{\dot{\theta}^*}{U^*} \right)^2 - 2L^* \frac{\dot{\theta}^*}{U^*} \sin(\theta^*) + \sin^2(\theta^*)}{1 + \left(L^* \frac{\dot{\theta}^*}{U^*} \right)^2 + 2L^* \frac{\dot{\theta}^*}{U^*} \sin(\theta^*)} \right] \frac{d^2 \theta^*}{dt^{*2}} + \\
 & \left[4\pi m^* \zeta + \frac{U^* C_A}{L^*} \frac{L^* \frac{\dot{\theta}^*}{U^*} \sin(\theta^*) \cos(\theta^*) - \left(L^* \frac{\dot{\theta}^*}{U^*} \right)^2 \cos(\theta^*)}{1 + \left(L^* \frac{\dot{\theta}^*}{U^*} \right)^2 + 2L^* \frac{\dot{\theta}^*}{U^*} \sin(\theta^*)} + \right. \\
 & \left. \frac{2}{\pi} U^* C_D \left[1 + \left(L^* \frac{\dot{\theta}^*}{U^*} \right)^2 + 2L^* \frac{\dot{\theta}^*}{U^*} \sin(\theta^*) \right] \right] \frac{d\theta^*}{dt^*} \\
 & + 4\pi^2 m^* \theta^* + \frac{2}{\pi} \frac{U^{*2}}{L^*} \left[1 + \left(L^* \frac{\dot{\theta}^*}{U^*} \right)^2 + 2L^* \frac{\dot{\theta}^*}{U^*} \sin(\theta^*) \right]^{1/2} C_D \sin(\theta^*) = \\
 & \frac{2}{\pi} \frac{U^{*2}}{L^*} \frac{\cos(\theta^*)}{\sqrt{1 + \left(L^* \frac{\dot{\theta}^*}{U^*} \right)^2 + 2L^* \frac{\dot{\theta}^*}{U^*} \sin(\theta^*)}} = C_L \sin(2\pi U^* St^*) \quad (6)
 \end{aligned}$$

όπου οι μεταβλητές t^* και θ^* έχουν αδιαστατοποιηθεί χρησιμοποιώντας τη διάμετρο του κυλίνδρου, D , και τη φυσική συχνότητα του μη-συζευγμένου συστήματος, f_N , ως χαρακτηριστικές κλίμακες.

Η εξίσωση κίνησης για τη δεύτερη περίπτωση όπου το κέντρο στήριξης του μοχλοβραχίονα (στροφάς) βρίσκεται κατάντη του κυλίνδρου έχει αντίστοιχη μορφή και δεν παρουσιάζεται εδώ χάριν συντομίας. Η κύρια διαφορά έγκειται στο αντίθετο πρόσημο που έχει ο τελευταίος όρος στο αριστερό σκέλος της εξίσωσης, το οποίο σημαίνει ότι ενώ στην πρώτη περίπτωση η υδροδυναμική αντίσταση ουσιαστικά δρα προσθετικά στη σκληρότητα των ελατηρίων, στη δεύτερη περίπτωση επιδρά απομειωτικά στη δύναμη επαναφοράς των ελατηρίων. Για να γίνει αντιληπτό το παραπάνω σχόλιο, ο τελευταίος όρος στο δεξιό σκέλος της εξίσωσης (6) μπορεί να απλοποιηθεί στην εξής μορφή $\pm (2U^{*2} C_D / \pi L^*) \theta^*$ για τις δύο περιπτώσεις αντίστοιχα.

Το μοντέλο αλληλεπίδρασης που περιγράφεται από την εξίσωση (6) περιλαμβάνει τις ακόλουθες αδιάστατες παραμέτρους:

- Ανηγγμένη ταχύτητα ροής, $U^* = \frac{U_\infty}{f_N D}$
- Λόγος μαζών, $m^* = \frac{4m}{\rho \pi D^2}$
- Λόγος απόσβεσης, $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{kI}}$

- Αδιάστατο μήκος μοχλοβραχίονα, $L^* = \frac{r}{D}$

Η εξίσωσης κίνησης (6) είναι μη-γραμμική διαφορική εξίσωση ως προς το χρόνο και επιλύεται με αριθμητική ολοκλήρωση στο λογισμικό MatLab χρησιμοποιώντας την εντολή ode23. Η εντολή αυτή επιλέγει κατάλληλα το χρονικό βήμα ολοκλήρωσης ώστε να εξασφαλίζεται υψηλή ακρίβεια στους υπολογισμούς.

Όπως θα δούμε και στα αποτελέσματα το συζευγμένο σύστημα παρουσιάζει μεγιστοποίηση του πλάτους ταλάντωσης σε κάποια αδιάστατη ταχύτητα $U^* \approx St^{-1}$ όπου η συχνότητα έκλυσης των δινών είναι πλησίον της φυσικής ιδιοσυχνότητας του μη-συζευγμένου συστήματος. Ωστόσο, η ακριβής αδιάστατη ταχύτητα όπου παρατηρείται συντονισμός τροποποιείται από τους πρόσθετους όρους ρευστο-ελαστικής αλληλεπίδρασης που εισάγονται στο συζευγμένο σύστημα.

2.4. Εκμεταλλεύσιμη ισχύς

Η ισχύς που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε με την παρούσα μηχανολογική διάταξη δίνεται από τον τύπο $P = F_\theta U_c = F_\theta r \dot{\theta}$ όπου τη δύναμη μπορούμε να υπολογίσουμε από την εξίσωση κίνησης (2), οπότε λαμβάνουμε τη στιγμιαία ισχύ ως

$$P = \left(\ddot{\theta} \dot{\theta} + 4\pi\zeta f_N \dot{\theta}^2 + 4\pi^2 f_N^2 \theta \dot{\theta} \right) I \quad (7)$$

Ωστόσο, η στιγμιαία ισχύς ως φυσικό μέγεθος έχει περιορισμένη εφαρμογή και αυτό που μας ενδιαφέρει περισσότερο είναι η μέση ισχύς σε μια περίοδο ταλάντωσης,

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \int_T P(t) dt \quad (8)$$

Αντικατάσταση της εξίσωσης (7) στο ολοκλήρωμα (8) με την υπόθεση ότι ο κύλινδρος εκτελεί περιοδικές ταλαντώσεις δίνει τελικά τον βαθμό απόδοσης

$$\eta = \frac{\langle P \rangle}{\frac{1}{2} \rho D U_\infty^3} = \frac{2\pi^2 m^* \zeta L^{*2}}{U^{*3}} \int_T \dot{\theta}^2 dt^* \quad (9)$$

όπου το ολοκλήρωμα μπορεί να υπολογισθεί από την γνωστή απόκριση ταχύτητας με αριθμητική επίλυση της μη-γραμμικής διαφορικής εξίσωσης κίνησης του κυλίνδρου.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

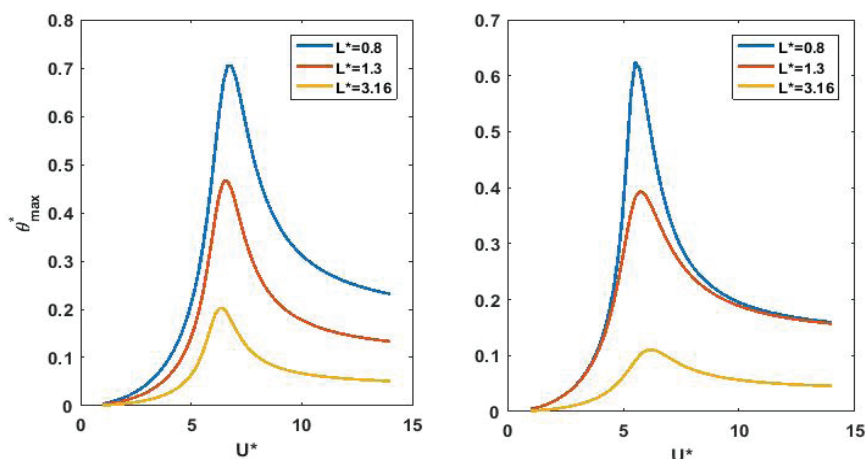
Η παρούσα μελέτη επικεντρώθηκε σε ένα λόγο μαζών ίσο προς $m^* = 5$, ο οποίος αντιστοιχεί στο λόγο της πυκνότητας του στερεών μεταλλικών κατασκευών προς την πυκνότητα του νερού, δηλαδή για εφαρμογές σε υδάτινο περιβάλλον.

3.1. Επίδραση του αδιάστατου μήκους του μοχλοβραχίονα

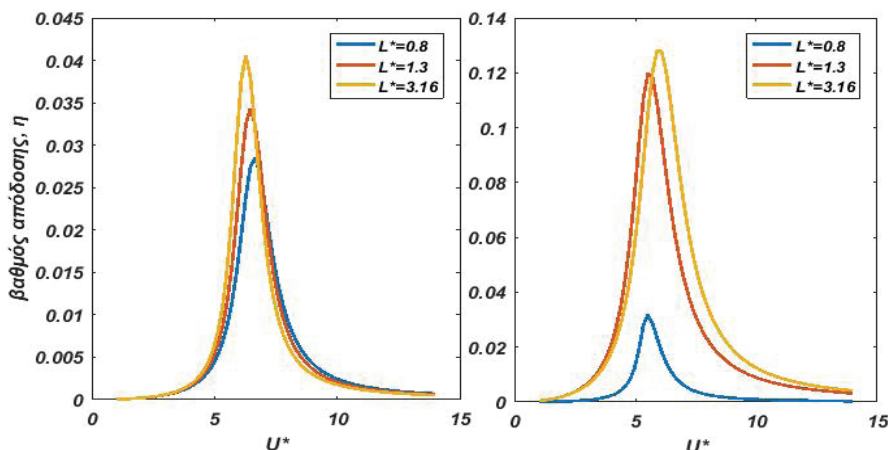
Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3, το πλάτος γωνιακής ταλάντωσης (οι τιμές αντιστοιχούν σε radians) ως συνάρτηση της ανηγμένης ταχύτητας για δεδομένο λόγο απόσβεσης και λόγο μαζών αυξάνεται καθώς μειώνεται το μήκος του μοχλοβραχίονα τόσο στην περίπτωση όπου ο στροφέας βρίσκεται ανάντη του κυλίνδρου όσο και στην περίπτωση όπου βρίσκεται κατόντη. Ωστόσο, στην πρώτη περίπτωση επιτυγχάνονται μεγαλύτερα πλάτη γωνιακής ταλάντωσης ενώ το μέγιστο παρουσιάζεται σε ελαφρώς υψηλότερες τιμές της ανηγμένης ταχύτητας σε σχέση με τη δεύτερη περίπτωση. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 3 για $L^* = 1.3$ στην περίπτωση όπου ο στροφέας βρίσκεται ανάντη του κυλίνδρου και για $L^* = 0.8$ στην περίπτωση όπου ο στροφέας βρίσκεται κατόντη του κυλίνδρου είναι σε καλή συμφωνία με την πειραματική μελέτη των Arionfard & Nishi [10] οι οποίοι μέτρησαν γωνιακά πλάτη ταλάντωσης κοντά στο 0.4 και 0.9 αντίστοιχα στις δύο περιπτώσεις.

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης με την ανηγμένη ταχύτητας για δεδομένο λόγο απόσβεσης και λόγο μαζών όπως και παραπάνω. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4, ο

βαθμός απόδοσης εξαρτάται τόσο από το πλάτος όσο και τη συχνότητα γωνιακής ταλάντωσης με αποτέλεσμα η κορυφές στις γραφικές παραστάσεις να είναι πιο επικεντρωμένες σε χαμηλές ανηγμένες ταχύτητες οι οποίες αντιστοιχούν σε μεγάλες συχνότητες ταλάντωσης. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης είναι σημαντικά χαμηλότερος στην περίπτωση όπου ο στροφέας βρίσκεται ανάντη του κυλίνδρου (αριστερά στην Εικόνα 4) συγκριτικά με την περίπτωση όπου ο στροφέας βρίσκεται κατάντη του κυλίνδρου (δεξιά στην Εικόνα 4). Αυτό οφείλεται στο ότι η δύναμη αντίστασης συνεισφέρει στη τεχνητή μείωση της σκληρότητας των ελατηρίων με αποτέλεσμα να εμφανίζονται ταλαντώσεις μεγαλύτερης συχνότητας. Άλλωστε, η προτεινόμενη διάταξη αποσκοπεί στην αξιοποίηση ταλαντώσεων υψηλής συχνότητας.



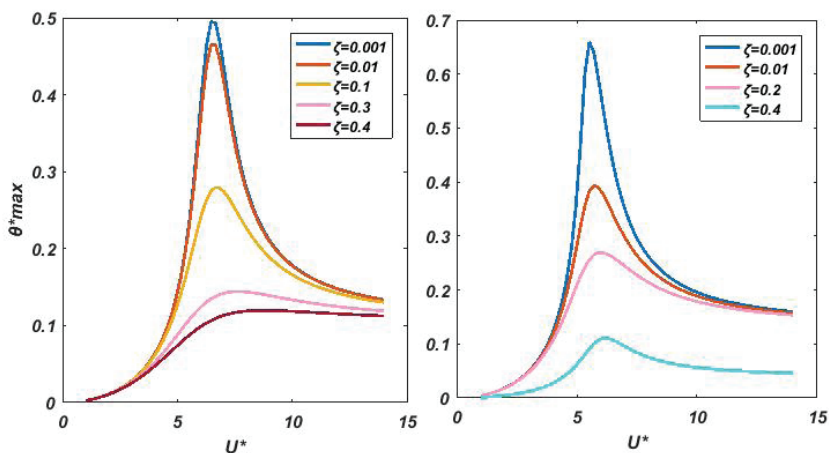
Εικόνα 3: Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης $\theta_{\max}^*$ ως συνάρτηση της αδιάστατης ταχύτητας U^* για τρεις διαφορετικές τιμές του αδιάστατου μήκους του μοχλοβραχίονα, λόγο απόσβεσης $\zeta = 0.01$ και λόγο μαζών $m^* = 5$. Αριστερά: Ο στροφέας βρίσκεται ανάντη του κυλίνδρου. Δεξιά: Ο στροφέας είναι τοποθετημένος κατάντη του κυλίνδρου.



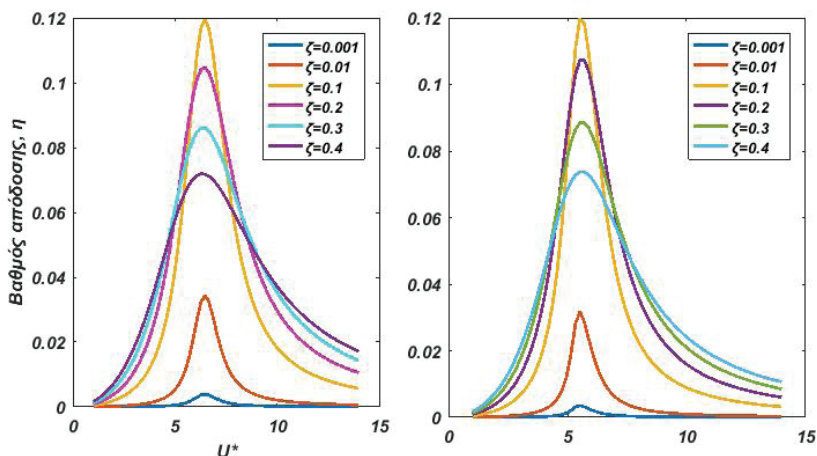
Εικόνα 4: Βαθμός απόδοσης ως συνάρτηση της αδιάστατης ταχύτητας U^* για τρεις διαφορετικές τιμές του αδιάστατου μήκους του μοχλοβραχίονα, λόγο απόσβεσης $\zeta = 0.01$ και λόγο μαζών $m^* = 5$. Αριστερά: Ο στροφέας βρίσκεται ανάντη του κυλίνδρου. Δεξιά: Ο στροφέας είναι τοποθετημένος κατάντη του κυλίνδρου.

3.2. Επίδραση του λόγου απόσβεσης

Στη συνέχεια μελετήθηκε η επίδραση που έχει ο λόγος απόσβεσης στην απόκριση του κυλίνδρου και στο βαθμό απόδοσης της διάταξης. Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5, καθώς μειώνεται ο συντελεστής απόσβεσης του συστήματος το πλάτος ταλάντωσης αυξάνει και τείνει σε κάποια μέγιστη τιμή κοντά στην τιμή 0.5 στην περίπτωση όπου ο στροφέας βρίσκεται ανάντη του κυλίνδρου (δεξιά στην Εικόνα 5) και κοντά στην τιμή 0.65 στην περίπτωση όπου ο στροφέας βρίσκεται κατάντη του κυλίνδρου (αριστερά στην Εικόνα 5). Η εξάρτηση από το λόγο απόσβεσης φαίνεται να είναι πιο σημαντική στην τελευταία περίπτωση, γεγονός το οποίο υποδεικνύει ότι η συνεισφορά των διάφορων όρων στην εξίσωση κίνησης είναι αρκετά περίπλοκη.



Εικόνα 5: Πλάτος γωνιακής ταλάντωσης $\theta_{\max}^*$ ως συνάρτηση της αδιάστατης ταχύτητας U^* για διάφορες τιμές του λόγου απόσβεσης και λόγο μαζών $m^* = 5$. Αριστερά: Ο στροφέας βρίσκεται ανάντη του κυλίνδρου και $L^* = 1.3$. Δεξιά: Ο στροφέας είναι τοποθετημένος κατάντη του κυλίνδρου και $L^* = 0.8$.



Εικόνα 6: Βαθμός απόδοσης η ως συνάρτηση της αδιάστατης ταχύτητας U^* για διάφορες τιμές του λόγου απόσβεσης και λόγο μαζών $m^* = 5$. Αριστερά: Ο στροφέας βρίσκεται ανάντη του κυλίνδρου και $L^* = 1.3$. Δεξιά: Ο στροφέας είναι τοποθετημένος κατάντη του κυλίνδρου και $L^* = 0.8$.

Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται η μεταβολή του βαθμού απόδοσης για διάφορες τιμές του λόγου απόσβεσης για δεδομένο λόγο μαζών για τις δύο περιπτώσεις διαφορετικής τοποθέτησης του κυλίνδρου ως προς το σημείο στήριξης (στροφέας) με διαφορετικό λόγο μηκών σε κάθε περίπτωση (βλ. τη λεζάντα της εικόνας). Όπως φαίνεται ο λόγος απόσβεσης έχει πολύ σημαντική επίδραση στο βαθμό απόδοσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι και στις δύο περιπτώσεις ο βαθμός απόδοσης λαμβάνει μια μέγιστη τιμή κοντά στο 12% για ένα βέλτιστο λόγο απόσβεσης $\zeta = 0.1$.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη έγινε μαθηματική μοντελοποίηση ενός μετατροπέα υδροκινητικής ενέργειας μέσω μηχανικών γωνιακών ταλαντώσεων ενός κυλινδρικού σώματος οι οποίες επάγονται ρευστοδυναμικά εξαιτίας της περιοδικής έκλυσης δινών (το φαινόμενο VIV). Εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις όπου ο στροφέας βρίσκεται είτε ανάντη είτε κατάντη του στροφέα και διερευνήθηκε διεξοδικά η επίδραση του αδιάστατου λόγου μήκους του μοχλοβραχίονα στήριξης καθώς και του λόγου απόσβεσης του μετατροπέα. Τα αποτελέσματα έδειξαν γενικά ότι η επίδραση των διάφορων αδιάστατων παραμέτρων του μετατροπέα είναι αρκετά περίπλοκη λόγω της μη-γραμμικότητας της εξίσωσης κίνησης. Η περίπτωση όπου ο ταλαντούμενος κύλινδρος βρίσκεται ανάντη του στροφέα είναι πιο κατάλληλη από ενεργειακή σκοπιά καθώς εκμεταλλευόμαστε ταλαντώσεις υψηλότερων συχνοτήτων. Ωστόσο, από την άλλη πλευρά η περίπτωση αυτή μειονεκτεί στο ότι το εύρος των ανηγμένων ταχυτήτων για τις οποίες το πλάτος ταλάντωσης και ο βαθμός απόδοσης μεγιστοποιούνται είναι συγκριτικά μικρότερο σε σχέση με την περίπτωση όπου ο ταλαντούμενος κύλινδρος βρίσκεται κατάντη του στροφέα. Το στοιχείο που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι ότι ανεξάρτητα από τη διάταξη του μετατροπέα, υπάρχει ένας βέλτιστος λόγος απόσβεσης του συστήματος με τιμή κοντά στο 10% για τον οποίο ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα είναι περίπου 12%. Το αποτέλεσμα αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς η απόσβεση του μετατροπέα σε μια πραγματική διάταξη θα περιλαμβάνει τον μηχανολογικό συντελεστή απόσβεσης και τον ηλεκτρολογικό συντελεστή απόσβεσης του συστήματος μετατροπής της ταλαντωτικής κίνησης σε ηλεκτρική ενέργεια. Συνεπώς, για δεδομένη τιμή του μηχανολογικού συντελεστή απόσβεσης, ο οποίος είναι επιθυμητό να διατηρείται σε όσο το δυνατόν χαμηλά επίπεδα, το σύστημα μετατροπής της ενέργειας σε ηλεκτρική θα πρέπει να εισάγει πρόσθετη απόσβεση ως ένα βέλτιστο βαθμό ώστε να μεγιστοποιηθεί η εκμεταλλεύσιμη ισχύς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Bearman, P.W., 1984, "Vortex Shedding From Oscillating Bluff Bodies," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 16 (1984), pp. 195-222.
- [2] Sarpkaya, T., 2004, "A Critical Review Of The Intrinsic Nature Of Vortex-Induced Vibrations," *J. Fluids Struct.*, 19, pp. 389-447.
- [3] Williamson, C.H.K., Govardhan, R., 2004, "Vortex-Induced Vibrations," *Annual Review of Fluid Mechanics*, 36(1), pp. 413-455.
- [4] Bernitsas, M. M., Raghavan, K. , Ben-Simon, Y. , Garcia, E. M. H., 2008, "VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy) A New Concept in Generation of Clean and Renewable Energy From Fluid Flow," *J. Offshore Mech. Arctic Engng* 130, article 041101.
- [5] Koide, M., Sekizaki, T., Yamada, S., Takahashi, T., Shirakashi, M., 2009, "A Novel Technique for Hydroelectricity Utilizing Vortex Induced-Vibration," *Proceedings of the ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Division Conference*, Prague, Czech Republic, July 26-30.
- [6] Wang, D.A., Chiu, C.Y., Pham, H.T. , 2012, "Electromagnetic Energy Harvesting From Vibrations Induced By Kármán Vortex Street," *Mechatronics*, 22, pp. 746-756.
- [7] Mehmood, A., Abdelkefi, A., Hajj, M., Nayfeh, A., Akhtar, I., Nuhait, A., 2013, "Piezoelectric Energy Harvesting From Vortex-Induced Vibrations Of Circular Cylinder," *J. Sound Vib.*, 332, pp. 4656-4667.
- [8] Hobbs, W.B., Hu, D.L., 2012, "Tree-Inspired Piezoelectric Energy Harvesting," *J. Fluids Struct.* 28, pp. 103-114.
- [9] Barrero-Gil, A., Pindado, S., Avila, S., 2012. "Extracting Energy From Vortex-Induced Vibrations: A Parametric Study," *Appl. Math. Model.*, 36, pp. 3153-3160.

- [10] Arionfard, H., Nishi, Y., 2017, "Experimental Investigation of a Drag Assisted Vortex-Induced Vibration Energy Converter," *J. Fluids Struct.*, 68, pp. 48–57.
- [11] Konstantinidis, E., 2017. "A physics-based model for VIV analysis." OMAE2017-62483, Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, June 25-30, 2017, Trondheim, Norway.
- [12] Morison, J. R., O'Brien, M. P., Johnson, J. W., and Schaaf, S. A., 1950. "The force exerted by surface waves on piles," *AIME Petroleum Trans*, 189, pp. 149–154.
- [13] Konstantinidis, E., 2013, "Added mass of a circular cylinder oscillating in a free stream," *Proc. Royal Soc. A*, 469, article 2156.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ WELLS

Α. Κρίκας, Κ. Βαφειάδης* και Α. Τουρλιδάκης

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΠΔΜ
e-mail: kvafiadis@uowm.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

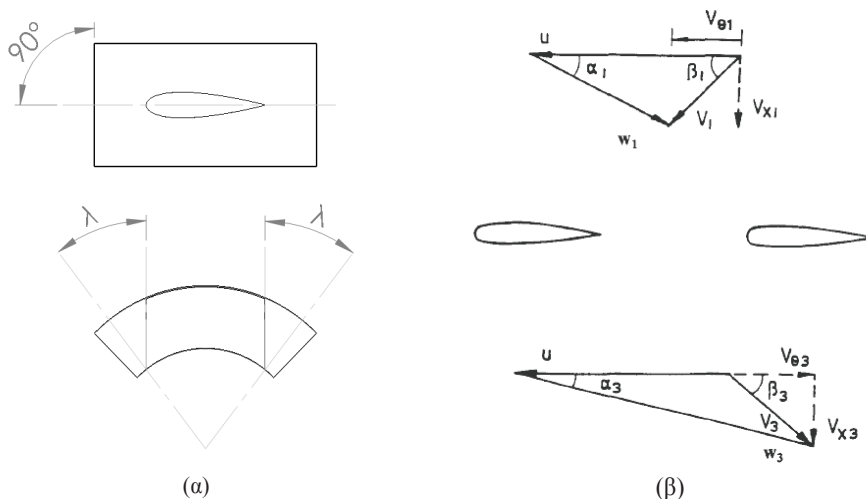
Τα κύματα των θαλασσών είναι μια σημαντική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία αν αξιοποιηθεί κατάλληλα μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας περιοχών που περιβάλλονται από θάλασσα. Πληθώρα τεχνολογιών έχουν ήδη προταθεί, μελετηθεί και σε κάποιες περιπτώσεις δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες. Μια από αυτές τις τεχνολογίες είναι ο συνδυασμός μιας ταλαντευόμενης στήλης νερού (Oscillating Water Column – OWC) και ενός στρόβιλου Wells.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της σχεδίασης και υπολογιστικής ανάλυσης ενός τέτοιου στρόβιλου για διάφορες ταχύτητες εισόδου αλλά και για διάφορες ταχύτητες περιστροφής του δρομέα. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν το ροϊκό πεδίο (ταχύτητα, πίεση και τύρβη), και τον βαθμό απόδοσης του δρομέα. Η απόδοση της διάταξης βρέθηκε να αγγίζει το 60% στις 4000 RPM πριν επέλθει απώλεια στήριξης λόγω αποκόλλησης της ροής. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με αντίστοιχα πειραματικά τα οποία προέκυψαν από μια διάταξη που κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας. Αν και δεν υπήρξε πλήρης ταύτιση υπολογιστικών και πειραματικών αποτελεσμάτων και τα δυο δείχνουν παρόμοιες τάσεις.

Λέξεις Κλειδιά: *στρόβιλος Wells, OWC, CFD, υπολογιστική ανάλυση, πειραματική μελέτη*

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα θαλάσσια κύματα αποτελούν μια σημαντική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία αν αξιοποιηθεί κατάλληλα μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές που περιβάλλονται από θάλασσα. Η παραγωγή ενέργειας από τα θαλάσσια κύματα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την Ελλάδα η οποία διαθέτει πληθώρα νησιών και μια πολύ μεγάλη ακτογραμμή (>14.000 km). Το Αιγαίο διαθέτει αξιοποιήσιμο θαλάσσιο ενεργειακό δυναμικό, η εκμετάλλευσή του οποίου θα μπορούσε να καλύψει σημαντικό ποσοστό των ενεργειακών αναγκών της χώρας. Στην Μεσόγειο Θάλασσα, η ετήσια ενεργειακή παραγωγή των ακτών των Ευρωπαϊκών χωρών κυμαίνεται από 4 έως 11 kW/m, με τις μεγαλύτερες τιμές να εμφανίζονται στην περιοχή του Νοτιοδυτικού Αιγαίου. Πληθώρα τεχνολογιών έχουν ήδη προταθεί, μελετηθεί και σε κάποιες περιπτώσεις δοκιμαστεί σε πραγματικές συνθήκες. Μια από τις πιο αποδοτικές τεχνολογίες αφορά τον συνδυασμό μιας συσκευής βασισμένης στην αρχή της ταλαντευόμενης στήλης ύδατος (Oscillating Water Column – OWC) και ενός αυτο-ανορθούμενου (self-rectifying) αεροστροβίλου, ο τρόπος λειτουργίας του οποίου καθιστά μη αναγκαία την ύπαρξη βαλβίδων ή τη διόρθωση της διεύθυνσης του αέρα, στο σύστημα. Ένας στροβίλος με αυτήν την ιδιότητα μπορεί να δέχεται τη ροή του αέρα και από τις δύο κατευθύνσεις χωρίς να αλλάζει φορά περιστροφής. Στις συσκευές OWC υπάρχει μια σταθερή ή ταλαντευόμενη κατασκευή ανοιχτά της θάλασσας και κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια της, η οποία παγιδεύει τον αέρα στο εσωτερικό της κατασκευής και πάνω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας. Η περιοδική κίνηση του κύματος συμπιέζει και αποσυμπιέζει τον παγιδευμένο αέρα, ο οποίος οδηγείται στο να περάσει μέσω ενός στροβίλου, ο οποίος με τη σειρά του μπορεί να είναι συνδεδεμένος με μια γεννήτρια. Ο στροβίλος Wells είναι από τους πιο γνωστούς και αποδοτικούς self-rectifying στροβίλους. Στην απλούστερη του μορφή ο δρομέας αποτελείται από συμμετρικά πτερύγια τα οποία είναι τοποθετημένα κάθετα στην άτρακτο (Σχήμα 1.α), χωρίς να έχει οριστεί κάποια γωνία διάταξης και με την ακμή προσβολής και φυγής να σχηματίζουν την ίδια γωνία λ με την ακτινική διεύθυνση, ενώ ανάντη και κατάντη του στροβίλου δεν είναι αναγκαίο να τοποθετηθούν οδηγητικά πτερύγια. Με τη χρήση συμμετρικών πτερυγίων η εφαπτομενική δύναμη που αναπτύσσεται στο πτερύγιο έχει την ίδια διεύθυνση ανεξάρτητα από την κατεύθυνση της ροής του αέρα. Στο Σχήμα 1.β παρουσιάζονται τα τρίγωνα ταχυτήτων του στροβίλου Wells, τα οποία προκύπτουν στη γενική τους μορφή με την τοποθέτηση οδηγητικών πτερυγίων στην είσοδο και στην έξοδο του δρομέα. Στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν οδηγητικά πτερύγια η είσοδος της ροής είναι αξονική, με τη γωνία β_1 που απεικονίζεται να ισούται με $\pi/2$. Στην παρούσα εργασία μελετάται η συμπεριφορά του στροβίλου Wells σχεδιάζοντας και αναλύοντας υπολογιστικά, κάτω από μόνιμες και μη μόνιμες συνθήκες ροής, δύο διαφορετικές γεωμετρίες, οι οποίες αποτελούν την πιο απλή εκδοχή αυτού και τα χαρακτηριστικά των οποίων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1). Η Γεωμετρία Β αξιολογήθηκε και πειραματικά.



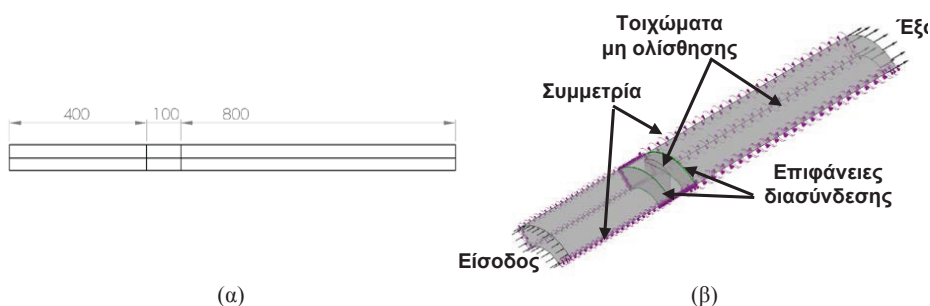
Σχήμα 1: α) Απλοποιημένο μοντέλο στροβίλου Wells και β) Τρίγωνα ταχυτήτων στροβίλου Wells με την τοποθέτηση οδηγητικών πτερυγίων στην είσοδο και στην έξοδο του δρομέα.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά των δύο γεωμετριών στροβίλου Wells

	Γεωμετρία Α	Γεωμετρία Β
Αεροτομή	NACA 0021	NACA 0021
Αριθμός πτερυγίων, N	4	4
Μήκος χορδής αεροτομής, c	100	100
Λόγος διαμέτρου βάσης προς διάμετρο κορυφής, h	0.619	0.562
Στερεότητα, σ	0.598	0.566
Διάμετρος στη βάση του πτερυγίου, Dh	163	163
Διάμετρος στην κορυφή του πτερυγίου, Dt	263	288
AR	0.5	0.625
Διάκενο κορυφής πτερυγίου-περιβλήματος στροβίλου, t	1	1

2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η μοντελοποίηση του πεδίου ροής πραγματοποιείται με την επίλυση των χρονικά μέσων εξισώσεων Navier-Stokes κατά Reynolds (Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) με χρήση του μοντέλου μεταφοράς διαμηθικών τάσεων (Shear Stress Transport-SST) [1], χρησιμοποιώντας το λογισμικό υπολογιστικής ρευστοδυναμικής ANSYS CFX. Το μοντέλο τύρβης SST, το οποίο είναι βασισμένο στο μοντέλο δύο εξισώσεων k- ω , συμπεριλαμβάνει τη μεταφορά των διαμηθικών τάσεων της τύρβης και παρέχει προβλέψεις υψηλής ακρίβειας για την έναρξη και την ποσοτικοποίηση της αποκόλλησης της ροής κάτω από συνθήκες αρνητικών κλίσεων πίεσης. Σε συνδυασμό με την προσέγγιση αυτοματοποιημένης μεταχείρισης του τοιχώματος, που χρησιμοποιούν τα μοντέλα τύρβης τα οποία επιλύουν την εξίσωση ω , και με τη δημιουργία πυκνού πλέγματος με τη χρήση ενός $y^+ \approx 1$ επιτυγχάνονται υψηλής ακρίβειας προσομοιώσεις. Η υπολογιστική ανάλυση κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής αφορούσε τον παραμετρικό έλεγχο του στροβίλου για περιστροφικές ταχύτητες αυτού ισοδύναμες με 2000, 3000 και 4000 rpm μελετώντας τα χαρακτηριστικά του για ταχύτητες εισαγωγής του αέρα από 2.5 έως 17.5 m/s σε κάθε περίπτωση, ενώ συγκεκριμένα για τη Γεωμετρία Α έγινε έλεγχος και για ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου ίση με 4500 rpm μεταβάλλοντας την ταχύτητα εισόδου του αέρα από 5 έως 14 m/s, ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά της βιβλιογραφίας. Η υπολογιστική ανάλυση κάτω από μη μόνιμες συνθήκες ροής αφορούσε τη Γεωμετρία Β και πραγματοποιήθηκε είτε μεταβάλλοντας την ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου από 0 έως 4000 rpm, ελέγχοντας οχτώ διαφορετικές ταχύτητες εισόδου του αέρα (από 2.5 έως 17.5 m/s), είτε διατηρώντας την ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου σταθερή και ισοδύναμη με 2000 rpm, μεταβάλλοντας ημιπονοειδώς την ταχύτητα εισαγωγής του αέρα με διαφορετικές συχνότητες (<1 Hz) και πλάτη ταλάντωσης. Σκοπός αυτής της ανάλυσης ήταν να εξαχθούν οι μέσες τιμές της παραγόμενης ροπής, τα χαρακτηριστικά εκκίνησης του στροβίλου καθώς και να καταγραφούν τα φαινόμενα υστέρησης που λαμβάνουν χώρα σε τέτοιες συνθήκες. Το μήκος του υπολογιστικού χωρίου και για τις δύο γεωμετρίες που μελετήθηκαν φαίνεται στο Σχήμα 2.α, ενώ το υπολογιστικό χωρίο μετά τον ορισμό του προβλήματος φαίνεται στο Σχήμα 2.β.



Σχήμα 2: α) Διαστάσεις υπολογιστικού χωρίου και β) υπολογιστικό χωρίο μετά τον ορισμό του προβλήματος.

Το υπολογιστικό χωρίο διαιρέθηκε σε τρεις επιμέρους όγκους μεταξύ των οποίων εφαρμόστηκε το μοντέλο διασύνδεσης Frozen Rotor που διατίθεται στο ANSYS. Όπως γίνεται αντιληπτό μελετάται μόνο το 1/4 της γεωμετρίας, εκμεταλλευόμενοι τη συμμετρία του στροβίλου, ορίζοντας περιοδικές συνθήκες. Τα υπολογιστικά πλέγματα αποτελούνταν από περίπου 10 εκατομμύρια κελιά το καθένα και περιελάμβανε σημαντικό αριθμό πρισματικών κελιών στις περιοχές ανάπτυξης οριακών στρωμάτων (Σχήμα 3). Τα αποτελέσματα αξιολόγησης της συμπεριφοράς του στροβίλου, κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής, εκφράζονται αρχικά με τρεις αδιάστατους όρους, οι οποίοι είναι ο συντελεστής ροπής (C_T), ο συντελεστής πίεσης (C_P) και ο βαθμός απόδοσης (η).

$$C_P = \frac{\Delta P}{\rho \omega^2 r_t^2} \quad (1)$$

$$C_T = \frac{T}{\rho \omega^2 r_t^5} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{T \omega}{\Delta P Q} \quad (3)$$

όπου, ΔP είναι η πτώση πίεσης διαμέσου του στροβίλου, η οποία υπολογίστηκε από τις μέσες τιμές στην είσοδο και την έξοδο του χωρίου του δρομέα, ρ η πυκνότητα του εργαζόμενου μέσου, T η παραγόμενη ροπή από τον στρόβιλο ως προς τον άξονα περιστροφής του, ω η γωνιακή ταχύτητα του στροβίλου, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (4)$$

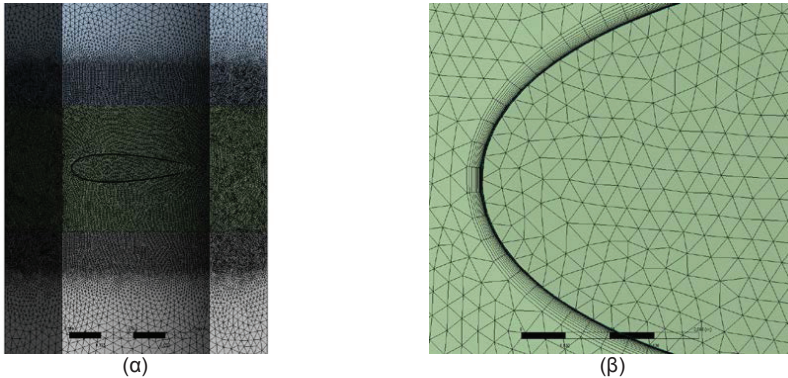
και Q η παροχή μάζας στην είσοδο της κάθε γεωμετρίας, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Q = C \cdot A \quad (5)$$

όπου, A η διατομή που ρέει το ρευστό, η οποία γενικά για κάθε γεωμετρία που μελετήθηκε ισούται με:

$$A = \pi(r_c^2 - r_h^2) \quad (6)$$

όπου, $r_c = r_t + t$, με t να είναι το διάκενο μεταξύ περιβλήματος και κορυφής πτερυγίου.



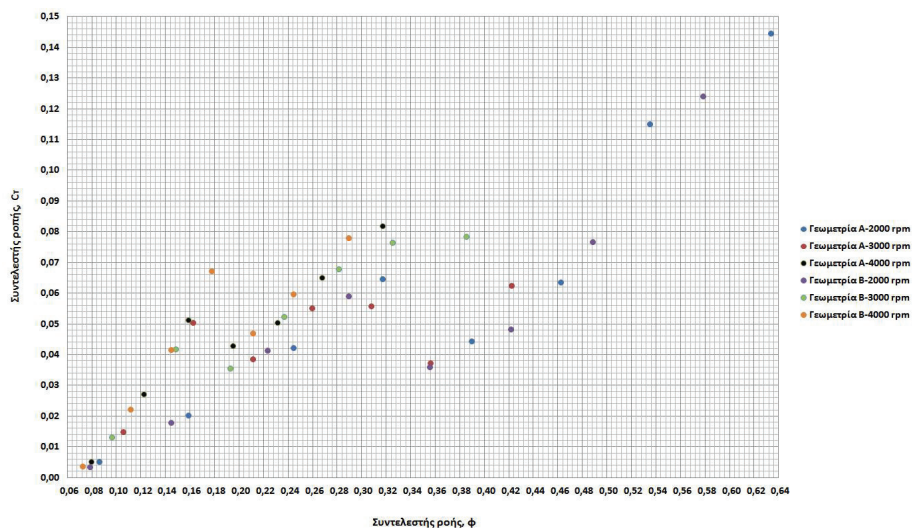
Σχήμα 3: α) Υπολογιστικό πλέγμα. β) Λεπτομέρεια του πλέγματος γύρω από το πτερύγιο.

Ο συντελεστής ροπής (C_T), ο συντελεστής πίεσης (C_P) και ο βαθμός απόδοσης (η), εκφρασμένα ως προς το συντελεστή ροής, φ , για τις δύο γεωμετρίες του στροβίλου Wells παρουσιάζονται στο Σχήμα 4. Ο αδιάστατος συντελεστής ροής, φ , ορίζεται ως ο λόγος της απόλυτης συνιστώσας της ταχύτητας (C) προς τη συνιστώσα της εφαπτομενικής ταχύτητας (U), η οποία συνδέεται με την ταχύτητα περιστροφής του στροβίλου. Ο συντελεστής ροής επομένως μπορεί να γραφεί ως ακολούθως:

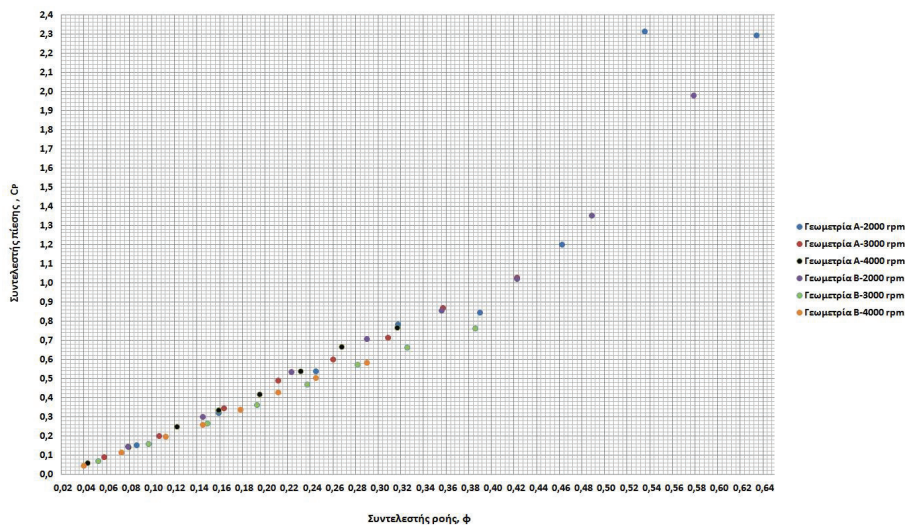
$$\varphi = \frac{C}{U} \quad (7)$$

όπου, $U = \omega \cdot r_t$. Για κάθε μια από τις συνθήκες λειτουργίας του στροβίλου που παρουσιάζονται στα Σχήματα 4, 5 και 6, σημειώνεται πως το φαινόμενο της απώλειας στήριξης λαμβάνει χώρα στον συντελεστή ροής όπου παρατηρείται η πρώτη πτώση του συντελεστή ροπής. Από την απόδοση του

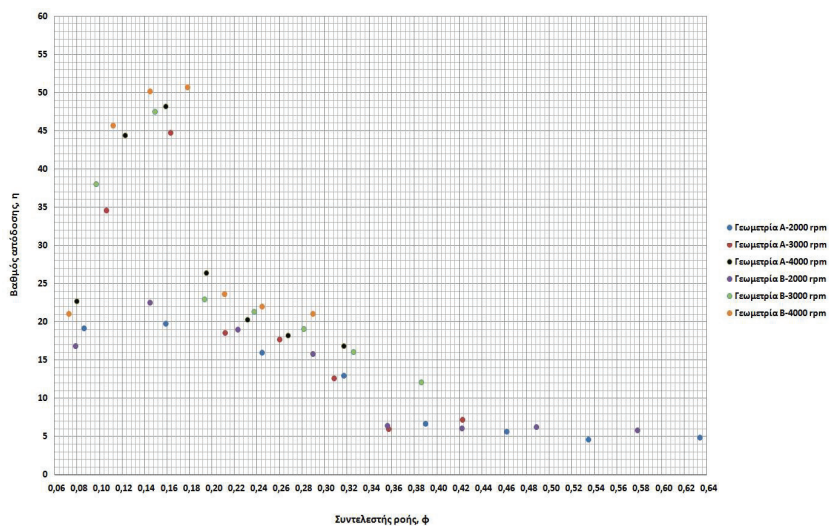
δρομέα φαίνεται πως είναι δυνατό να επιτευχθεί ακόμη και επίπεδο 60% απομάστευσης ενέργειας από τη ροή του αέρα με χρήση του στροβίλου Γεωμετρίας Β. Η τιμή αυτή είναι συγκρίσιμη με τους βαθμούς απόδοσης που παρουσιάστηκαν σε εργασίες άλλων ερευνητών [2,3]. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συγκεκριμένη εργασία αξιολογούνται ως αξιόπιστα, αφού η σύγκριση των αποτελεσμάτων της Γεωμετρίας Α με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας [4,5] έδειξε πανομοιότυπη συμπεριφορά του στροβίλου, όσον αφορά στην εμφάνιση απώλειας στήριξης. Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η εν λόγω σύγκριση των αποτελεσμάτων σε όρους βαθμού απόδοσης.



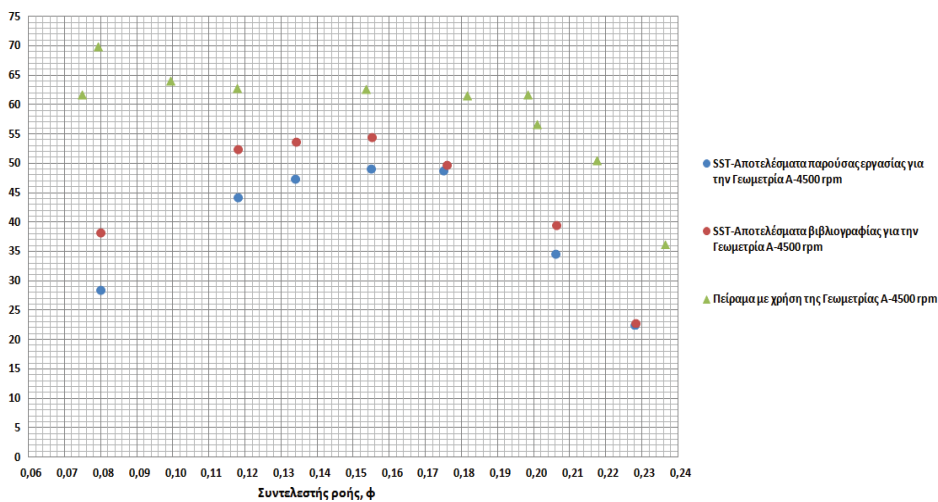
Σχήμα 4: Συντελεστής ροπής στροβίλου Wells Γεωμετρίας Α και Β για ταχύτητες περιστροφής στροβίλου ισοδύναμες με 2000, 3000 και 4000 rpm εκφρασμένα ως προς το συντελεστή ροής, ϕ .



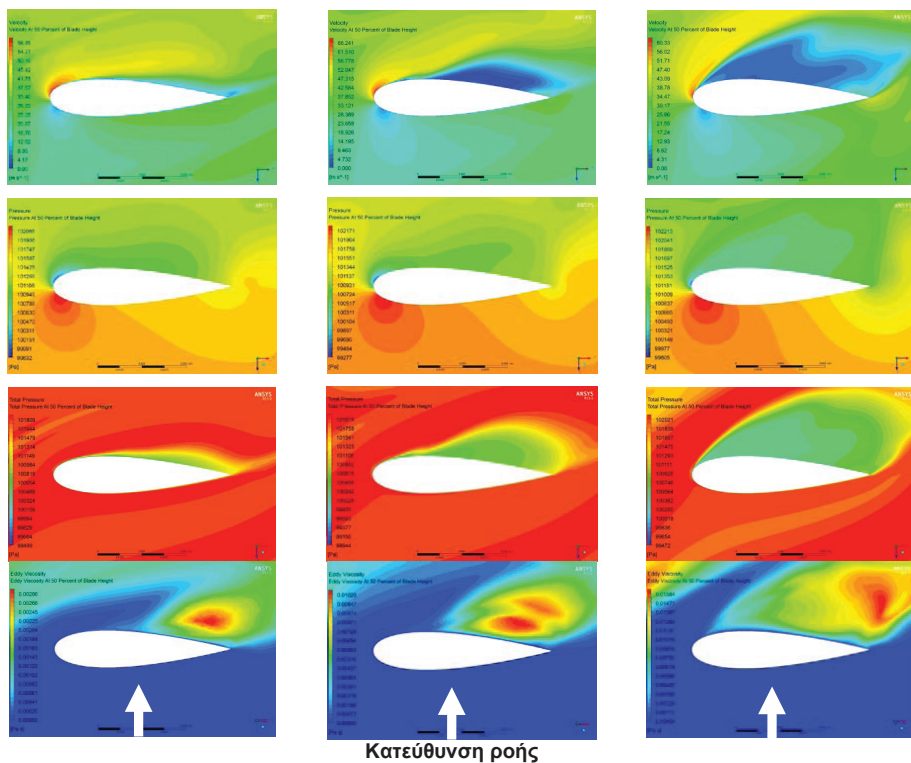
Σχήμα 5: Συντελεστής πίεσης στροβίλου Wells Γεωμετρίας Α και Β για ταχύτητες περιστροφής στροβίλου ισοδύναμες με 2000, 3000 και 4000 rpm εκφρασμένα ως προς το συντελεστή ροής, ϕ .



Σχήμα 6: Βαθμός απόδοσης στροβίλου Wells Γεωμετρίας Α και Β για ταχύτητες περιστροφής στροβίλου ισοδύναμες με 2000, 3000 και 4000 rpm εκφρασμένα ως προς το συντελεστή ροής, ϕ .

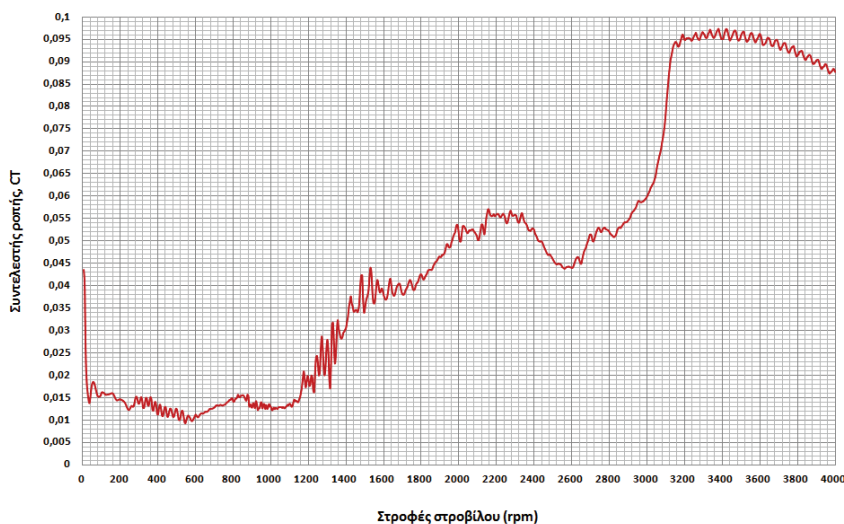


Σχήμα 7: Σύγκριση υπολογιστικών αποτελεσμάτων Γεωμετρίας Α, για περιστροφική ταχύτητα στροβίλου ισοδύναμη με 4500 rpm, με τα υπολογιστικά και πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία.



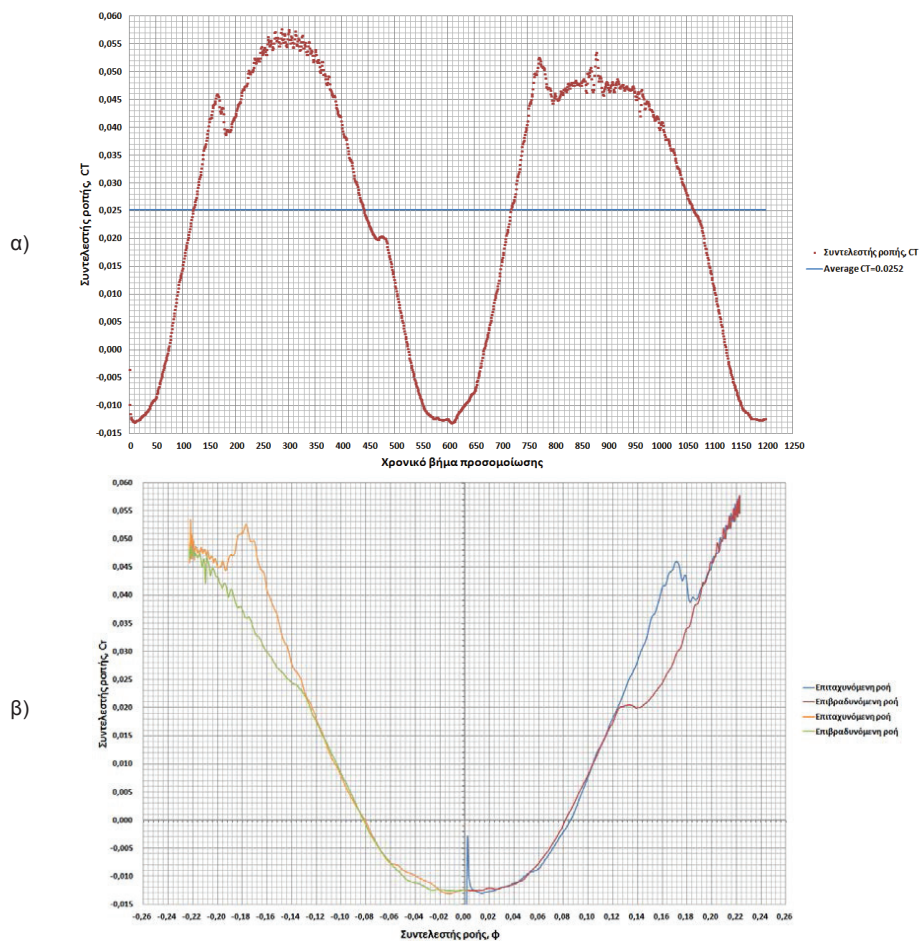
Σχήμα 8: α) Επαγόμενες ταχύτητες, β) στατικές πιέσεις, γ) ολικές πιέσεις και δ) επίπεδα τύρβης στη μέση ακτινική θέση του πτερυγίου του στροβίλου Γεωμετρίας Β, για 2000 rpm και για ταχύτητες εισόδου του αέρα 6.5, 8.5 και 10.5 m/s.

Τα υπολογιστικά αποτελέσματα που προέκυψαν κάτω από μόνιμες συνθήκες ροής γίνονται πιο αντιληπτά εμβαθύνοντας στον τρόπο με τον οποίο αναπτύσσεται η ροή πάνω και γύρω από το πτερύγιο. Στο Σχήμα 8 παρουσιάζονται ενδεικτικά μερικές τέτοιες εικόνες, οι οποίες απεικονίζουν τις επαγόμενες ταχύτητες, τις στατικές και ολικές πιέσεις, καθώς και τα επίπεδα τύρβης στην περιοχή του δρομέα στο 50% του ύψους του πτερυγίου του στροβίλου Γεωμετρίας Β, για ταχύτητα περιστροφής αυτού ίση με 2000 rpm και για ταχύτητες εισόδου του αέρα ίσες με 6.5, 8.5 και 10.5 m/s. Στις εν λόγω συνθήκες η εμφάνιση απώλειας στήριξης του πτερυγίου επιτυγχάνεται στα 8.5 m/s ταχύτητας εισόδου του αέρα. Η ανάπτυξη της ροής φαίνεται να συμφωνεί με ένα τέτοιο αποτέλεσμα, αφού στα 8.5 m/s η περιοχή αποκόλλησης της ροής ξεκινάει από το μέγιστο πάχος του πτερυγίου. Στα 6.5 m/s η περιοχή αποκόλλησης περιορίζεται μόνο στην ακμή φυγής του πτερυγίου, ενώ στα 10.5 m/s η αποκόλληση της ροής ξεκινάει κοντά στην ακμή προσβολής του πτερυγίου. Από τις κατανομές της ολικής πίεσης μπορεί να αναγνωστεί η ανάπτυξη των υποπίεσεων, οι οποίες κάτω από κατάλληλες συνθήκες οδηγούν σε ανακυκλοφορία της ροής, ενώ από τα επίπεδα τύρβης διαπιστώνεται η αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων, η οποία πολλές φορές συναντάται να βοηθάει τη ροή να διατηρηθεί χωρίς αποκολλήσεις επάνω στην επιφάνεια του πτερυγίου. Όσον αφορά στα υπολογιστικά αποτελέσματα κάτω από μη μόνιμες συνθήκες ροής, στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα χαρακτηριστικά εκκίνησης του στροβίλου για ταχύτητα εισόδου του αέρα ίση με 6.5 m/s, εκφρασμένα σε ένα διάγραμμα συντελεστή ροπής ως προς την περιστροφική ταχύτητα του στροβίλου (rpm), ενώ στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται η χρονικά μεταβαλλόμενη παραγόμενη ροπή και τα φαινόμενα υστέρησης που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα, κάτω από την ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου με συχνότητα ταλάντωσης 0.167 Hz, εκφρασμένα σε διαγράμματα μεταβολών του συντελεστή ροπής με τον χρόνο και του συντελεστή ροπής προς το συντελεστή ροής αντίστοιχα.



Σχήμα 9: Χαρακτηριστικά εκκίνησης του στροβίλου Γεωμετρίας Β για ταχύτητα εισόδου του αέρα ίση με 6.5 m/s

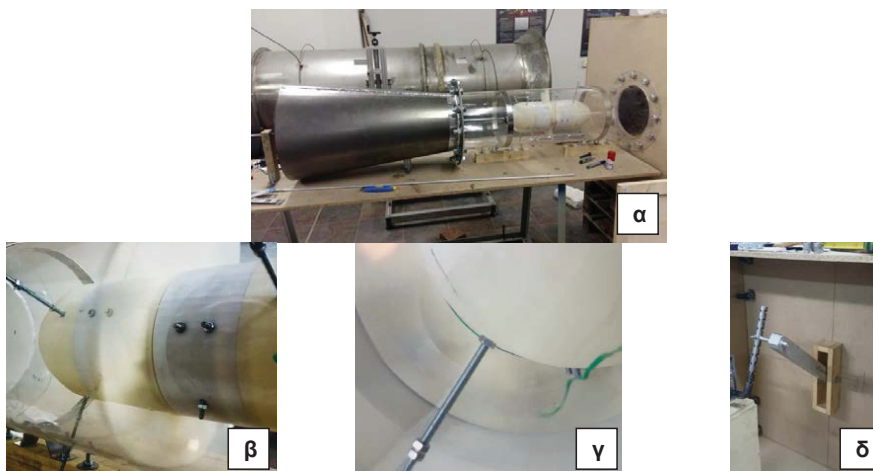
Όσον αφορά στα χαρακτηριστικά εκκίνησης του στροβίλου, παρατηρείται η ύπαρξη ενός εύρους στροφών (από 705 έως 805 rpm) όπου η τιμή της ροπής είναι πολύ μικρή, σχεδόν μηδενική. Σε αυτή την περιοχή είναι πολύ πιθανό να λαμβάνει χώρα το φαινόμενο crawling, το οποίο εκφράζει την αδυναμία του στροβίλου να περάσει από την περιοχή όπου ο συντελεστής εφασπτομενικής δύναμης λαμβάνει αρνητικές τιμές και το οποίο συνεπώς, μπορεί να οδηγήσει τον στρόβιλο σε ανάπτυξη χαμηλών στροφών. Στο Σχήμα 10.α μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι καμπύλες της παραγόμενης ροπής που δημιουργούνται δεν είναι ίδιες μεταξύ τους. Η αριστερή καμπύλη, η οποία προκύπτει από την ροή του αέρα ανάντη του δρομέα, έχει μεγαλύτερο μέγιστο από τη δεξιά καμπύλη, η οποία προκύπτει από την ροή του αέρα κατάντη του δρομέα. Θεωρητικά οι δύο καμπύλες έπρεπε να είναι πανομοιότυπες, όμως πρακτικά η αδράνεια της ροής του αέρα και ο τρόπος με τον οποίο αναπτύσσεται το οριακό στρώμα επάνω στα πτερύγια δίνουν διαφορετικά αποτελέσματα. Ωστόσο, η μέση εξαγόμενη παραγόμενη ροπή έχει θετική τιμή. Παρατηρώντας τον τρόπο με τον οποίο καταγράφονται τα φαινόμενα υστέρησης στο Σχήμα 10.β, σημειώνεται πως κατά τη μετάβαση της ροής του αέρα από επιταχυνόμενη σε επιβραδυνόμενη κατάσταση, παρουσιάζεται μια δεξιόστροφη κλειστή διαδρομή, η οποία συνδέεται άμεσα με την ύπαρξη φαινομένων αποκόλλησης, καθώς και με την εμφάνιση του φαινομένου της απώλειας στήριξης του πτερυγίου. Στη βιβλιογραφία ωστόσο, έχει παρατηρηθεί πολλάκις και αντίστοιχη αριστερόστροφη κλειστή διαδρομή, η οποία δε συνδέεται άμεσα με την εμφάνιση φαινομένων ακραίας αποκόλλησης, σύμφωνα με τους διάφορους μελετητές, αλλά με τον ιδιαίτερο τρόπο με τον οποίο αναπτύσσονται τα οριακά στρώματα επάνω στα πτερύγια.



Σχήμα 10: α) Χρονικά μεταβαλλόμενη παραγόμενη ροπή και β) φαινόμενα υστέρησης στροβίλου Γεωμετρίας B, κάτω από την ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισόδου με συχνότητα ταλάντωσης 0.167 Hz και ταχύτητα περιστροφής στροβίλου 2000 rpm

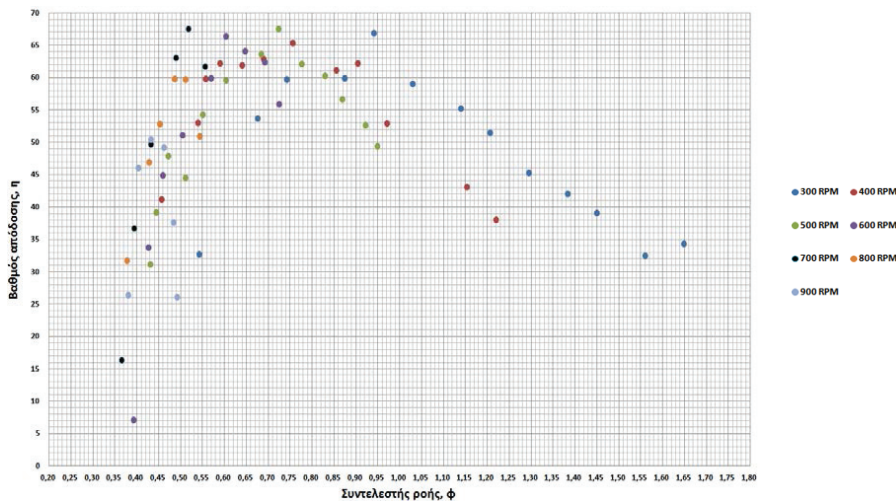
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ

Μετά τη λεπτομερή σχεδίαση και κατασκευή, για την πειραματική διερεύνηση της λειτουργίας του στροβίλου Wells κατασκευάστηκε μια πειραματική διάταξη (Σχήμα 11) για το μοντέλο της οποίας χρησιμοποιήθηκε ένας δρομέας κατασκευασμένος με ταχεία προτυποποίηση (rapid prototyping). Επιπλέον, αναπτύχθηκε μία ειδική διάταξη για την πρόκληση της παλινδρομικής κίνησης του αέρα.



Σχήμα 11: α) Η διάταξη πλήρως συναρμολογημένη, β) εικόνα από την περιστροφή των πτερυγίων, γ) λεπτομέρεια από τα στηρίγματα του δρομέα και δ) λεπτομέρεια από τον διωστήρα του εμβόλου.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα δείχνουν παρόμοιες τάσεις με αυτές των υπολογιστικών αναλύσεων. Ο βαθμός απόδοσης που εκτιμήθηκε ήταν μεγαλύτερος από 68%, ενώ στην βιβλιογραφία ο μέγιστος πειραματικός βαθμός απόδοσης που έχει καταγραφεί είναι ίσος περίπου με 75%. Στο Σχήμα 12 παρουσιάζονται οι βαθμοί απόδοσης του πειραματικού στροβίλου, ύστερα από τη δοκιμή του σε αεροσήραγγα μεταβάλλοντας την ταχύτητα περιστροφής του από 300 έως 900 rpm. Για ταχύτητες περιστροφής του στροβίλου ισοδύναμες με 500 και 700 rpm επιτυγχάνεται το ποσοστό του 68%, ενώ για 300 rpm, φαίνεται να εξάγεται το μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας με μέγιστο βαθμό απόδοσης περίπου ίσο με 67%.



Σχήμα 12: Βαθμοί απόδοσης πειραματικού στροβίλου για ταχύτητες περιστροφής αυτού από 300 έως 900 rpm.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν δύο διαφορετικές γεωμετρίες στροβίλου τύπου Wells, προκειμένου να ελεγχθεί η συμπεριφορά τους υπολογιστικά αλλά και πειραματικά. Η υπολογιστική τους ανάλυση πραγματοποιήθηκε με χρήση του εμπορικού λογισμικού ANSYS CFX.

Όσον αφορά τις υπολογιστικές προσομοιώσεις, τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν υποδεικνύουν την ικανότητα του στροβίλου Wells να παράγει αξιοσημείωτα ποσά ενέργειας, ελέγχοντας τη συμπεριφορά του κάτω από μόνιμες και μη μόνιμες συνθήκες ροής. Συγκεκριμένα, ο μέγιστος βαθμός απόδοσης που επιτεύχθηκε είναι περίπου ίσος με 48% για τη γεωμετρία A (4000 RPM) και με 51% για τη γεωμετρία B (4000 RPM), με τη γεωμετρία B να παρουσιάζει μάλιστα μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας. Γενικά, όσον αφορά το εύρος λειτουργίας του στροβίλου Wells, ομολογουμένως δεν είναι τόσο μεγάλο, όπως εξάλλου αναμενόταν από τη μελέτη της βιβλιογραφίας. Επιπλέον, αποδείχτηκε πως τα εν λόγω αποτελέσματα έχουν μια σχετική ακρίβεια ωστόσο, η κάλυψη των ελλείψεων, η διόρθωση των λαθών που έγιναν κατά την πορεία και η βελτιστοποίηση της υπολογιστικής μοντελοποίησης κρίνεται απαραίτητη. Αναφορικά με τις υπολογιστικές προσομοιώσεις κάτω από μη μόνιμες συνθήκες ροής, ο στροβίλος Wells φαίνεται να λειτουργεί όπως αναμενόταν για ημιτονοειδή μεταβολή της ταχύτητας εισαγωγής, παράγοντας μια χρονικά μεταβαλλόμενη ροπή, με μια μέση θετική τιμή ενώ, τα εξαγόμενα χαρακτηριστικά εκκίνησης του στροβίλου αποδείχτηκαν πολύ χρήσιμα για την επεξήγηση των φαινομένων που λάμβαναν χώρα κατά την πειραματική διαδικασία. Τα φαινόμενα υστέρησης που μελετήθηκαν από τη βιβλιογραφία, φαίνεται να υφίστανται και στις προσομοιώσεις της εν λόγω εργασίας.

Κατά την πειραματική διαδικασία φάνηκε η ικανότητα του στροβίλου να παράγει σημαντικά ποσά ενέργειας. Οι αποδόσεις που εξάγονται για την εν λόγω λειτουργία του στροβίλου είναι μεγάλες και συγκρίσιμες με αυτές άλλων πειραματικών ερευνών που έχουν δημοσιευθεί κατά καιρούς. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης που παρατηρήθηκε ισούται με 68% όταν ο μέγιστο βαθμός απόδοσης που απαντάται στη βιβλιογραφία σήμερα είναι 75%. Παρόλο που δεν ήταν εφικτό να γίνει ένας ανάλογος έλεγχος της συμπεριφοράς του στροβίλου Wells μ' αυτόν των υπολογιστικών προσομοιώσεων, τα πειραματικά δεδομένα που εξάχθηκαν είναι αρκετά ενθαρρυντικά αφού, αποδεσμεύεται ένα πολύ ικανοποιητικό μέρος της ροής αέρα που εισάγεται στον σωλήνα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Menter F. R. (1994). Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, vol. 32, Issue 8, pp. 1598-1605.
- [2] Falcao A. F. O. (2010). "Wave energy utilization: a review of the technologies", *Renew. Sust. Energy Rev.* 14(3), pp 899-918.
- [3] Lopez, I., Andreu, J., Ceballos, S., Martinez de Alegria, I., Kortabarria, I., (2013). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renew. Sust. Energy Rev.* Vol. 27, pp 413-434.
- [4] Dhanasekaran, T.S. and Govardhan, M. (2005). "Computational analysis of performance and flow investigation on wells turbine for wave energy conversion", *Renewable Energy*, vol. 30.
- [5] Carija, Z., Kranjcevic, L., Banic, V., Cavrak, M. (2012). Numerical analysis of Wells turbine for wave power conversion. *Engineering Review* Vol. 32, Issue 3, 141-146.
- [6] Falcao A. F.O., Henriques J. C.C. (2016). Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. *Renewable Energy*, vol. 85, pp. 1391-1424.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΡΟΣΘΗΚΗΣ ΚΕΛΥΦΟΥΣ ΣΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΙΚΡΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΚΑΙ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ

Κ. Βαφειάδης*, Α. Τουρλιδάκης

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, ΠΔΜ
e-mail: kvafiadis@uowm.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ανεμογεννήτριες με κέλυφος είναι μια τεχνολογία βελτίωσης της απόδοσης μικρών ανεμογεννητριών που βασίζεται σε μια πολύ απλή στη σύλληψη ιδέα. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας σχεδιάστηκαν και μελετήθηκαν μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα και μια ανεμογεννήτρια καθέτου άξονα και αντίστοιχα κελύφη με σκοπό τη διερεύνηση των δυνατοτήτων αυτών των διατάξεων. Σε αυτή την κατεύθυνση πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις λειτουργίας του δρομέα τόσο απουσία κελύφους όσο και με την προσθήκη κελύφους. Με χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής (CFD) και κατάλληλων μοντέλων τύρβης μπόρεσαν να εξαχθούν σημαντικά αποτελέσματα.

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν δείχναν ότι η προσθήκη κελύφους δρα ευεργετικά στη παραγόμενη ισχύ και για τα δυο είδη ανεμογεννητριών. Αυτό επιτυγχάνεται με τη μείωση της στατικής πίεσης κατάντη του δρομέα, συγκριτικά με την λειτουργία χωρίς κέλυφος, οδηγώντας σε βελτιωμένη απομάστευση ενέργειας από τον αέρα. Επιπλέον μελετήθηκε και η προσθήκη στεφάνης στην έξοδο του διαχύτη, η οποία δημιουργεί ένα εμπόδιο στη ροή εξαναγκάζοντας τον αέρα να διέλθει μέσω του κελύφους. Η παρουσία της στεφάνης προκαλεί μεγαλύτερη πτώση πίεσης στο πίσω μέρος του κελύφους, κάτι που βελτιώνει την παραγωγή μηχανικού έργου από τον δρομέα. Αύξηση του μεγέθους της στεφάνης επιφέρει διπλασιασμό ή και πενταπλασιασμό της απόδοσης του δρομέα.

Σύγκριση των αποτελεσμάτων με πειραματικά δεδομένα άλλων ερευνητών δείχνει ότι οι τάσεις που παρατηρούνται στα υπολογιστικά αποτελέσματα είναι συγκρίσιμες. Ο συντελεστής ισχύος όχι μόνο αυξάνεται αλλά η καμπύλη του διευρύνεται σε μεγαλύτερο εύρος λόγω ταχυτήτων ακροπτερυγίου. Βάσει των παραπάνω σχολίων, η προσθήκη κελύφους αποδεικνύεται μια χρήσιμη τροποποίηση για μικρές ανεμογεννήτριες.

Λέξεις Κλειδιά: μικρές ανεμογεννήτριες, κέλυφος, βελτίωση ισχύος, CFD

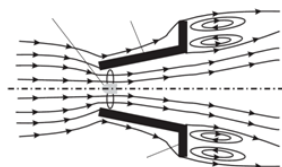
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται να λειτουργούν κοντά στο όριο του Betz, δηλαδή τον συντελεστή της μέγιστης δυνατής απομάστευσης ενέργειας από τον άνεμο. Στην πράξη είναι δύσκολο να επιτευχθεί πραγματική λειτουργία με μέγιστη δυνατή απομάστευση ενέργειας. Ωστόσο, μιας και η ισχύς είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του ανέμου εδώ και δεκαετίες έχει διερευνηθεί η δυνατότητα υπέρβασης του ορίου του Betz μέσω επιτάχυνσης της ροής. Οι ανεμογεννήτριες με κέλυφος έχουν προταθεί ως μια βελτίωση των συμβατικών ανεμογεννητριών. Σε αυτές το κέλυφος της ανεμογεννήτριας με το οποίο επιτυγχάνεται η επιτάχυνση της ροής έχει το σχήμα ενός διαχύτη, με μεγάλη γωνία διάχυσης και σε πολλές περιπτώσεις διάτρητη επιφάνεια ώστε να επιτυγχάνεται έλεγχος και ενεργοποίηση του αναπτυσσόμενου οριακού στρώματος. Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου χαρακτηρίζονται ως Ανεμογεννήτριες Υποβοηθούμενες από Διαχύτη (Diffuser Augmented Wind Turbines – DAWT). Ο ορισμός της βελτίωσης της απόδοσης είναι ο λόγος της παραγόμενης ισχύος από έναν δρομέα με κέλυφος προς την ισχύ ενός όμοιου δρομέα χωρίς κέλυφος. Οι πρώτοι πειραματιστές στον τομέα των δρομέων με κέλυφος οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι η βελτίωση της απόδοσης ενός δρομέα εξαρτάται από τον συντελεστή ώσης (φόρτιση) που επενεργεί σε αυτόν, την ανάκτηση πίεσης του διαχύτη και την πίεση στην έξοδο του κελύφους. Αυτές οι συσχετίσεις ανάγονται με τη σειρά τους σε συσχετίσεις με τον λόγο επιφανειών εξόδου προς λαιμού και με την απόδοση του διαχύτη [1-4].

Στις αρχές του 2000 μια ομάδα ερευνητών από την Ιαπωνία άρχισε να μελετά σε βάθος τη δυνατότητα αξιοποίησης της μέχρι τότε ερευνητικής δουλειάς διεξάγοντας αριθμητικές προσομοιώσεις και πειραματικές μελέτες της ροής σε ένα πλήθος κελυφών στα οποία απουσίαζε το συγκλίνον τμήμα με σκοπό την ανάπτυξη μικρών (κάτω του 1.5 kW) ανεμογεννητριών DAWT [5, 6]. Οι διαχύτες έφεραν στεφάνες διαφορετικών υψών στην έξοδό τους (Σχ. 1.α) Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων επαληθεύτηκαν από πειραματικά αποτελέσματα και έδειξαν καλή συμφωνία. Οι προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν διαχύτες με γωνία διάχυσης από 4° μέχρι 15° και βρέθηκε ότι είναι δυνατό να επιτευχθεί ικανοποιητική επιτάχυνση της ροής. Βέβαια, η απόδοση οποιουδήποτε διαχύτη σχετίζεται και με την αποκόλληση της ροής στο εσωτερικό του διαχύτη και συνεπώς με τον συντελεστή ώσης του χρησιμοποιούμενου δρομέα. Σημαντικό ρόλο στην απόδοση αυτών των διαχυτών παίζει η στεφάνη, η οποία δρα ως εμπόδιο στη ροή γύρω από τον διαχύτη, δημιουργεί σημαντική αποκόλληση της ροής και μια εκτενή περιοχή ανακυκλοφορίας στο πίσω μέρος της. Έτσι στην έξοδο του διαχύτη η πίεση είναι σημαντική χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική (Σχ. 1.β). Η ροή που διέρχεται από έναν διαχύτη με στεφάνη επιταχύνεται σημαντικά σε σχέση με τη ροή δια μέσω ενός διαχύτη χωρίς στεφάνη. Η μέγιστη τιμή της ταχύτητας εμφανίζεται όπως είναι αναμενόμενο παρουσιάζεται στην είσοδο του διαχύτη και έτσι σε αυτή τη θέση προτείνεται να τοποθετηθεί ο δρομέας ο οποίος θα απομαστεύει ενέργεια από τον άνεμο.



(α)



(β)

Σχήμα 1: DAWT με στεφάνη [6]. α) Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης. β) Σχηματική απεικόνιση του ροϊκού πεδίου σε μια τέτοια διάταξη.

Περαιτέρω εργασίες της ίδιας ομάδας αλλά και άλλων ερευνητών παρουσίασαν σημαντική βελτίωση του συντελεστή ισχύος με χρήση κελύφους που φτάνει ακόμα και 4 – 5 φορές τον συντελεστή ισχύος της ανεμογεννήτριας χωρίς τον διαχύτη [7-9]. Η διατομή εξόδου του διαχύτη σε αυτή τη περίπτωση ήταν περίπου διπλάσια της διατομής εισόδου. Το 2010 οι Ohya και Karasudani [10] παρουσίασαν τη διάταξη “Wind-lens”, που περιλαμβάνει μια νέα μορφή κελύφους με διαχύτη μικρότερου μήκους και στεφάνη στην έξοδο. Οι διατάξεις αυτές αναπτύχθηκαν και δοκιμάστηκαν πειραματικά σε αεροσήραγγα, ενώ πραγματοποιήθηκαν και δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες σε μια μονάδα άρδευσης σε έρμητο της Βορειοδυτικής Κίνας και στην παραθαλάσσια πόλη Fukuoka της Ιαπωνίας, με την εγκατάσταση έξι και τριών ανεμογεννητριών, αντίστοιχα. Κάθε ανεμογεννήτρια είχε ονομαστική

ισχύ 5 kW. Τα αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων έδειξαν την επίτευξη βελτίωσης του συντελεστή ισχύος της ανεμογεννήτριας 2 έως 5 φορές.

Η έρευνα που αφορά ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα με κέλυφος είναι περιορισμένη και εστιάζεται κυρίως στην «έξυπνη» τοποθέτηση των ανεμογεννητριών σε διάφορα σημεία κτιρίων όπου οι ροϊκές συνθήκες είναι ευνοϊκές [11]. Δυστυχώς η ένταξή τους σε κέλυφος τους αφαιρεί το προτέρημα της μη απαίτησης συγκεκριμένου προσανατολισμού. Ωστόσο, τα κελύφη έχειδειχθεί και στην περίπτωση των ανεμογεννητριών καθέτου άξονα ότι επιτυγχάνουν τη βελτίωση της απόδοσής των ανεμογεννητριών που περιβάλλουν [12-15]. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος απώλειας του προτερήματος των κάθετων ανεμογεννητριών και την ταυτόχρονη βελτίωση της απόδοσής τους, έχουν μελετηθεί γεωμετρίες οι οποίες περιβάλλονται διατάξεις οι οποίες ως επί το πλείστον βασίζονται σε μια σχεδίαση που ιστορικά απαντάται για πρώτη φορά σε περσικούς ανεμόμυλους. Τη βελτίωση της απόδοσης που προσφέρει αυτή η απλή σχεδίαση και τη δυνατότητα ένταξής της στο κτιριακό κέλυφος παρουσίασαν σε εργασία τους οι Gerald et al. [16] ενώ λίγα χρόνια αργότερα παρουσιάστηκε και η εργασία των Kim και Gharib [17], οι οποίοι μελέτησαν την ευεργετική επίδραση της παρουσίας εκτροπέα μπροστά από ανεμογεννήτριες καθέτου άξονα.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα υπολογιστικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε σε δρομείς μικρών ανεμογεννητριών, οριζόντιου και καθέτου άξονα. Αρχικά μελετήθηκαν με τη χρήση υπολογιστικής ρευστοδυναμικής οι δρομείς των ανεμογεννητριών απουσία κελύφους ώστε να χαρτογραφηθούν τα λειτουργικά τους χαρακτηριστικά. Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις παρουσία κελύφους ώστε να διαπιστωθεί η δυνατότητα βελτίωσης της απόδοσης.

2. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

2.1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά δρομέα και κελύφους

Για τη διερεύνηση της επίδρασης που έχει η τοποθέτηση κελύφους στους δυο τύπους ανεμογεννητριών επιλέχθηκε η σχεδίαση ενός δρομέα οριζόντιου άξονα και ενός δρομέα καθέτου άξονα. Για την προκαταρκτική τους αξιολόγηση στο στάδιο της σχεδίασης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό QBlade και οι μέθοδοι στοιχείων περυγώσης – ορμής (Blade Element Momentum – BEM) και διπλού δίσκου – πολλαπλών ροϊκών σωλήνων (Double-Multiple Streamtube – DMS), για την ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα και την καθέτου άξονα, αντίστοιχα.

Ο δρομέας της ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα φέρει τρία περυγία, έχει διάμετρο 1.32 m, ακτίνα πλήμνης 0.08 m, σχεδιάστηκε για περιστροφή με σταθερή ταχύτητα 600 RPM και η δομή των περυγίων βασίζεται σε τρεις διαφορετικούς τύπους διατομών, οι οποίες αναπτύχθηκαν από το National Renewable Energy Laboratory (NREL) για ανεμογεννήτριες με διάμετρο 1 – 3 m [18]. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η καμπύλη του συντελεστή ισχύος του σε σχέση με την αδιάστατη ταχύτητα ακροπερυγίου λ η οποία ορίζεται από την Εξίσωση 1.

$$\lambda = \frac{2\pi\Omega R}{60U} \quad (1)$$

όπου, Ω είναι η περιστροφική ταχύτητα σε RPM, R είναι η ακτίνα των περυγίων του δρομέα και U είναι η ταχύτητα του ανέμου. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της μεθόδου BEM, η απόδοση του δρομέα είναι ικανοποιητική για ταχύτητες ανέμου 5 – 10 m/s και ο μέγιστος συντελεστής απόδοσης είναι ίσος με 0.45 (για λόγο ταχυτήτων ακροπερυγίου $\lambda = 5.5$ ή $U = 7$ m/s).



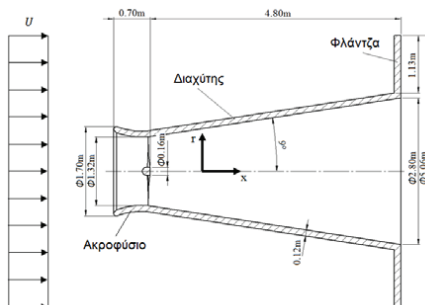
Σχήμα 2: Καμπύλη συντελεστή ισχύος.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δρομέα.

Πίνακας 1. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πτερυγίου

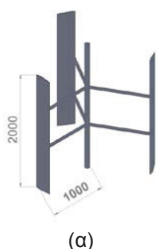
r (m)	c (m)	θ (°)	Σχήμα Διατομής
0.08	0.0600	0.00	Κύκλος
0.10	0.0600	0.00	Κύκλος
0.13	0.1300	21.82	NREL S835
0.15	0.1273	18.34	NREL S835
0.18	0.1150	14.30	NREL S835
0.22	0.1058	12.37	NREL S833
0.30	0.0804	7.53	NREL S833
0.48	0.0532	3.01	NREL S833
0.61	0.0465	0.34	NREL S834

Το κέλυφος (Σχ. 3) βασίζεται στον σχεδιασμό αντίστοιχων διατάξεων που παρουσιάστηκαν από ερευνητές σε άλλες εργασίες [5, 6], μελετήθηκε με χρήση ανάλυσης CFD για την όσο το δυνατό χωρίς αποκολλήσεις ροή και αποτελείται από μια συγκλίνουσα είσοδο και μια αποκλίνουσα έξοδο (διαχύτη) με φλάντζα στην έξοδο.

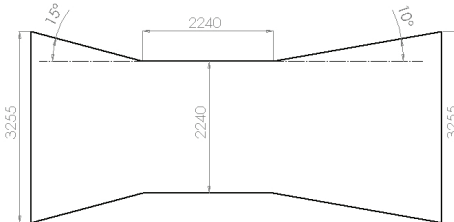


Σχήμα 3: Σκαρίφημα της διάταξης ανεμογεννήτριας – κελύφους.

Ο δρομέας της ανεμογεννήτριας καθετό άξονα είναι τύπου H-Darrieus, έχει ακτίνα 1 m και ύψος 2 m. Αποτελείται από τρία πτερύγια συμμετρικής διατομής NACA 0015 τοποθετημένων με τη χορδή τους κάθετα στην ακτίνα του δρομέα. Η χορδή των πτερυγίων είναι ίση με 280 mm και η στερεότητα του δρομέα είναι ίση με 0.84. Στο Σχήμα 4.α παρουσιάζεται μια τρισδιάστατη απεικόνιση του γεωμετρικού μοντέλου του δρομέα. Στο Σχήμα 4.β παρουσιάζεται σκαρίφημα της κάτοψης του κλειστού κελύφους.



(α)



(β)

Σχήμα 4: α) Τρισδιάστατη απεικόνιση του δρομέα. β) Κάτοψη του χρησιμοποιούμενου κελύφους.

Ο λόγος επιφανειών τόσο της συγκλίνουσας περιοχής όσο και της αποκλίνουσας περιοχής είναι 1.453.

2.2. Αριθμητικό μοντέλο και οριακές συνθήκες

Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό λογισμικό ANSYS CFX. Οι διέπουσες εξισώσεις του ροϊκού πεδίου, είναι οι εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης της ορμής.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_{M,i} \quad (2)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις, ρ είναι η πυκνότητα, u είναι το διάνυσμα της ταχύτητας, p είναι η στατική πίεση, τ είναι ο τανυστής των τάσεων και S_M ένας όρος πηγής ορμής που περιλαμβάνει τις επιδράσεις της δύναμης Coriolis και της φυγόκεντρης δύναμης.

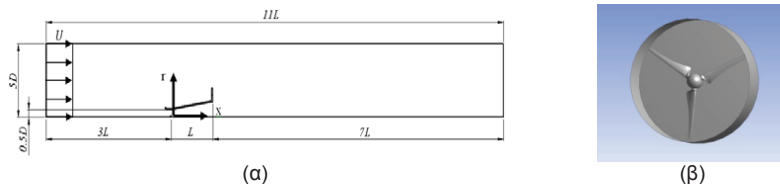
Για την προσομοίωση της τύρβης, χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο δυο εξισώσεων Shear Stress Transport (SST) με κλιμακώσεις συναρτήσεων τοιχώματος. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι εξισώσεις του μοντέλου για την τυρβώδη κινητική ενέργεια k και το ρυθμό σκέδασής της ω .

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb} \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3 \frac{\omega}{k} P_k - \beta_3 \rho \omega^2 + P_{\omega b} \quad (5)$$

Οι αναλυτικές εκφράσεις που δίνουν τους διάφορους παράγοντες και τις σταθερές του μοντέλου παρουσιάζονται εκτενώς στις εργασίες [19].

Για την ανάλυση της ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα χρησιμοποιήθηκε ανάλυση μόνιμης ροής (steady state) και ένα υπολογιστικό πεδίο κυλινδρικού σχήματος με διαστάσεις όπως φαίνονται στο Σχ. 5.α. Το ρευστό είναι αέρας στους 25°C και η πίεση αναφοράς είναι 1 atm. Το υπολογιστικό πεδίο διέπεται από δυο συστήματα αναφοράς, ένα σταθερό και ένα περιστρεφόμενο. Ο διαχύτης ανήκει στο σταθερό σύστημα αναφοράς και η περιοχή που διέπεται από το περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς είναι ένας δίσκος, μέσα στον οποίο υπάρχει ο δρομέας (Σχ. 5.β). Η περιστροφική ταχύτητα του περιστρεφόμενου συστήματος αναφοράς είναι ίση με αυτή του δρομέα.

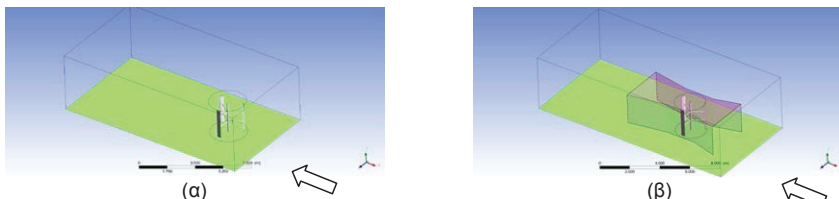


Σχήμα 5: α) Διαστάσεις του υπολογιστικού πεδίου. β) Η περιστρεφόμενη περιοχή του πεδίου.

Στις διεπιφάνειες μεταξύ του σταθερού και του περιστρεφόμενου μέρους του χωρίου, εφαρμόζεται το μοντέλο διασύνδεσης 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.

Η ανάλυση της ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα εμφανίζει πολυπλοκότητα, αφού η ροή διέπεται από την περιστροφική κίνηση του δρομέα και την αλληλεπίδραση του ομόρρου του ενός πτερυγίου με τα άλλα πτερύγια και έτσι επιλέχθηκε η προσομοίωση της ροής, τόσο του απομονωμένου δρομέα απουσία κελύφους, όσο και της διάταξης δρομέα-κελύφους, να γίνει με χρήση ανάλυσης μη μόνιμης ροής (transient). Το υπολογιστικό χωρίο για την ανάλυση του απομονωμένου δρομέα είναι ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο το οποίο αποτελείται από δυο υποχώρους (Σχ. 7). Ο ένας υποχώρος έχει σχήμα κυλίνδρου, περιλαμβάνει τον δρομέα και μέρος του πυθμένα του κελύφους και βρίσκεται στο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς, ενώ ο άλλος υποχώρος είναι το υπόλοιπο του

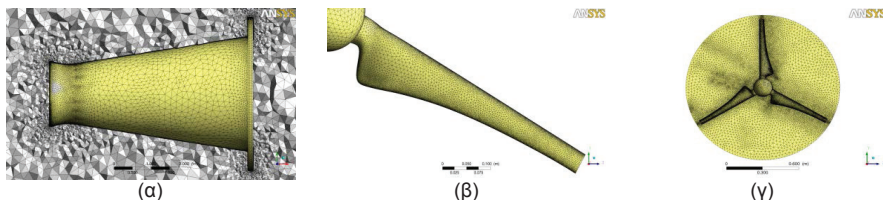
παράλληλεπίπεδου στο οποίο υπάρχει μόνο αέρας και βρίσκεται στο σταθερό σύστημα αναφοράς. Το υπολογιστικό χωρίο στην περίπτωση της πλήρους διάταξης με το κέλυφος είναι το ίδιο με τη διαφορά ότι το δεύτερο χωρίο, το υπόλοιπο του παράλληλεπίπεδου περιλαμβάνει και τα τοιχώματα του κελύφους. Ο κυλινδρικός υποχώρος βρίσκεται στο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς, το οποίο έχει περιστροφική ταχύτητα ίση με την περιστροφική ταχύτητα του δρομέα. Για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν επιλέχθηκε η διατήρηση της ταχύτητας εισόδου στα 10 m/s και η μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα. Οι ταχύτητες που μελετήθηκαν ήταν ίσες με 10, 20, 30 και 40 rad/sec που αντιστοιχούν σε λόγους ταχυτήτων ακροπτερυγίου 1, 2, 3 και 4. Το χρονικό βήμα για όλες τις ταχύτητες ορίστηκε έτσι ώστε να αντιστοιχεί σε περιστροφή του δρομέα κατά 10°.



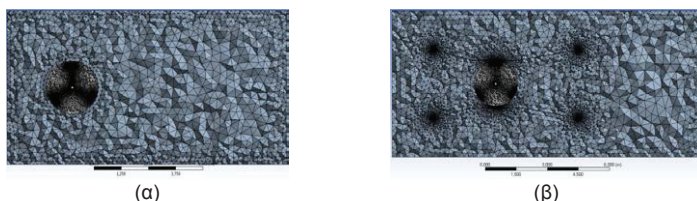
Σχήμα 6: Το υπολογιστικό χωρίο α) απομονωμένου δρομέα απουσία κελύφους και β) πλήρους διάταξης ανεμογεννήτριας-κελύφους.

Το μήκος του υπολογιστικού χωρίου που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση του απομονωμένου δρομέα είναι ίσο με 45 φορές το μήκος χορδής των πτερυγίων, το πλάτος του είναι 14 φορές το μήκος χορδής ενώ το ύψος του είναι ίσο με 25 φορές το μήκος χορδής (Σχ. 6.α). Το μήκος του χωρίου στην περίπτωση της ανάλυσης με το κέλυφος είναι ίσο με 54 μήκη χορδής (Σχ. 6.β). Οι οριακές συνθήκες του προβλήματος είναι ίδιες με τις συνθήκες στη περίπτωση του δρομέα οριζόντιου άξονα. Η τιμή της έντασης τύρβης που εφαρμόστηκε στην είσοδο είναι ίση με 10%.

Το υπολογιστικό πλέγμα αποτελείται από τετράεδρα κελιά κατάλληλα πυκνωμένα σε περιοχές καμπυλότητας και εγγύτητας μεταξύ τοιχωμάτων. Καθώς το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση της τύρβης ήταν το SST με κλιμακώσιμες συναρτήσεις τοιχωμάτων η κατασκευή των πλεγμάτων έγινε με τρόπο τέτοιο ώστε η τιμή του y^+ να είναι ίση με την μονάδα. Τα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν παρουσίασαν μια ανεξάρτητη του πλέγματος λύση. Για την προσομοίωση του απομονωμένου δρομέα οριζόντιου άξονα, 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. Στο Σχήμα 7 απεικονίζονται λεπτομέρειες του υπολογιστικού πλέγματος. Το πλέγμα του Σχ. 8.α αποτελείται από περίπου 11.4 εκατομμύρια κελιά ενώ το πλέγμα του Σχ. 8.β αποτελείται από 12 εκατομμύρια κελιά.



Σχήμα 7: Λεπτομέρειες του πλέγματος: α) το πλέγμα του σταθερού μέρους, β) το πλέγμα της επιφάνειας των πτερυγίων, γ) το πλέγμα του περιστρεφόμενου μέρους.

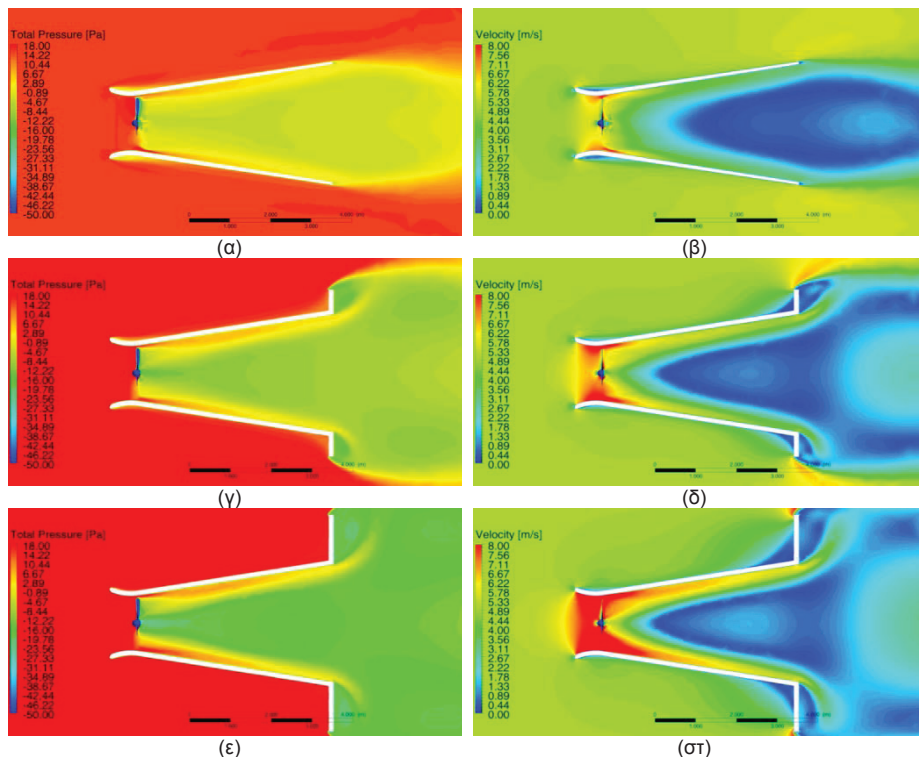


Σχήμα 8: Υπολογιστικό πλέγμα του δρομέα καθετού άξονα: α) χωρίς κέλυφος και β) πλήρους διάταξη.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

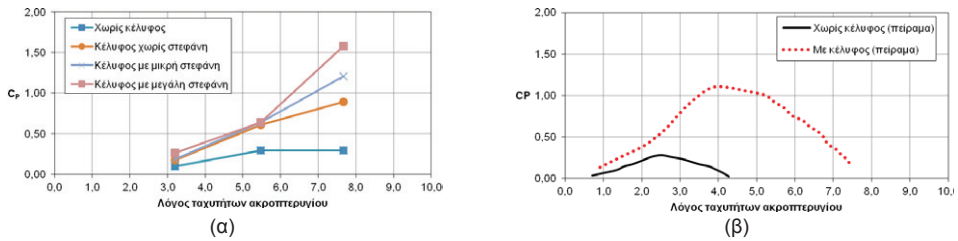
3.1. Αποτελέσματα αναλύσεων ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

Οι κατανομές της ολικής πίεσης και του μέτρου της ταχύτητας για κάθε μια από τις τρεις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, παρουσιάζονται στο Σχ. 9.



Σχήμα 9: (α), (γ), (ε) Κατανομή ολικής πίεσης στο μέσο επίπεδο της πλήρους διάταξης. (β), (δ), (στ) Κατανομή μεγέθους της ταχύτητας του ρευστού.

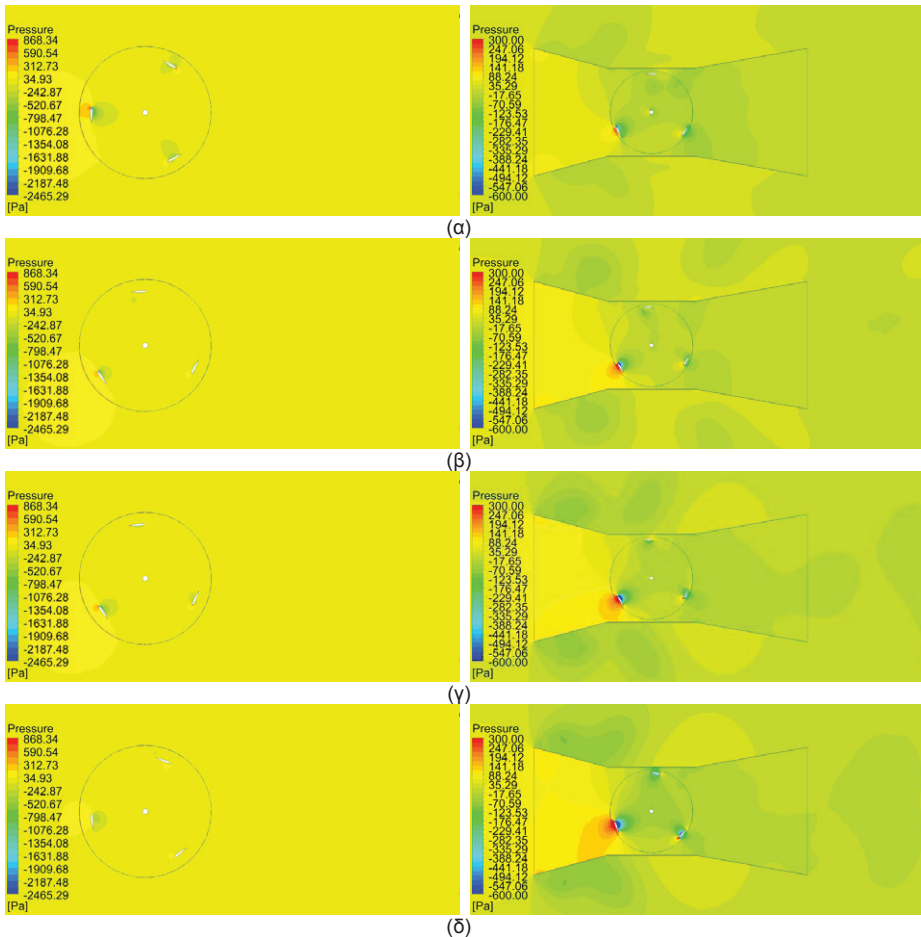
Η στεφάνη ευθύνεται για την μεγάλη μείωση της ολικής πίεσης. Η ύπαρξη μεγάλης περιοχής ρευστού που ανακυκλοφορεί κεντρικά, σε μέρος του διαχύτη, αναγκάζει τη ροή να κινηθεί προς τα τοιχώματα του κελύφους και να επιταχύνει κατά μήκος αυτών. Οι μέγιστες τιμές της στροβιλότητας εμφανίζονται σε περιοχές 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. Ο συντελεστής ισχύος που υπολογίστηκε παρουσιάζεται στο Σχ. 10.α ενώ στο Σχ. 10.β παρουσιάζονται οι καμπύλες που προέκυψαν από πείραμα άλλων ερευνητών [6], όπου χρησιμοποιήθηκε δομοείδης διαφορετικής γεωμετρίας. Η παρουσία του κελύφους βελτιώνει σημαντικά την παραγόμενη ισχύ από τον δρομέα της ανεμογεννήτριας, ενώ περαιτέρω βελτίωση επιτυγχάνεται μέσω της προσθήκης της στεφάνης στην έξοδο του διαχύτη. Η παραγόμενη ισχύς βελτιώθηκε κατά έναν παράγοντα από 2 έως 5. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στο ότι η ροή προσεγγίζει τον δρομέα με μεγαλύτερη ταχύτητα λόγω της επιτάχυνσης που λαμβάνει χώρα στο συγκλινόν μέρος του κελύφους και στην μικρότερη στατική πίεση κατάντη του δρομέα λόγω της παρουσίας του διαχύτη.



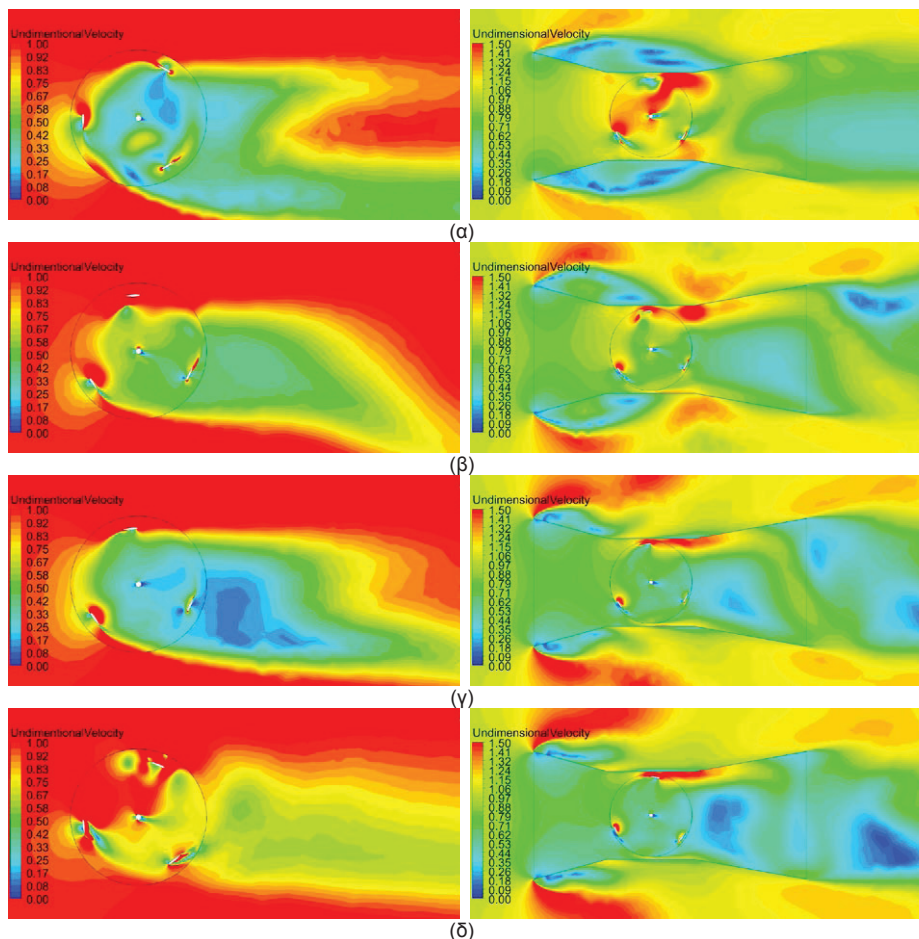
Σχήμα 10: Καμπύλες $C_p - \lambda$: α) για τις υπό μελέτη περιπτώσεις και β) αποτελέσματα της εργασίας [6].

3.2. Αποτελέσματα αναλύσεων ανεμογεννήτριας καθέτου άξονα

Στα Σχήματα 11 και 12 παρουσιάζονται στιγμιαίες κατανομές πίεσης και αδιάστατης ταχύτητας για τη ροή γύρω από τα πτερύγια του απομονωμένου δρομέα απουσία κελύφους.



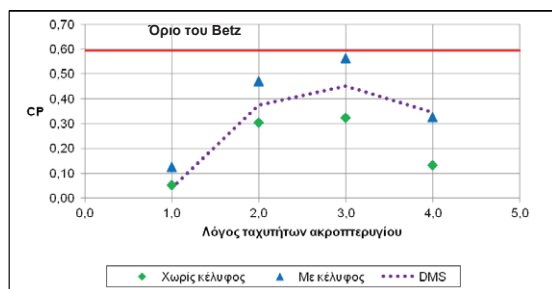
Σχήμα 11: Στιγμιότυπα κατανομών πίεσης γύρω από τον απομονωμένο δρομέα και στη διάταξη δρομέα – κελύφους για ταχύτητα περιστροφής: α) 10 rad/sec, β) 20 rad/sec, γ) 30 rad/sec και δ) 40 rad/sec.



Σχήμα 12: Στιγμιότυπα κατανομών αδιάστατης ταχύτητας γύρω από τον απομονωμένο δρομέα και στη διάταξη δρομέα – κελύφους για ταχύτητα περιστροφής: α) 10 rad/sec, β) 20 rad/sec, γ) 30 rad/sec και δ) 40 rad/sec.

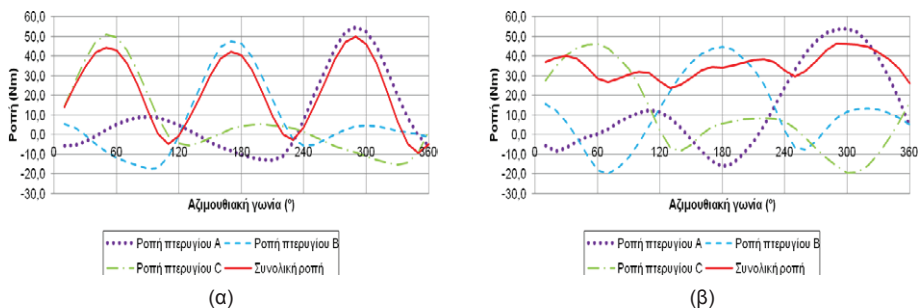
Οι κατανομές των Σχ. 11 και 12 απεικονίζουν τα ροϊκά φαινόμενα στο μέσο ύψος του δρομέα. Οι στιγμιαίες κατανομές πίεσης του Σχ. 11 δίνουν μια πολύ καλή εικόνα για τις συνθήκες πρόσπτωσης στα πτερύγια, καθώς εντοπίζεται ικανοποιητικά η θέση του σημείου προσβολής. Στα Σχήμα 12 παρουσιάζονται οι κατανομές της ταχύτητας καταδεικνύοντας την πολυπλοκότητα της ροής στον ομόρρου της ανεμογεννήτριας. Ο ομόρρους του κάθε πτερυγίου επάγει μια ροή χαμηλής ταχύτητας, ενώ παράλληλα ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα η κυρίως ροή του αέρα επιδρά με διαφορετικό τρόπο στους σχηματισμούς που εμφανίζονται πίσω από κάθε πτερύγιο.

Στο Σχήμα 13 παρουσιάζεται η ισχύς του δρομέα χωρίς το κέλυφος, με το κέλυφος και η ισχύς που προέκυψε από την ανάλυση με την μέθοδο DMS. Η επίδραση των αποκολλήσεων και των ασταθειών που αυτές προκαλούν στη λειτουργία του δρομέα δεν μπορούν να προβλεφθούν από την μέθοδο DMS με την οποία σχεδιάστηκε ο δρομέας και έτσι, ο συντελεστής ισχύος φαίνεται ότι υπερεκτιμάται από την απλοποιημένη αυτή μέθοδο.



Σχήμα 13: Συντελεστής ισχύος του δρομέα χωρίς κέλυφος και με κέλυφος.

Όπως φαίνεται στο Σχ. 14 η προσθήκη του κελύφους επιφέρει εμφανή βελτίωση της απόδοσης του δρομέα για όλες τις τιμές του λόγου ταχυτήτων ακροπτερυγίου. Η ισχύς αυξάνεται κατά έναν παράγοντα μεγαλύτερο από 2 σε σχέση με την ισχύ του απομονωμένου δρομέα. Ειδικά για $\lambda = 3$, ο συντελεστής ισχύος αγγίζει την τιμή 0.56. Παρά την μεγάλη βελτίωση το κέλυφος που μελετήθηκε δεν πέτυχε την υπερνίκηση του ορίου του Betz. Η αυξημένη ισχύς μπορεί να αποδοθεί τόσο στην αυξημένη παροχή αέρα που διέρχεται μέσω της επιφάνειας που σαρώνουν τα πτερύγια όσο και στην μείωση των απωλειών λόγω των δινών και των αποκολλήσεων στον δρομέα. Ένα ακόμη ενδιαφέρον αποτέλεσμα αποτελεί η σύγκριση των καμπυλών ροπής του απομονωμένου δρομέα με τον δρομέα παρουσία κελύφους. Στο Σχήμα 14 παρουσιάζονται αυτές οι καμπύλες για $\lambda = 3$ όπου εμφανίζεται και η μέγιστη τιμή του συντελεστή ισχύος. Η συνολική ροπή του δρομέα με το κέλυφος είναι σημαντικά αυξημένη. Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της δεν μεταβάλλονται αισθητά, ωστόσο οι ροπές των πτερυγίων διατηρούν τις μέγιστες τιμές τους σε μεγαλύτερα εύρη αζιμουθιακών θέσεων. Έτσι, η συνολική ροπή του δρομέα κατανέμεται πιο ομοιόμορφα σε μια περιστροφή. Επίσης, μειώνεται το πλάτος της και η μέση τιμή της ανυψώνεται σε μεγαλύτερες τιμές. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στην παρουσία του κελύφους το οποίο συγκεντρώνει και περιορίζει τη ροή, η οποία εξαναγκάζεται να διέλθει δια μέσου του δρομέα, αυξάνοντας έτσι την απόδοσή του.



Σχήμα 14: Ροπή του δρομέα α) χωρίς κέλυφος και β) με κέλυφος.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για την μελέτη της λειτουργίας ανεμογεννητριών με κέλυφος σχεδιάστηκαν και μελετήθηκαν μια ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα και μια ανεμογεννήτρια καθέτου άξονα και αντίστοιχα κέλυφη με σκοπό τη διερεύνηση των δυνατοτήτων αυτών των διατάξεων.

Η υπολογιστική διερεύνηση της επίδρασης του κελύφους στην απόδοση μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα έδειξε 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, συγκριτικά με την λειτουργία χωρίς κέλυφος, οδηγώντας σε βελτιωμένη απομάστευση ενέργειας από τον αέρα. Η προσθήκη στεφάνης στην έξοδο του διαχύτη δημιουργεί εμπόδιο στη ροή εξαναγκάζοντας τον αέρα να διέλθει μέσω του κελύφους. Επίσης, η παρουσία της στεφάνης προκαλεί μεγαλύτερη πτώση πίεσης στο πίσω μέρος του κελύφους, κάτι που βελτιώνει την

παραγωγή μηχανικού έργου από τον δρομέα. Αύξηση του μεγέθους της στεφάνης επιφέρει διπλασιασμό έως και πενταπλασιασμό της απόδοσης του δρομέα.

Η υπολογιστική διερεύνηση της αεροδυναμικής μιας ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα με κέλυφος έδειξε ότι υπάρχει σημαντική βελτίωση στην απόδοσή της. Το όριο του Betz σε αυτήν την περίπτωση μπόρεσε να υπερνικηθεί, ωστόσο παρατηρήθηκε βελτίωση της παραγόμενης ισχύος. Το συγκλίνον μέρος του κελύφους επιταχύνει τη ροή επάγοντας στον δρομέα ρευστό μεγάλης ταχύτητας ενισχύοντας τη λειτουργία του. Το αποκλίνον μέρος του κελύφους επιφέρει μείωση της στατικής ταχύτητας του ρευστού κατάντη του δρομέα. Το κέλυφος συγκεντρώνει τη ροή και έτσι συμβάλει έτσι στην ανάπτυξη μιας περισσότερο ομοιόμορφης σε χρόνο μιας πλήρους περιστροφής και ενισχυμένης κατά απόλυτη τιμή ροπής. Ο συντελεστής ισχύος της ανεμογεννήτριας με κέλυφος βελτιώθηκε κατά έναν παράγοντα μεγαλύτερο του 2 σε σχέση με τον συντελεστή ισχύος της ανεμογεννήτριας χωρίς το κέλυφος.

Γενικά, φαίνεται ότι η προσθήκη του δρομέα μιας μικρής ανεμογεννήτριας στο εσωτερικό ενός κελύφους μπορεί να επιφέρει σημαντική βελτίωση στην απόδοσή της. Συγκεκριμένα η προσθήκη ανεμογεννητριών σε κέλυφος μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμη όταν αυτές πρόκειται να ενταχθούν στο κέλυφος ενός κτιρίου. Δεδομένου ότι στην περίπτωση ένταξης σε κτίριο δεν απαιτείται η κατασκευή επιπλέον κελύφους, μιας και αυτό μπορεί να προκύπτει από το ίδιο το κτιριακό κέλυφος το κόστος κατασκευής του κελύφους μπορεί ακόμη και να ελαχιστοποιηθεί. Το μοναδικό μειονέκτημα αυτής της ιδέας έχει να κάνει με το ότι η χρησιμοποιούμενη ανεμογεννήτρια χάνει την ικανότητά της να λειτουργεί ανεξάρτητα από τη διεύθυνση του ανέμου.

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] 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.
- [6] 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.
- [7] Ohya, Y., Karasudani, T., Sakurai, A., Inoue, M., 2006, "Development of a High-Performance Wind Turbine Equipped with a Brimmed Diffuser Shroud", *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 49(163), pp. 18-24.
- [8] 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.
- [9] Ohya, Y., Karasudani, T., Sakurai, A., Abe K., Inoue, M., 2008, "Development of a Shrouded Wind Turbine With a Flanged Diffuser", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(5), pp. 524-539.
- [10] Ohya, Y., Karasudani, T., 2010, "A Shrouded Wind Turbine Generating High Output Power with Wind-lens Technology", *Energies*, 3(4), pp. 634-649.
- [11] Sharpe, T., Proven, G., 2010, "Crossflex Concept and early development of a true building integrated wind turbine", *Energy and Buildings*, 42(12), pp. 2365-2375.
- [12] Watson, S. J., Infield, D. G., Barton, J. P., Wylie, S. J., 2007, "Modelling of the Performance of a Building-Mounted Ducted Wind Turbine", *Journal of Physics: Conference Series*, 75.

- [13] Abu-El-Yazied, T. G., Ali, A. M., Montasser, O. A., 2014, "Optimization of Wind Duct Geometry for Maximizing Power Generation of Ducted Vertical Turbines", *Journal of Engineering*, 4(10), pp. 11-19.
- [14] Krishnan, A., Paraschivoiu, M., 2015, "3D Analysis of Building Mounted VAWT with Diffuser Shaped Shroud", *Sustainable Cities and Society*.
- [15] Zanforlin, S., Letizia, S., 2015, "Improving the Performance of Wind Turbines in Urban Environment by Integrating the Action of a Diffuser with the Aerodynamics of the Rooftops", *Energy Procedia*, 82, pp. 774-781.
- [16] Müller, G., Jentsch, M. F., Stoddart, E., 2009, "Vertical axis resistance type wind turbines for use in buildings", *Renewable Energy*, 34(5), pp. 1407-1412.
- [17] Kim, D., Gharib, M., 2013, "Efficiency improvement of straight-bladed vertical-axis wind turbines with an upstream deflector", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 115, pp. 48-52.
- [18] Somers, D.M., 2005, "The S833, S834, and S835 Airfoils: November 2001–November 2002", *Airfoils, Inc.*
- [19] Menter, F.R., 1994. "Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications". *AIAA Journal*, 32(8), August 1994, pp. 1598-1605.

ΥΒΡΙΔΙΚΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ-ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΚΑΛΥΨΗ ΤΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΝΗΣΙΩΝ

Γ. Νομικός, Κ.Α. Καββαδίας, Ι.Κ. Καλδέλλης*

Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., ΑΕΙ Πειραιά Τ.Τ.
Τ.Θ. 41046, Αθήνα 12201, jkald@puas.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα περισσότερα νησιά του Αιγαίου καλύπτουν τις ενεργειακές τους ανάγκες βασιζόμενα κυρίως στη λειτουργία των αυτόνομων και τοπικών θερμικών σταθμών παραγωγής (ΑΣΠ/ΤΣΠ) καταναλώνοντας εισαγόμενο πετρέλαιο. Η δαπανηρή λειτουργία των σταθμών αυτών σε συνδυασμό με τα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκαλεί η χρήση του πετρελαίου, καθιστούν επιτακτική την ανάγκη εύρεσης μιας βιώσιμης και ορθολογικής ενεργειακής λύσης για τα νησιά μας, με σεβασμό στα ευαίσθητα νησιωτικά οικοσυστήματα και στις επιλογές των τοπικών κοινωνιών.

Στα πλαίσια αυτά, οι υψηλές ταχύτητες ανέμου καθώς και το αξιόλογο κυματικό δυναμικό του ελληνικού αρχιπελάγους, θα μπορούσαν να αποτελέσουν κινητήρια δύναμη για μια βιώσιμη λύση ενεργειακού εφοδιασμού των νησιών αξιοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) σε συνδυασμό με κατάλληλα συστήματα αποθήκευσης σε ένα σύγχρονο υβριδικό ενεργειακό σταθμό.

Με αφετηρία τα παραπάνω, στην παρούσα έρευνα διερευνάται η συνδυασμένη αξιοποίηση του υφιστάμενου κυματικού και αιολικού δυναμικού σε αντιπροσωπευτικό νησί μεσαίου μεγέθους των Κυκλάδων για την κάλυψη των τοπικών αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας. Από τα αποτελέσματα της ερευνητικής προσπάθειας προκύπτει ότι η δημιουργία ενός υβριδικού ενεργειακού σταθμού συμβάλει στην αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ σε αυτόνομα μικροδίκτυα καθώς η στοχαστική παραγωγή των αιολικών μηχανών υποστηρίζεται σε σημαντικό βαθμό από την ομαλότερη (συναρτήσεϊ του χρόνου) παραγωγή των κυματικών μηχανών, οι οποίες παρουσιάζουν μεγαλύτερη "αδράνεια" στις στιγμιαίες αλλαγές των μετεωρολογικών δεδομένων. Επιπλέον, η δυνατότητα αποθήκευσης της περίσσειας ανανεώσιμης ενέργειας ενισχύει περαιτέρω την ενεργειακή αυτοδυναμία του νησιωτικού μικροδικτύου.

Παράλληλα, η αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας αποτελεί μια από τις προτεραιότητες της Ευρωπαϊκής Ένωσης (blue growth) σε μια προσπάθεια στήριξης των ΑΠΕ στο θαλάσσιο περιβάλλον με τεχνολογίες οι οποίες βρίσκονται στο τελικό στάδιο εξέλιξης. Το σχετικά ήπιο (σε σχέση με το δυναμικό των ανοικτών θαλασσών) κυματικό δυναμικό του Αιγαίου σε συνεργασία -σε επίπεδο υποδομών- με μια ώριμη ενεργειακή τεχνολογία όπως η αιολική ενέργεια, αναμένεται ότι θα προωθήσει τις ενεργειακά καθαρές λύσεις για τις απομακρυσμένες νησιωτικές κοινότητες του Αιγαίου, μειώνοντας την εξάρτησή τους από το πετρέλαιο και αυξάνοντας την ενεργειακή τους ασφάλεια.

Λέξεις Κλειδιά: ΑΣΠ, Μικροδίκτυα, Ενεργειακός Εφοδιασμός, Μη διασυνδεδεμένα νησιά, ΑΠΕ

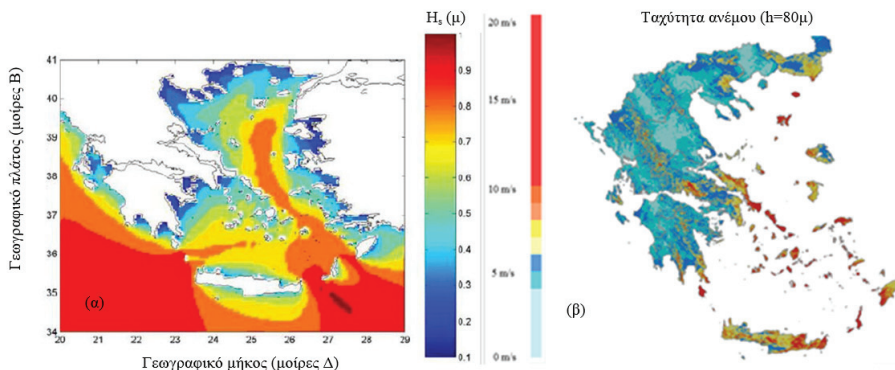
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ηλεκτροδότηση των νησιών του Αιγαίου Πελάγους καλύπτεται μέσω των αυτόνομων και τοπικών πετρελαϊκών σταθμών παραγωγής (ΑΣΠ/ΤΣΠ) (εικόνα (1)). Κατ' επέκταση, οι αυξημένες ανάγκες για συμβατικά καύσιμα με το αντίστοιχο υψηλό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η περιβαλλοντική υποβάθμιση [1], καθώς επίσης και τα εμπόδια που υπάρχουν στη διείσδυση της αιολικής ενέργειας [2] σε μικρά αυτόνομα ηλεκτρικά δίκτυα λόγω της στοχαστικής της παραγωγής, στρέφουν το ενδιαφέρον προς υβριδικές λύσεις με βάση τις ΑΠΕ.



Εικόνα 1: Θερμικοί Σταθμοί Παραγωγής στα Μη Διασυνδεδεμένα Ελληνικά νησιά (ΔΕΗ Αναενώσιμες, 2016) [3]

Στο πλαίσιο αυτό, η αξιοποίηση δύο ή περισσότερων διαφορετικών ΑΠΕ στοχεύει στην αύξηση της διείσδυσης τους στα αυτόνομα δίκτυα, καθώς η μία ενεργειακή πηγή θα μπορούσε να αντισταθμίσει τη στοχαστική παραγωγή της άλλης. Αντίστοιχη υβριδική ενεργειακή λύση αποτελεί ο συνδυασμός της αξιοποίησης του αιολικού και του κυματικού δυναμικού της Ελλάδος, καθώς τα απομακρυσμένα νησιά χαρακτηρίζονται από αξιόλογο κυματικό (εικόνα (2α)) και υψηλό αιολικό δυναμικό (εικόνα (2β)) [4,5,6].



Εικόνα 2: Ετήσια κατανομή, (α) μέσου ετήσιου σημαντικού ύψους κύματος στο Αιγαίο (μοντέλο WAM-cycle 4, 1999-2001) [4] και (β) μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου στην Ελλάδα σε ύψος 80m (PAE GeoPortal) [6]

Μελέτη του συνδέσμου "European Ocean Energy Association" αναφέρει ότι η αξιοποίηση του δυναμικού κυματικής ενέργειας των ευρωπαϊκών θαλασσών μπορεί να οδηγήσει σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής ισχύος 3,5 GW μέχρι το 2020, με ένα ακόμη πιο αισιόδοξο σενάριο για εγκατεστημένη ισχύ κυματικών μηχανών περί τα 180 GW έως το 2050 [7].

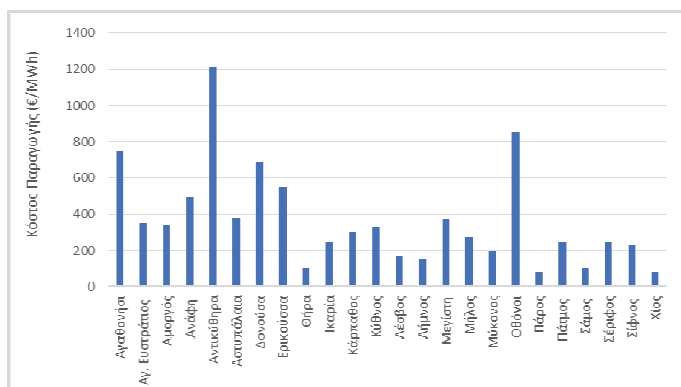
Σύμφωνα με τα παραπάνω, στην παρούσα έρευνα εξετάζονται οι δυνατότητες διείσδυσης των ΑΠΕ στα μικροδίκτυα των ελληνικών νησιών, με τη δημιουργία ενός υβριδικού συστήματος αξιοποίησης της αιολικής και της κυματικής ενέργειας στην περιοχή του κεντρικού Αιγαίου και ειδικότερα σε τυπικό νησί μεσαίου μεγέθους που διαθέτει σημαντικό αιολικό και κυματικό δυναμικό. Επιπλέον, εξετάζεται το ενδεχόμενο αποθήκευσης της περίσσειας ενέργειας από τις ΑΠΕ με σκοπό την αξιοποίησή της σε περίπτωση μειωμένης ενεργειακής παραγωγής από το σταθμό.

Για το σκοπό αυτό αξιοποιούνται δεδομένα ωριαίας ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου του νησιού σε ετήσια βάση (8760 ωριαίες τιμές), καθώς επίσης και αντίστοιχες ωριαίες τιμές ταχύτητας ανέμου και ύψους κύματος, βάσει των οποίων υπολογίζεται η αναμενόμενη ενεργειακή παραγωγή από ΑΠΕ.

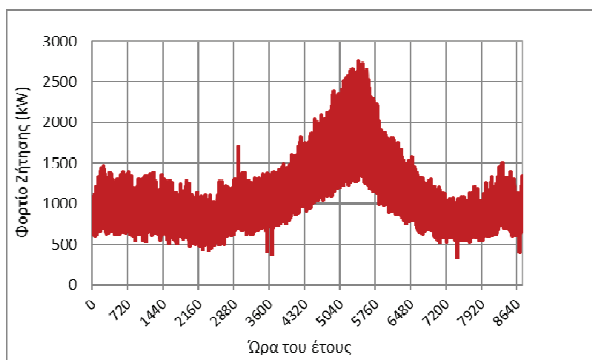
Η μεθοδολογία υπολογισμών εφαρμόζεται για διαφορετικούς συνδυασμούς ανεμογεννητριών και κυματικών μηχανών, προκειμένου να προσδιοριστούν οι βέλτιστες διαστάσεις της υβριδικής μονάδας, με κριτήριο την καλύτερη δυνατή σχέση μεταξύ κόστους εγκατάστασης και ενεργειακής αυτονομίας.

2. ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Η πλειοψηφία των νησιών του Αιγαίου είναι κυρίως μη διασυνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο της ηπειρωτικής χώρας και η ηλεκτροδότησή τους βασίζεται σε ΑΣΠ/ΤΣΠ που καταναλώνουν κυρίως εισαγόμενο πετρέλαιο, με υψηλό λειτουργικό κόστος, όπως ενδεικτικά φαίνεται στο σχήμα (εικόνα (3)).



Εικόνα 3: Κόστος ηλεκτροπαραγωγής των ΑΣΠ/ΤΣΠ στα νησιά του Αιγαίου (2010) [8]



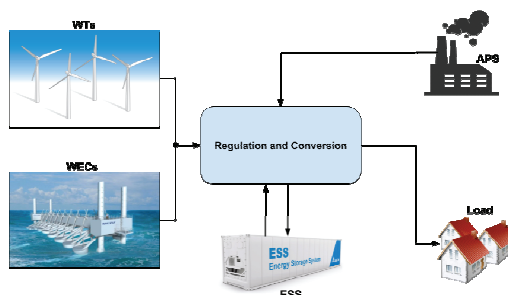
Εικόνα 4: Ωριαίες τιμές φορτίου ζήτησης σε μεσαίας κλίμακας νησί των Κυκλάδων

Όσον αφορά στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, το αυτόνομο ηλεκτρικό δίκτυο που μελετάται ηλεκτροδοτείται από ΤΣΠ που αποτελείται από μηχανές «ντίζελ» συνολικής ονομαστικής ισχύος της

3. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΛΥΣΗ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

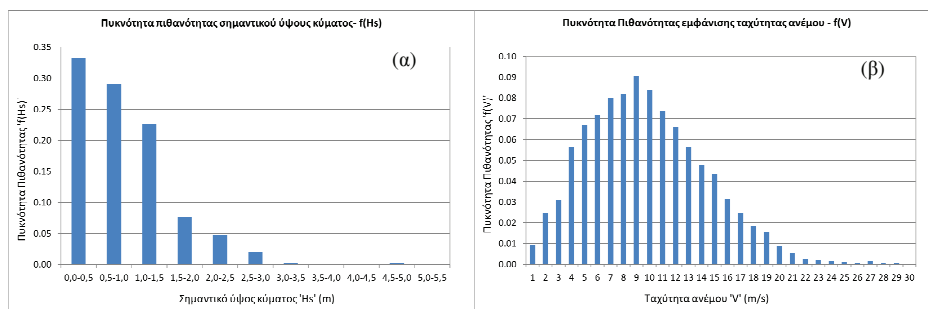
Λαμβάνοντας υπόψιν το διαθέσιμο ενεργειακό δυναμικό των ΑΠΕ του Αιγαίου, τα μη διασυνδεδεμένα νησιά θα μπορούσαν να επωφεληθούν από την εφαρμογή αντίστοιχων υβριδικών ενεργειακών λύσεων. Η τρέχουσα έρευνα επικεντρώνεται στην αξιοποίηση του δυναμικού της κυματικής και αιολικής ενέργειας του κεντρικού αρχιπελάγους του Αιγαίου και ειδικότερα σε ένα τυπικό μεσαίου μεγέθους μη διασυνδεδεμένο νησί. Στο πλαίσιο αυτό, εξετάζεται πώς αυτές οι δυο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν, ώστε με μικρό αριθμό ανεμογεννητριών και κυματικών μηχανών να επιτευχθούν υψηλότερα επίπεδα διείσδυσης ΑΠΕ στο δίκτυο του νησιού [10,11].

Βάσει των όσων προαναφέρθηκαν, η ηλεκτρική ζήτηση καλύπτεται από την παραγωγή των ανεμογεννητριών και κυματικών μηχανών καθώς και από το σύστημα αποθήκευσης, ενώ σε περίπτωση ελλείματος το φορτίο καλύπτεται από τον υφιστάμενο ΑΣΠ/ΤΣΠ (εικόνα (7)).



Εικόνα 7: Η προτεινόμενη ενεργειακή λύση του υβριδικού σταθμού

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας, η μεθοδολογία η οποία ακολουθήθηκε εστιάζει, όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, σε ένα τυπικό νησί μεσαίου μεγέθους με μέγιστο φορτίο ζήτησης 3MW, με αξιόλογο κυματικό (εικόνα (8α)) και υψηλό αιολικό δυναμικό (εικόνα (8β)). Για την αξιολόγηση της προτεινόμενης ενεργειακής λύσης χρησιμοποιήθηκαν αναλυτικές ωριαίες τιμές για ένα έτος του ηλεκτρικού φορτίου ζήτησης, της ταχύτητας του ανέμου και του σημαντικού ύψους και ενεργειακής συχνότητας κύματος.



Εικόνα 8: Πυκνότητα πιθανότητας (α) σημαντικού ύψους κύματος και (β) ταχύτητας ανέμου

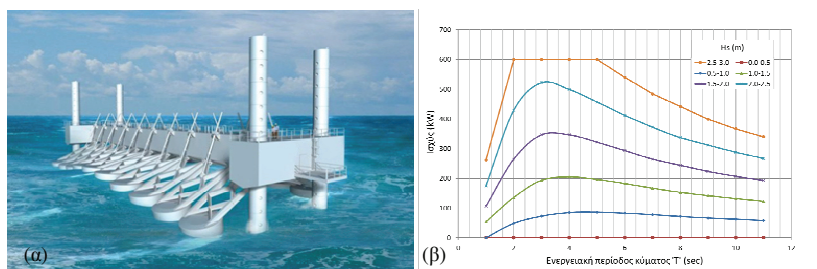
Ειδικότερα, τα ωριαία φορτία προέρχονται από στοιχεία που παραχωρήθηκαν από το τμήμα Διεύθυνσης Παραγωγής Νήσων της ΔΕΗ, ενώ η ταχύτητα του ανέμου προέρχεται από υφιστάμενες μετρήσεις αιολικού πάρκου στην ευρύτερη περιοχή. Αντίστοιχα, τα δεδομένα του κυματικού δυναμικού παραχωρήθηκαν από το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών «ΕΛΚΕΘΕ» μέσω της διαδικτυακής πλατφόρμας ΠΟΣΕΙΔΩΝ [12].

Στη συνέχεια, επιλέχθηκε ο εξοπλισμός που μπορεί αξιοποιήσει όσον το δυνατόν αποτελεσματικότερα τις ΑΠΕ του νησιού. Στα πλαίσια αυτά, επιλέχθηκαν αιολικές μηχανές με μέγιστη ονομαστική ισχύ μικρότερη από 1 MW η κάθε μια, λαμβάνοντας υπόψιν τις δυνατότητες του υφιστάμενου οδικού δικτύου. Αντίστοιχα, επιλέχθηκε η τεχνολογία κυματικής μηχανής (εικόνα (9)) με δυνατότητα

αξιοποίησης του σχετικά χαμηλού αλλά αξιοποιήσιμου κυματικού δυναμικού των Ελληνικών θαλασσών [13], έτσι ώστε να συνεισφέρει σε καθημερινή βάση στην ενεργειακή παραγωγή του νησιού. Τέλος, για την αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ στα νησιωτικά μικροδίκτυα, επιλέχθηκε σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με βάση την ωριμότητα και τα χαρακτηριστικά της τεχνολογίας (εικόνα (10)).

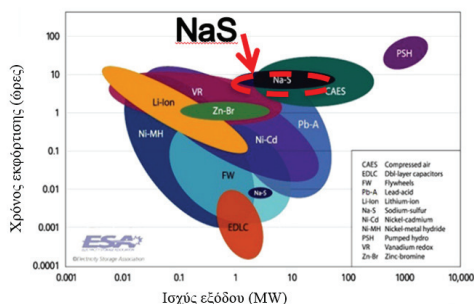
Η προτεινόμενη ανεμογεννήτρια με ονομαστική ισχύ 900 kW ενδείκνυται για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση καθώς οι υποδομές στο νησί, όπως δρόμοι, διαθέσιμοι λιμένες και η χρήση γης, δεν προσφέρονται για μεγαλύτερες μηχανές.

Όσον αφορά την κυματική ενέργεια, μεταξύ των εμπορικά διαθέσιμων τεχνολογιών αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας επιλέχθηκε η μηχανή Wave Star (εικόνα (9α,β)) καθώς παρουσιάζει υψηλότερο βαθμό απόδοσης για κύματα χαμηλού ύψους σε σύγκριση με αντίστοιχες μηχανές όπως η "Pelamis" ή η "Wave Dragon", που χρειάζονται μεγαλύτερο ύψος κυμάτων για να λειτουργήσουν κοντά στην ονομαστική τους ισχύ. [13]



Εικόνα 9: Κυματική μηχανή WaveStar 600 kW (α) Σχηματική απεικόνιση (β) Διάγραμμα Ισχύος

Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας που επιλέχθηκε αποτελείται από μπαταρίες νατρίου-θείου (NaS), καθώς είναι ήδη σε εμπορικό στάδιο και μπορούν να ικανοποιήσουν τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για αρκετό χρονικό διάστημα όπως φαίνεται από την εικόνα (10).



Εικόνα 10: Τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας (Energy Storage Association, 2008)

Οι μπαταρίες NaS χαρακτηρίζονται ως μία από τις επιλογές χαμηλού σχετικά κόστους για αποθήκευση σε κλίμακα δικτύου και ενδείκνυνται για υποστήριξη δικτύου και εφαρμογές ΑΠΕ. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά μιας μπαταρίας NaS είναι η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, ο μεγάλος αριθμός κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης, η υψηλή ισχύς και οι υψηλές σχετικά θερμοκρασίες λειτουργίας (300-350°C).

Το εύρος των πιθανών συνδυασμών μονάδων ΑΠΕ και συστήματος αποθήκευσης επιλέχθηκε με κριτήριο τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού φορτίου του νησιού (φορτίο αιχμής ~3 MW, ετήσιες ενεργειακές ανάγκες ~9 GWh_e). Πιο συγκεκριμένα, οι πιθανές λύσεις επιλέχθηκαν ώστε να ικανοποιούνται τα παρακάτω κριτήρια:

- Μέση ημερήσια αυτονομία από 12 έως 20 ώρες
- Μέγιστη ισχύς ΑΠΕ ~ 3 MW

- Ορθολογικό κόστος της επένδυσης
- Περίσσεια ενέργειας από παραγωγή του υβριδικού σταθμού που να μην ξεπερνάει το 1/3 των ετήσιων αναγκών του νησιού

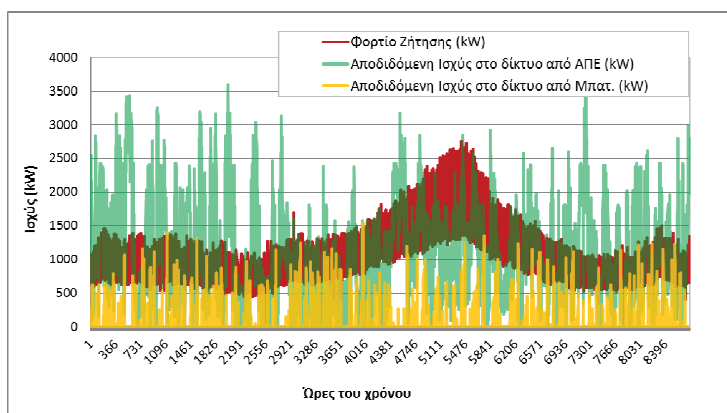
Κατά την προσομοίωση του υβριδικού σταθμού εξετάστηκαν τα παρακάτω σενάρια λειτουργίας:

- Η παραγωγή από ΑΠΕ είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση:
 - Στην περίπτωση αυτή η ενέργεια τροφοδοτείται στο δίκτυο, ενώ εάν υπάρχει πλεόνασμα και ταυτόχρονα αποθηκευτική διαθεσιμότητα, η πλεονάζουσα ενέργεια αποθηκεύεται.
- Αν η παραγωγή των ΑΠΕ καλύπτει εν μέρει τη ζήτηση:
 - Στην περίπτωση αυτή το έλλειμμα καλύπτεται από τη διαθέσιμη αποθηκευμένη ενέργεια, διαφορετικά το έλλειμμα ενέργειας καλύπτεται από το θερμικό σταθμό.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

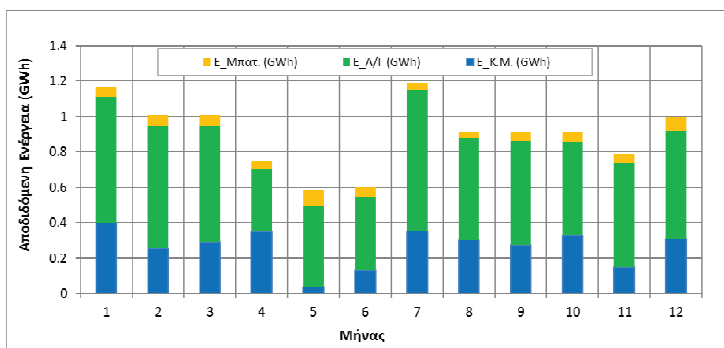
Λαμβάνοντας υπόψιν τα σενάρια λειτουργίας που προαναφέρθηκαν, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 120 αριθμητικές προσομοιώσεις με στόχο την επιλογή των συνδυασμών ΑΠΕ και μπαταριών που αποτελούν τις πιο ορθολογικές λύσεις. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν συνδυασμοί από 1 έως 5 ανεμογεννήτριες των 900 kW, 1 έως 6 κυματικές μηχανές των 600 kW και μπαταρίες χωρητικότητας από 5 έως 20 MWh με βήμα 2.5 MWh.

Όλοι οι συνδυασμοί που προέκυψαν από την προσομοίωση αξιολογήθηκαν σε ωριαίο βήμα για ένα έτος (8760 ωριαίες τιμές), εξάγοντας αποτελέσματα όπως η συμμετοχή του υβριδικού σταθμού στην κάλυψη του φορτίου ζήτησης του νησιού. Στην εικόνα (11) παρουσιάζεται η ωριαία διακύμανση της αποδιδόμενης ενέργειας από τον υβριδικό σταθμό καθώς και η ζήτηση φορτίου του νησιού για μια από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις. Παράλληλα στην εικόνα (12) παρουσιάζεται η συνεισφορά του υβριδικού σταθμού στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε μηνιαία βάση.



Εικόνα 11: Ωριαίο φορτίο και ωριαία αποδιδόμενη ισχύς ΑΠΕ και μπαταριών στο δίκτυο

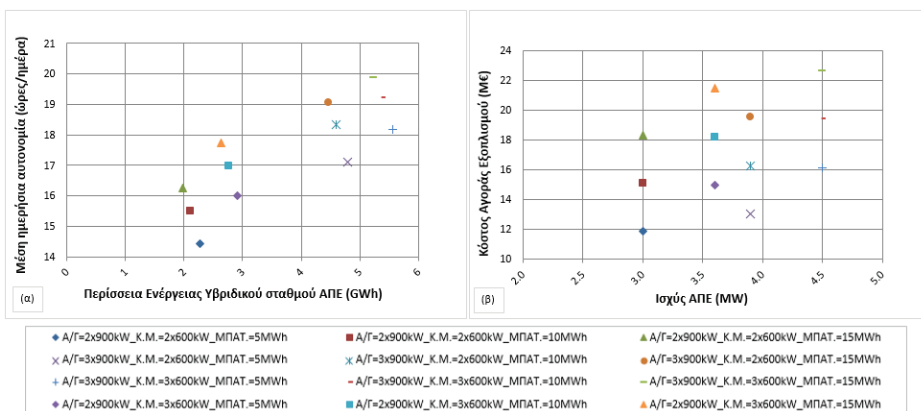
Όπως προκύπτει από τα γραφήματα, τη μεγαλύτερη συμμετοχή στην παραγωγή ενέργειας από τον υβριδικό σταθμό έχουν οι ανεμογεννήτριες, ενώ η στοχαστική συμπεριφορά του ανέμου καλύπτεται σε σημαντικό βαθμό από την κυματική ενέργεια. Παράλληλα, το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, μπορεί να υποστηρίξει σημαντικά τον υβριδικό σταθμό για ακόμη μεγαλύτερη διείσδυση ΑΠΕ στο αυτόνομο δίκτυο του νησιού, ενώ καλύπτει το έλλειμμα ενέργειας κυρίως στις ημερήσιες αιχμές, μειώνοντας την εξάρτηση του νησιού από το πετρέλαιο [14,15].



Εικόνα 12: Μηνιαία αποδοδόμενη ενέργεια από ανεμογεννήτριες (Α/Γ), κυματικές μηχανές (Κ.Μ.) και μπαταρίες (Μπατ.).

Όπως είναι αναμενόμενο, τους χειμερινούς μήνες παρουσιάζεται αυξημένη περίσσεια ενέργειας, ενώ τους θερινούς μήνες λόγω της αυξημένης ζήτησης η ενέργεια του υβριδικού σταθμού απορροφάται στο μέγιστο ποσοστό. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της εικόνας (12), οι αυξημένες ταχύτητες του ανέμου που παρουσιάζονται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και ειδικότερα τον μήνα Ιούλιο, συμβάλουν σημαντικά στην αντιμετώπιση του φορτίου αιχμής. Για την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου απαιτείται υπερδιαστασιολόγηση του συστήματος, που όμως δεν επιλέγεται ως λύση λόγω του υψηλού κόστους της εγκατάστασης.

Με βάση τα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιούν οι πιθανοί συνδυασμοί για τον προτεινόμενο υβριδικό σταθμό, προκύπτει ένας αριθμός συνδυασμών των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα της εικόνας (13).



Εικόνα 13: (α) Μέση ημερήσια αυτονομία και περίσσεια ενέργειας υβριδικού σταθμού ΑΠΕ και (β) ισχύς και κόστος εξοπλισμού για τους προτεινόμενους συνδυασμούς ανεμογεννητριών (Α/Γ), κυματικών μηχανών (Κ.Μ.) και μπαταριών

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, όσο αυξάνεται η ισχύς των ΑΠΕ τόσο αυξάνεται η αυτονομία που επιτυγχάνεται, ωστόσο υπάρχει αντίστοιχη αύξηση του κόστους και περισσεύας ενέργειας που δεν αξιοποιείται επομένως η υπερδιαστασιολόγηση των ΑΠΕ δεν ενδείκνυται για τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Όσον αφορά τη διαστασιολόγηση των μπαταριών, παρατηρείται πώς για κάθε 5 MWh αύξησης χωρητικότητας μπαταριών επιτυγχάνεται μόνο μια ώρα επιπλέον αυτονομία, ενώ το κόστος αυξάνει κατά 3 περίπου εκατομμύρια ευρώ. Επίσης παρατηρείται ότι με τους προτεινόμενους συνδυασμούς μπορεί να επιτευχθεί έως και 20 τυπικές ώρες αυτονομία. Σε γενικότερο πλαίσιο, μπορεί μια τέτοια επιλογή να αποτελεί την πιο ακριβή λύση, ωστόσο θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η σημαντικότητα της ενεργειακής αυτονομίας που επιτυγχάνεται για τις απομακρυσμένες περιοχές

καθώς και οι περιβαλλοντικές συνέπειες που αποφεύγονται λόγω του περιορισμού της χρήσης του πετρελαίου.

Στα παραπάνω αποτελέσματα θα πρέπει να ληφθεί υπόψη πώς δεν έχει εξετασθεί η περίπτωση διαχείρισης της ζήτησης στο νησί με πιθανή τοποθέτηση έξυπνων μετρητών. Στην περίπτωση αυτή θα είχαμε τη δυνατότητα μετατόπισης των ημερήσιων φορτίων αιχμής με άμεσο επακόλουθο τη μείωση χρήσης του συμβατικού σταθμού, άρα μείωση χρήσης του πετρελαίου, ενώ ταυτόχρονα με τις ίδιες προτεινόμενες επιλογές υβριδικών σταθμών θα ήταν εφικτή η περαιτέρω αύξηση της αυτονομίας.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η συγκεκριμένη έρευνα επικεντρώνεται στην αξιοποίηση της αιολικής και κυματικής ενέργειας στην περιοχή του Αιγαίου και συγκεκριμένα σε ένα τυπικό μεσαίου μεγέθους νησί, με απώτερο σκοπό τη σταδιακή απεξάρτηση του νησιού από τη χρήση πετρελαίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο πλαίσιο αυτό, τα απομακρυσμένα νησιά του Αιγαίου θα μπορούσαν να προχωρήσουν σε καινοτόμες εγκαταστάσεις υβριδικών σταθμών, όπως ο προτεινόμενος στην παρούσα έρευνα που εξετάζει το συνδυασμό αιολικών και κυματικών μηχανών με δυνατότητα αποθήκευσης της περίσσειας ενέργειας.

Η συγκεκριμένη υβριδική λύση για την ηλεκτροδότηση των απομακρυσμένων νησιών αξιολογείται για διαφορετικές τιμές ισχύος των ΑΠΕ καθώς και χωρητικότητας μπαταριών, ανάλογα με τις ώρες αυτονομίας που επιτυγχάνεται, το κόστος της επένδυσης και την περίσσεια ενέργειας που δεν μπορεί να απορροφηθεί από το δίκτυο ή τις μπαταρίες.

Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται αριθμητική προσομοίωση για δεκάδες συνδυασμούς ΑΠΕ και μπαταριών για κάλυψη του φορτίου σε ωριαίο βήμα, από τα οποία παρουσιάζεται ένα εύρος λύσεων στα πλαίσια μιας ορθολογικής πρότασης.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης προέρχεται κυρίως από τις αιολικές μηχανές, ενώ οι αντίστοιχες κυματικές μηχανές συνεισφέρουν λιγότερο μεν ικανοποιητικά δε, ιδίως αν ληφθεί υπόψη ότι πρόκειται για μια τεχνολογία που ακόμη εξελίσσεται, ενώ επιπλέον παρουσιάζει την ιδιαιτερότητα της χρονικής καθυστέρησης στις μεταβολές της παραγωγής αντισταθμίζοντας τη στοχαστική παραγωγή των αιολικών μηχανών. Παράλληλα, η αξιοποίηση της κυματικής ενέργειας βοηθά στον περιορισμό του ρόλου των μπαταριών κυρίως στην αντιμετώπιση των ημερήσιων φορτίων αιχμής και συνεισφέρει περί τα 12% στην κάλυψη των ετήσιων αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας του νησιού.

Ένα ακόμα συγκριτικό πλεονέκτημα του προτεινόμενου υβριδικού σταθμού είναι το μειωμένο κόστος εγκατάστασης εφόσον η εγκατάσταση υλοποιηθεί στην ίδια τοποθεσία (π.χ. κοινό καλώδιο, μετασχηματιστές), ενώ η κυματική ενέργεια είναι μια ανερχόμενη ΑΠΕ που αναμένεται να εδραιωθεί στο χώρο των ενεργειακών λύσεων όταν η τεχνολογία ωριμάσει και το αρχικό κόστος της επένδυσης μειωθεί (~ 4000 €/kW σήμερα).

Τέλος, η παρούσα έρευνα θα μπορούσε να προσελκύσει κι άλλες τεχνολογίες εφαρμογής, όπως για παράδειγμα την προσθήκη μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης στο ήδη εξεταζόμενο υβριδικό σύστημα. Επίσης, μια εκτενής τεχνικοοικονομική αξιολόγηση καθώς και μια πιθανή έρευνα ως προς την κοινωνική αποδοχή ενός τέτοιου έργου αποτελούν επόμενα βήματα μιας συνολικής ανάλυσης που θα προσφέρει μια ακόμη πιο ολοκληρωμένη λύση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών στα μη διασυνδεδεμένα νησιά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J.K. Kaldellis, G.Th. Vlachos, A.G. Paliatsos, E.M. Kondili. Detailed examination of the Greek electricity sector nitrogen oxides emissions for the period 1995–2002. *Environmental Science Policy* 2005;8:502–514.
- [2] Papathanassiou S, Boulaxis N. Power limitations and energy yield evaluation for wind farms operating in island systems. *Renewable Energy* 2006;31:457–579.
- [3] PPC Renewables, 2016. Securing Energy Supply to the Greek Islands in combination with RES Development. Available at

http://www.renewablesb2b.com/data/shared/02_Securing_energy_supply_to_the_Greek_islands_in_combination_with_RES_development.pdf. Accessed on 24/02/2017

- [4] H. Soukissian, M. Hatzinaki, G. Korres, A. Papadopoulos, G. Kallos, E. Anadranistakis, Wind and Wave Atlas of the Hellenic Seas. Anavyssos: Hellenic Centre for Marine Research, 2007.
- [5] A. Clément, P. McCullen, A. Falcão, A. Fiorentino, F. Gardner, K. Hammarlund, G. Lemonis, T. Lewis, K. Nielsen, S. Petroncini, M.T. Pontes, P. Schild, B.O. Sjöström, H.C. Sørensen, T. Thorpe, Wave energy in Europe: Current status and perspectives, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 6(2002) 405-431.
- [6] Regulatory Agency for Energy, 2017. Wind Map of Greece. Available at <http://www.rae.gr/geo>. Accessed on 24/02/2017
- [7] European Ocean Energy Association, Available at: <https://www.oceanenergy-europe.eu/en/>
- [8] J.K. Kaldellis, Critical evaluation of financial supporting schemes for wind-based projects: Case study Greece. *Energy Policy* 2011;39:2490–2500
- [9] J.K. Kaldellis, D. Zafirakis. Present situation and future prospects of electricity generation in Aegean Archipelago islands. *Energy Policy*, 35 (9) (2007), pp. 4623-4639
- [10] J.K. Kaldellis, Ant. Gkikaki, El. Kaldelli, M. Kapsali, Investigating the energy autonomy of very small non-interconnected islands. A case study: Agathonisi, Greece, *Energy for Sustainable Development* 16(4) (2012) 476-485.
- [11] J.K. Kaldellis, D. Zafirakis, K.A. Kavadias, Techno-economic comparison of energy storage systems for island autonomous electrical networks, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 13 (2009) 378-392.
- [12] Hellenic Center for Marine Research (HCMR). Available at: <http://www.hcmr.gr/en/>
- [13] G. Lavidas, V. Venugopal, A 35 year high-resolution wave atlas for nearshore energy production and economics at the Aegean Sea, *Renewable Energy*, 103 (2017) 401-417
- [14] D. Zafirakis, C. Ntourou, C. Papapostolou, G. Nomikos, E.K. Kondili, J.K. Kaldellis. Design of an Integrated Wind-Based Energy Storage & Desalination Solution for the Island of Amorgos. 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion, Athens 2-5 November 2014.
- [15] D. Zafirakis, J.K. Kaldellis. Determination of Energy Storage Requirements in Relation to local RES Potential Characteristics for the Maximum Contribution of RES Power Generation in Aegean Sea Island Grids. 9th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion, Athens 2-5 November 2014.

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΟΜΟΡΟΥ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ**Π. Στίνης, Δ. Ζαφειράκης, Ι.Κ. Καδέλλης***

Εργαστήριο Ήπιων Μορφών Ενέργειας & Προστασίας Περιβάλλοντος,
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, ΑΕΙ Πειραιά Τ.Τ.
Τ.Θ. 41046, Αθήνα 12201, jkald@puas.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μια από τις βασικότερες ερευνητικές προκλήσεις για την περαιτέρω ανάπτυξη του τομέα των εφαρμογών της αιολικής ενέργειας είναι η βέλτιστη χωροθέτηση των αιολικών μηχανών για τη δημιουργία αιολικών πάρκων υψηλού ενεργειακού βαθμού απόδοσης αξιοποιώντας στο μέγιστο τις περιορισμένες κατά κανόνα διαθέσιμες εκτάσεις. Στα πλαίσια αυτά καθοριστική είναι η εξέλιξη του πεδίου ταχύτητας και της τύρβης του ανέμου μετά τη δίοδο του από τα περύγια μιας ανεμογεννήτριας. Φυσικά σημαντικό ρόλο παίζει και η διαμόρφωση του πεδίου ροής στα κατάντι της αιολικής μηχανής συναρτήσει της απόστασης από τη θέση της μηχανής αλλά και της τραχύτητας του εδάφους.

Για το σκοπό αυτό στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται και μελετώνται τα πλέον γνωστά και αξιόπιστα μοντέλα ομόρου (wake models), τα οποία εξετάζουν το πεδίο ταχύτητας του ανέμου στα κατάντι μιας ανεμογεννήτριας, κάτω από μεταβλητές συνθήκες λειτουργίας. Τα αποτελέσματα της συγκριτικής αυτής μελέτης οδηγούν σε καλύτερη κατανόηση του πεδίου ταχύτητας, γεγονός που αναμένεται να συμβάλει στη αποτελεσματικότερη χωροθέτηση νέων αιολικών πάρκων, καθώς μέχρι σήμερα τα διαθέσιμα εμπορικά λογισμικά βασίζονται κατά κανόνα στα αρχικά μοντέλα (π.χ. του Jensen, ή του Larsen), που προτάθηκαν στο τέλος του προηγούμενου αιώνα.

Από τα αποτελέσματα της αξιολόγησης των μοντέλων ομόρου αιολικών μηχανών προκύπτει ότι αν και η ακρίβεια των περισσότερων ημι-εμπειρικών μοντέλων είναι ικανοποιητική, ορισμένα σύγχρονα εξ αυτών παρουσιάζουν σημαντικά διαφοροποιημένες διανομές ταχύτητας κατάντι των ανεμογεννητριών, οι οποίες προσεγγίζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια πειραματικές μετρήσεις αλλά και τα αριθμητικά αποτελέσματα σύγχρονων αριθμητικών μεθόδων (CFD).

Λέξεις Κλειδιά: Αιολικά Πάρκα, Διανομή Ταχύτητας, Χωροθέτηση Αιολικών Μηχανών, Μοντέλα Ομόρου, Ενεργειακή Απόδοση

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

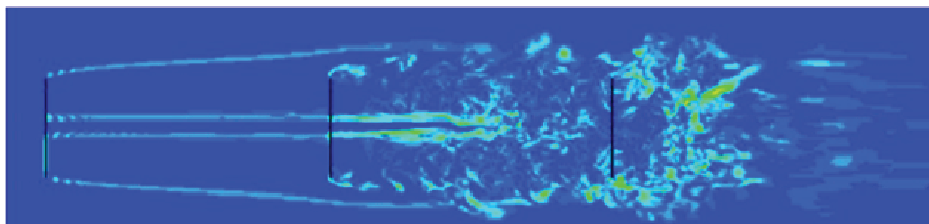
Η ραγδαία ανάπτυξη των εφαρμογών της αιολικής ενέργειας τα τελευταία χρόνια οδήγησε στο σχεδιασμό και την υλοποίηση μεγάλων επίγειων και θαλάσσιων αιολικών πάρκων, τα οποία και επέβαλαν την παρουσία σημαντικού αριθμού αιολικών μηχανών σε περιορισμένες εκτάσεις, με άμεσο αποτέλεσμα την αλληλεπίδραση της λειτουργίας γειτονικών μηχανών. Στα πλαίσια αυτά, ένα πολύ βασικό ζήτημα το οποίο έχει απασχολήσει συχνά την επιστημονική κοινότητα είναι το φαινόμενο του ομόρου [1, 2, 3], ο οποίος και επηρεάζει σημαντικά τη χωροθέτηση των αιολικών μηχανών σε δεδομένη γεωγραφική έκταση. Αρκετοί επιστήμονες μέχρι σήμερα, όπως οι Jensen (1983), Katic κ.α. (1986), Larsen (1988) και Frandsen κ.α. (2006), επιχείρησαν να δημιουργήσουν ρεαλιστικά μοντέλα πρόβλεψης της εξέλιξης και της έντασης του φαινομένου στο κατάντι των αιολικών μηχανών.

Τα μοντέλα που προέκυψαν από αυτή τη διαχρονική προσπάθεια ποικίλλουν, και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη δομή τους. Έτσι προέκυψαν σύνθετα υπολογιστικά μοντέλα ρευστοδυναμικής (CFD), τα οποία ενσωματώνουν διαφορετικές αριθμητικές τεχνικές επίλυσης των βασικών εξισώσεων ροής όπως και διαφορετικής πολυπλοκότητας μοντέλα προσομοίωσης της τύρβης, αλλά και ορισμένες απλούστερες αναλυτικές σχέσεις βασισμένες στην επίλυση εμπειρικών ή ημι-εμπειρικών εξισώσεων.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τη συγκριτική αξιολόγηση των πλέον διαδεδομένων εμπειρικών και ημι-εμπειρικών μοντέλων που εντοπίστηκαν από λεπτομερή έρευνα της σχετικής βιβλιογραφίας, εκτιμώντας ότι ο συγκεκριμένος τύπος μοντέλων προσφέρει γρήγορα και σχετικά αξιόπιστα αποτελέσματα, ενώ αποφεύγεται το υψηλό υπολογιστικό κόστος που απαιτεί η χρήση μεθόδων CFD. Να σημειωθεί ότι αρκετά από τα υπό εξέταση μοντέλα βρίσκονται ήδη σε χρήση σε εμπορικά λογισμικά και έχουν συμβάλει καθοριστικά στη χωροθέτηση των υφιστάμενων αιολικών πάρκων, ενώ τα τελευταία χρόνια έχουν εμφανιστεί και ορισμένα νέα πιο σύνθετα ημι-εμπειρικά μοντέλα τα οποία χρήζουν αξιολόγησης.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Κατά τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική και τελικά σε ηλεκτρική κατά τη δίοδο του μέσα από τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας, το πεδίο ροής του ανέμου επηρεάζεται άμεσα, καταλήγοντας σε ροή αισθητά μειωμένου ενεργειακού περιεχομένου και αυξημένης τύρβης. Ως αποτέλεσμα, ο άνεμος όπισθεν της αιολικής μηχανής παρουσιάζει αισθητά μειωμένη ταχύτητα και επίσης έντονα τυρβώδη ροή (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Αλληλεπίδραση ομόρων μεταξύ αιολικών μηχανών σε απόσταση 3 D μεταξύ τους [4]

Η ροή του ανέμου η οποία αναφέρθηκε παραπάνω είναι γνωστή ως ομόρους του ανέμου (wake effect) ή αλλιώς σκίαση της αιολικής μηχανής. Οι δύο βασικότερες επιπτώσεις του ομόρου είναι η μειωμένη ταχύτητα του ανέμου που προκαλεί μειωμένη παραγωγή ενέργειας στην κατάντι μηχανή και η αύξηση της μηχανικής καταπόνησης των «επόμενων» μηχανών, που οδηγεί σε αυξημένα λειτουργικά κόστη και ενδεχομένως σε μείωση της διάρκειας ζωής των μηχανών αυτών.

Ο ομόρους κατηγοριοποιείται συνήθως σε κοντινό και μακρινό, η διαφοροποίηση των οποίων προκύπτει από την κατάντι απόσταση από το ρότορα αναφοράς. Το όριο μεταξύ των δύο αυτών περιοχών είναι αντικείμενο συζήτησης μεταξύ των επιστημόνων [5, 6], ωστόσο ένα γενικώς αποδεκτό σημείο είναι οι τρεις διάμετροι ρότορα (x/D) κατάντι μιας μηχανής.

Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται σε περιοχές του «μακρινού» ομόρου, καθότι η πλειοψηφία των αναλυτικών μοντέλων αδυνατούν να παρέχουν αξιόπιστα στοιχεία προβλέψεων για περιοχές πλησίον της «προπορευόμενης» αιολικής μηχανής, ενώ είναι εξαιρετικά σπάνιο να τοποθετηθεί αιολική μηχανή όπισθεν άλλης σε τόσο κοντινή απόσταση. Αντ' αυτού, τίθεται μια νέα κατηγοριοποίηση που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία. Σύμφωνα με αυτή, η «μέση περιοχή» μελέτης οριοθετείται μεταξύ τριών (3) και εννέα (9) διαμέτρων ρότορα όπισθεν της αιολικής μηχανής, καθώς η «μακρινή περιοχή» οριοθετείται μεταξύ δέκα (10) και είκοσι (20) διαμέτρων ρότορα όπισθεν της μηχανής. Ο λόγος αυτής της κατηγοριοποίησης βασίζεται στο γεγονός ότι η μέση περιοχή είναι η περιοχή μέσα στην οποία συνθίζεται να εγκαθίστανται οι διαδοχικές αιολικές μηχανές. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα εξεταζόμενα μοντέλα που είναι σε θέση να περιγράψουν το παραπάνω φαινόμενο με σχετικά μεγάλη αξιοπιστία.

2.1. Τα μοντέλα ομόρου

2.1.1. Μοντέλο Jensen/Katic 'Park'

Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί μια από τις πλέον αρχικές προσεγγίσεις και βασίζεται σε δύο εξισώσεις που προτάθηκαν από τον Jensen (1983) [7]. Ο Jensen υπέθεσε ένα γραμμικά διαστελλόμενο όμορο με σταθερή σταδιακή επαναφορά της ταχύτητας. Οι εξισώσεις είναι οι παρακάτω:

$$D_w = 2(kx + r_0) \quad \text{και} \quad V_{DEF} = U \left[1 - \frac{2}{3} \left(\frac{r_0}{r_0 + kx} \right)^2 \right] \quad (1, 2)$$

Όπου D_w η διάμετρος του ομόρου, x η κατάντι της μηχανής απόσταση, r_0 η ακτίνα του ρότορα, k ο συντελεστής διαστολής ομόρου, V_{DEF} το έλλειμμα ταχύτητας ανέμου και U η έμπροσθεν της αιολικής μηχανής (αδιατάρακτη) ταχύτητα ανέμου.

Ο Katic εξέλιξε τις ανωτέρω εξισώσεις στην παρακάτω σχέση [8], που θα γίνει γνωστή ως μοντέλο Park:

$$1 - \frac{V_{DEF}}{U} = \frac{(1 - \sqrt{1 - Ct})}{\left(1 + \frac{2kx^2}{D}\right)} \quad (3)$$

Όπου C_t ο συντελεστής ώσης και D η διάμετρος του ρότορα της υπό μελέτη αιολικής μηχανής. Κατά τη διαδικασία σύγκρισης, τα δύο μοντέλα θα θεωρηθούν ως ξεχωριστά.

2.1.2. Μοντέλο Larsen

Ο Larsen (1988) επίσης εξέλιξε ένα καθαρά αριθμητικό μοντέλο [9], βασισμένο στις εξισώσεις του Prandtl:

$$\Delta U_1(x, r) = -\frac{U_\infty}{9} (C_T A (\Delta x)^{-2})^{\frac{1}{3}} \left[r^{\frac{3}{2}} (3c_1^2 C_T A \Delta x)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{35}{2\pi} \right)^{\frac{3}{10}} (3c_1^2)^{\frac{1}{5}} \right]^2 \quad (4)$$

$$a_1 = \left(\frac{102}{2\pi} \right)^{\frac{1}{5}} * (C_T A)^{\frac{1}{3}}, \quad x_0 = \left(\frac{D}{2a_1} \right)^{-3} \left[\frac{1}{9} * 3^{\frac{2}{5}} * C_T A \right]^{\frac{1}{5}} \quad (5, 6)$$

$$c_1 = \left(\frac{D}{2a_1} \right)^{\frac{3}{2}} x_0^{-\frac{5}{6}}, \quad r_w(x) = \left(\frac{35}{2\pi} \right)^{\frac{1}{5}} (3c_1)^{\frac{1}{5}} (C_T A \Delta x)^{\frac{1}{3}} \quad (7, 8)$$

Όπου r_w η ακτίνα του ομόρου, A η επιφάνεια του ρότορα, Δx η όπισθεν απόσταση, C_T ο συντελεστής ώσης, C_1 ο αριθμός Prandtl και U_∞ η ταχύτητα αναφοράς του ανέμου. Τα υπόλοιπα σύμβολα ισχύουν όπως και παραπάνω.

2.1.3. Μοντέλο Ishihara

Ο Ishihara κ.α. (2004) εισήγαγε ένα μοντέλο [10] για την πρόβλεψη του ομόρου, επιχειρώντας να συνυπολογίζει την αλληλεπίδραση των τυρβωδών ροών που προκύπτουν από την ατμόσφαιρα και από τη λειτουργία της αιολικής μηχανής. Οι εξισώσεις που πρότεινε, είναι οι παρακάτω:

$$U_{DEF} = \frac{\sqrt{C_T U_\infty}}{32} \left(\frac{1,666}{k_1} \right)^2 \left(\frac{x}{D} \right)^{-p} \exp \left(-\frac{r^2}{D_{wake}^2} \right) \quad (9)$$

$$D_{wake} = \frac{k_1 C_T^{\frac{1}{4}}}{0,833} D^{1-\frac{p}{2}} x^{\frac{p}{2}}, \quad p = k_2(I_a + I_w) \quad (10, 11)$$

$$I_w = \frac{k_3 C_T}{\max(I_a, 0,03)} \left[1 - \exp \left(-4 \left(\frac{x}{10D} \right)^2 \right) \right] \quad (12)$$

Όπου U_{DEF} το έλλειμμα ταχύτητας ανέμου, U_∞ η ταχύτητα αναφοράς του ανέμου, C_T ο συντελεστής ώσης, D η διάμετρος του ρότορα, x η όπισθεν απόσταση, I_a η ένταση της ατμοσφαιρικής τύρβης και $k_1=0,27$, $k_2=6,0$, $k_3=0,004$.

2.1.4. Μοντέλο Frandsen

Ο Frandsen κ.α. (2006) ανέπτυξε το Αναλυτικό Μοντέλο *Storpark* [11], προσβλέποντας κυρίως στη χρήση του σε υπολογισμούς ομόρου υπερράκιων αιολικών πάρκων.

$$C_T = a(2-a), \quad A_0 = \frac{\pi}{4} D^2, \quad \beta = \frac{1 + \sqrt{1 - C_T}}{2\sqrt{1 - C_T}} \quad (13, 14, 15)$$

$$D_{(x)} = D_o \left(\beta^{\frac{k}{2}} + as \right)^{\frac{1}{k}}, \quad U_{(x)} = \frac{U_0}{2} \left(1 \pm \sqrt{1 - 2C_T \frac{A_o}{A}} \right) \quad (16, 17)$$

όπου εάν $a \leq 0.5 \rightarrow +$, αλλιώς $-$

Όπου, C_T ο συντελεστής ώσης, a ο συντελεστής αξονικής επαγωγής, A_o η επιφάνεια ομόρου, A η επιφάνεια του ρότορα, x η όπισθεν απόσταση, D_o η διάμετρος του ρότορα, s η αδιάστατη απόσταση ($=x/D_o$), U_o η ταχύτητα αναφοράς του ανέμου και k συντελεστής διαστολής ομόρου.

2.1.5. Μοντέλο Bastankhah

Οι Bastankhah και Porte-Agel (2014) εισήγαγαν ένα νέο αδιάστατο μοντέλο [12], το οποίο εισάγει τις έννοιες και των τριών συντεταγμένων του πεδίου ροής (x , y , z) προκειμένου να καθοριστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα χαρακτηριστικά του ομόρου. Οι εξισώσεις είναι οι παρακάτω:

$$\frac{\Delta U}{U_\infty} = \left(1 - \sqrt{1 - \frac{C_T}{8 \left(\frac{kx}{d_o + \varepsilon} \right)^2}} \right) \exp \left[-\frac{1}{2 \left(\frac{kx}{d_o + \varepsilon} \right)^2} \left(\left(\frac{z - z_h}{d_o} \right)^2 + \left(\frac{y}{d_o} \right)^2 \right) \right] \quad (18)$$

$$\varepsilon = 0,2\sqrt{\beta}, \quad \beta = \frac{1}{2} \frac{1 + \sqrt{1 + C_T}}{\sqrt{1 - C_T}} \quad (19, 20)$$

Όπου U_∞ η ταχύτητα αναφοράς του ανέμου, C_T ο συντελεστής ώσης, k ο συντελεστής διαστολής ομόρου, x η όπισθεν απόσταση, z η οριζόντια συντεταγμένη του ομόρου, z_h το ύψος του άξονα της μηχανής, y η κάθετη συντεταγμένη του ομόρου, και d_o η διάμετρος του ρότορα.

2.1.6. Μοντέλο Tian

Το μοντέλο του Tian κ.α. (2015) [13] αποτελεί μετεξέλιξη του μοντέλου του Jensen, επιχειρώντας να προσφέρει συνημιτονοειδή απεικόνιση στον προβλεπόμενο ομόρου, λαμβάνοντας επίσης υπόψιν την τραχύτητα του εδάφους. Η συγκεκριμένη πρόταση αποτελεί μετεξέλιξη του αρχικού μοντέλου του Jensen διότι αφ' ενός το μοντέλο του Jensen προσφέρει απεικόνιση του ομόρου σε σχήμα "σταθερής βηματικής διανομής" (και ασυνεχή στα όρια), αφ' ετέρου δεν λαμβάνει υπόψιν την τραχύτητα του εδάφους.

$$u = (u_o - u^*) \cos \left[\frac{\pi}{r_x} r_d + \pi \right] + u^*, \quad u^* = u_o \left[1 - \frac{2a}{\left(1 + \frac{kx}{r_1}\right)^2} \right] \quad (21,22)$$

$$a = \frac{(1 - \sqrt{1 - C_T})}{2}, \quad r_1 = r_d \sqrt{\frac{1 - a}{1 - 2a}}, \quad k = \frac{0.5}{\ln\left(\frac{z}{z_o}\right)}, \quad r_x = kx + r_d \quad (23, 24, 25, 26)$$

Όπου u_o η ταχύτητα αναφοράς του ανέμου, u^* η ταχύτητα που προκύπτει από το μοντέλο του Jensen, r_d η ακτίνα του ρότορα, r_x η ακτίνα του ομόρου, r_1 ο ομόρους όπισθεν της πλήμνης, a ο συντελεστής αξονικής επαγωγής, k ο συντελεστής διαστολής ομόρου, C_T ο συντελεστής ώσης, z_o η τραχύτητα του εδάφους και z το ύψος της πλήμνης.

Πέραν των ανωτέρω, ο Tian εισήγαγε επίσης ένα απλό εμπειρικό τρόπο για να λαμβάνει υπόψιν την αλληλεπίδραση της ατμοσφαιρικής τύρβης με αυτή του ομόρου:

$$k_{wake} = k_o \frac{I_{wake}}{I_o}, \quad \text{και} \quad I_{wake} = K_n \frac{C_T}{x/D} + I_o \quad (27,28)$$

Όπου I_o η ένταση της ατμοσφαιρικής τύρβης, I_{wake} η τύρβη του ομόρου, k_o το προαναφερθέν k , και $K_n=0.4$. Η εφαρμογή ωστόσο αυτών των εξισώσεων παρουσιάζει τους παρακάτω περιορισμούς:

$$5 < \frac{x}{D} < 15, \quad 0,07 < I_o < 0,14, \quad 0,1 < a < 0,4 \quad (29,30,31)$$

2.2. Διαδικασία αξιολόγησης

Για την αξιολόγηση της ακρίβειας των παραπάνω μοντέλων, διενεργήθηκε μια πρώτη σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των υπό εξέταση αναλυτικών μοντέλων και σχετικών δεδομένων (πειραματικών αλλά και αποτελεσμάτων αριθμητικών μεθόδων) που βρέθηκαν σε σχετική επιστημονική βιβλιογραφία (βλέπε και Πίνακα 1). Ανακτήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν πειραματικές τιμές μετρήσεων εξέλιξης ομόρου όπισθεν μιας αιολικής μηχανής 2 MW, σε απόσταση 5,1 διαμέτρων όπισθεν του ρότορα, για δύο διαφορετικές τιμές ταχύτητας ανέμου [14]. Επίσης, έγινε σύγκριση με τιμές αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης (CFD), συγκεκριμένα με τα αποτελέσματα των εργασιών των Bastankhah και Porte-Agel [12] και του Andersen κ.α. [15], για να διαπιστωθεί η πιθανή σύγκλιση των αποτελεσμάτων των εν λόγω μεθοδολογιών.

Για να προκύψει σύγκριση, εισήχθησαν στα αναλυτικά μοντέλα τα απαραίτητα δεδομένα των αιολικών μηχανών, όπως η διάμετρος του ρότορα, το ύψος του άξονα της μηχανής, ο συντελεστής αξονικής επαγωγής, και τα περιβαλλοντικά δεδομένα που επικρατούσαν όταν κατεγράφησαν οι πειραματικές/υπολογιστικές τιμές σύμφωνα με τις αντίστοιχες επιστημονικές πηγές, προκειμένου τα μοντέλα να αναπαράζουν τις αντίστοιχες τιμές ομόρου λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω συνθήκες.

Το πλήθος των μετρήσεων και άρα συγκρίσεων ανά περίπτωση ποικίλλει, και εξαρτάται αποκλειστικά από το πλήθος δεδομένων που προσφέρει η εκάστοτε πηγή. Για παράδειγμα, για την περίπτωση 1 υπάρχουν πειραματικές τιμές μόνο για την απόσταση των 5.1 x/D. Επίσης, για την περίπτωση 2 οι συγκρίσεις αφορούν διαφορετικές τιμές τραχύτητας εδάφους (0,5, 0,05, 0,005 και 0,00005), ενώ για την 3^η περίπτωση οι συγκρίσεις αφορούν μόνο δύο διαφορετικές ταχύτητες ανέμου (7 m/s και 10 m/s). Τα γραφήματα που παρατίθενται στη συνέχεια αφορούν το μέσο όρο των αποκλίσεων της κάθε

περίπτωσης ανά μοντέλο και περιοχή σύγκρισης (μέση και μακρινή κατάντι), στις περιπτώσεις όπου αυτό είναι εφικτό.

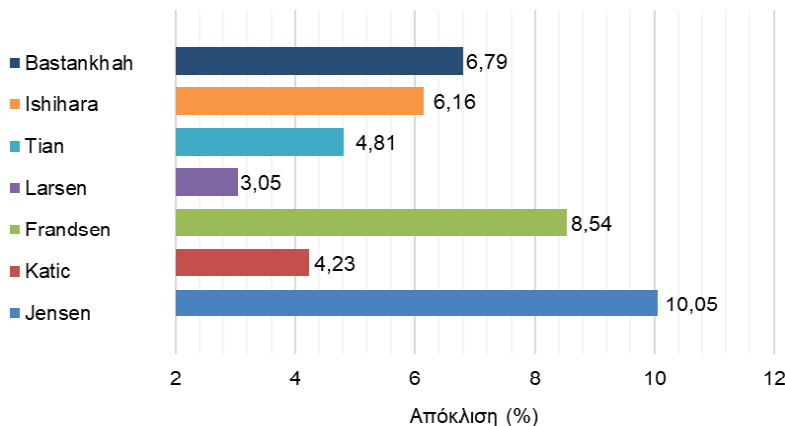
Πίνακας 1: Απαιτούμενες τιμές εισόδου των προαναφερθέντων μοντέλων

Περιγραφή	Σύμβολο	Park	Larsen	Ishihara	Frandsen	Bastankhah	Tian
Ταχύτητα Αναφοράς Ανέμου	U_{∞}	✓	✓	✓	✓		✓
Ακτίνα ή διάμετρος ρότορα	r_o ή D	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Κατάντι απόσταση	x ή s	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Συντελεστής διαστολής ομόρου	k	✓			✓	✓	✓
Συντελεστής Ωσης	C_T ή C_i	✓	✓	✓		✓	✓
Συντελεστής αξονικής επαγωγής	a				✓		✓
Ατμοσφαιρική τύρβη	I_a			✓			✓
Ύψος πλήμνης	z, z_h ή H		✓			✓	✓
Τραχύτητα εδάφους	z_o		✓			✓	✓
Οριζόντια συντεταγμένη ομόρου	z					✓	
Κάθετη συντεταγμένη ομόρου	y					✓	
Ειδικοί συντελεστές	-		✓	✓			✓

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1. Σύγκριση με πειραματικές τιμές σε απόσταση 5,1 διαμέτρων (1^η περίπτωση)

Η πρώτη προσπάθεια συγκριτικής αξιολόγησης των υφιστάμενων αναλυτικών μοντέλων αφορά το πεδίο ταχύτητας στα κατάντι μιας σύγχρονης αιολικής μηχανής 2 MW, για δυο διαφορετικές ταχύτητες αδιατάρακτης ροής, σύμφωνα με την εργασία των Jeon κ.α. [14]. Λόγω έλλειψης επαρκών δεδομένων, η σύγκριση σε κάθε περιοχή του ομόρου για τη συγκεκριμένη περίπτωση δεν δύναται να διενεργηθεί. Όμως, είναι δυνατή η παράθεση συγκριτικών συμπερασμάτων για μια συγκεκριμένη περιοχή στην περιοχή του ομόρου, δηλαδή σε απόσταση 5 διαμέτρων στα κατάντι της αιολικής μηχανής, περιοχή που εμφανίζει άκρως πρακτικό ενδιαφέρον κατά τη χωροθέτηση αιολικών πάρκων.

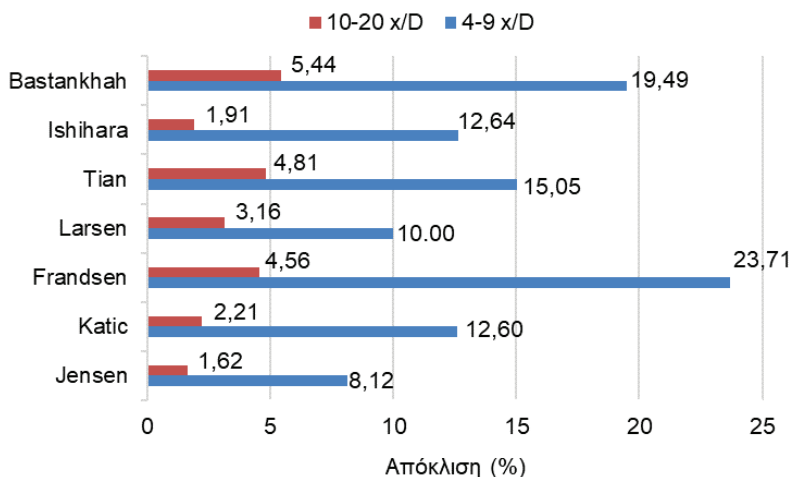


Γράφημα 1: Συγκεντρωτικές αποκλίσεις ανά μοντέλο, μέση περιοχή ομόρου (Περίπτωση 1)

Στο γράφημα 1 παρατηρούνται οι αποκλίσεις που κατεγράφησαν κατά τη σύγκριση των υπολογισμένων και πειραματικών τιμών της 1^{ης} περίπτωσης. Η μέση τιμή απόκλισης είναι 6,23%, ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει στην περίπτωση αυτή η μεγάλη απόκλιση που παρουσιάζει το μοντέλο του Jensen. Εξίσου αξιοσημείωτη είναι και η μειωμένη απόκλιση του μοντέλου του Katic, της μετεξέλιξης δηλαδή του μοντέλου Jensen, δείγμα της βελτίωσης που επέφερε η μετεξέλιξη αυτή.

3.2. Σύγκριση με θεωρητικές/υπολογιστικές τιμές μοντέλου LES/CFD (2^η περίπτωση)

Ακολουθεί σύγκριση με τα αποτελέσματα σύγχρονων αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης (CFD) βασισμένων στην αριθμητική επίλυση των εξισώσεων ροής υιοθετώντας κατάλληλα μοντέλα τύρβης (LES), συγκεκριμένα με τα αποτελέσματα των εργασιών των Bastankhah και Porte-Agel [12].

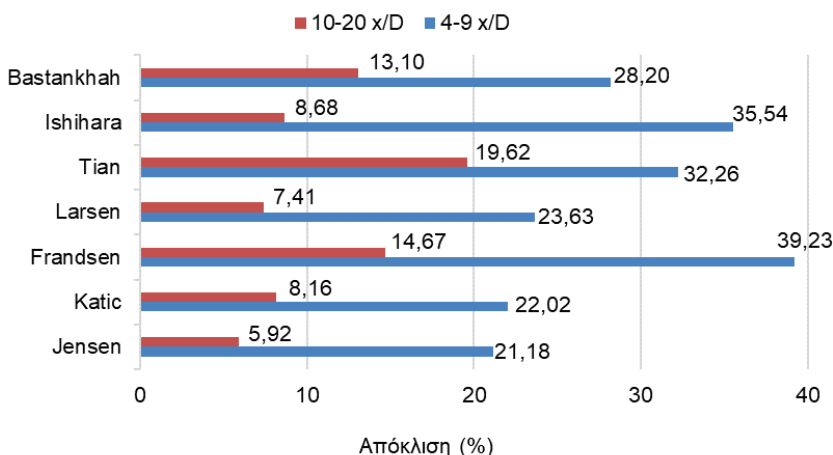


Γράφημα 2: Μέση και μακρινή περιοχή ομόρου (Περίπτωση 2)

Η 2^η περίπτωση είναι ενδιαφέρουσα, καθώς χαρακτηρίζεται από αντιθέσεις. Παρατηρούμε τις σχετικά υψηλές αποκλίσεις στη μέση περιοχή (στα επίπεδα του 10%-20%), ενώ για τη μακρινή περιοχή οι τιμές παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη σύγκλιση. Είναι αξιοσημείωτο ότι το μοντέλο του Jensen παρουσιάζει τη χαμηλότερη απόκλιση 8,1% ακόμη για τη μέση περιοχή, μια τιμή που μπορεί να χαρακτηριστεί ικανοποιητικής ακρίβειας. Αντίστοιχα, η προσέγγιση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τη χρήση των αναλυτικών μοντέλων είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική σε σχετικά μακρινές αποστάσεις με αποκλίσεις που κυμαίνονται στα επίπεδα του 2%, με μέγιστη απόκλιση 5%. Σε κάθε περιοχή παρατηρείται η υψηλή σύγκλιση των προβλέψεων του μοντέλου του Jensen σε σχέση με τα αποτελέσματα του σαφώς πιο σύνθετου αριθμητικού μοντέλου. Επιπλέον, και ορισμένα από τα υπόλοιπα αναλυτικά μοντέλα, όπως του Ishihara, του Larsen και του Katic παρουσιάζουν επίσης αρκετά καλή ταύτιση αποτελεσμάτων.

3.3. Σύγκριση με θεωρητικές/υπολογιστικές τιμές μοντέλου CFD (3^η περίπτωση)

Το γράφημα 3 παρουσιάζει τις αποκλίσεις που καταγράφηκαν κατά τη σύγκριση των υπολογιστικών τιμών των υπό εξέταση αναλυτικών μοντέλων με τις αντίστοιχες ενός σύγχρονου μοντέλου CFD του Andersen κ.α. [15]. Στην περίπτωση αυτή οι αποκλίσεις είναι σημαντικές και παρουσιάζουν τιμές μεγαλύτερες από κάθε άλλη περίπτωση. Δεδομένου ότι τα αποτελέσματα αναλυτικών και αριθμητικών προβλέψεων δεν μπορούν να συγκριθούν ταυτόχρονα με διαθέσιμες πειραματικές τιμές, δεν είναι δυνατή η αξιολόγηση της αξιοπιστίας των συγκεκριμένων μεθόδων. Αυτό που πρέπει απλά να επισημανθεί είναι ότι ειδικά στην περιοχή του μέσου ομόρου οι δύο μεθοδολογίες εμφανίζουν σημαντική απόκλιση της τάξης του 20%-30%, κάτι που περιορίζεται στα επίπεδα του 10% στην περιοχή του μακρινού ομόρου. Και στην περίπτωση αυτή, το κλασικό μοντέλο του Jensen εμφανίζει τις μικρότερες διαφορές σε σχέση με τα αποτελέσματα μια σύγχρονης και σαφώς πιο απαιτητικής υπολογιστικά αριθμητικής προσομοίωσης. Όπως είναι φυσικό αντίστοιχες συγκρίσεις θα πρέπει ενδεχομένως να επαναληφθούν με αποτελέσματα και από διαφορετικές CFD προσομοιώσεις, προκειμένου να διαπιστωθούν οι λόγοι αυτών των αποκλίσεων.



Γράφημα 3: Μέση και μακρινή περιοχή ομόρου

Συνοψίζοντας, με βάση τις περιπτώσεις που εξετάσθηκαν στην παρούσα εργασία τα υπό εξέταση αναλυτικά μοντέλα των Jensen, Katic, Ishihara και Larsen παρουσιάζουν αποτελέσματα που προσεγγίζουν ικανοποιητικά διαθέσιμες πειραματικές τιμές ή αντίστοιχα αποτελέσματα υπολογιστικών μεθόδων (CFD), ενώ μια ενδεχόμενη μετεξέλιξη του μοντέλου του Bastankhah θα αποδεικνύονταν χρήσιμη, δεδομένου ότι λαμβάνει υπόψιν σημαντικά μεγέθη, όπως χωρικές συντεταγμένες ή την τραχύτητα του εδάφους.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε μια συστηματική προσπάθεια να καταγραφούν και να μελετηθούν τα πλέον γνωστά και αξιόπιστα ημι-εμπειρικά μοντέλα ομόρου (wake models), τα οποία εξετάζουν το πεδίο ταχύτητας του ανέμου στα κατάντι μιας ανεμογεννήτριας, κάτω από μεταβλητές συνθήκες λειτουργίας.

Τα συμπεράσματα από τη διαδικασία σύγκρισης μπορούν σε γενικές γραμμές να χαρακτηριστούν ικανοποιητικά. Τα αποτελέσματα της συγκριτικής αυτής μελέτης οδηγούν σε καλύτερη κατανόηση του πεδίου ταχύτητας, γεγονός που αναμένεται να συμβάλει στη αποτελεσματικότερη χωροθέτηση νέων αιολικών πάρκων. Η σύγκριση που διενεργήθηκε μπορεί να χαρακτηριστεί εκτενής, καθώς παρόμοιες συγκρίσεις στη σχετική βιβλιογραφία περιλαμβάνουν συνήθως επιλεγμένο αριθμό (2-3) μοντέλων, τα οποία είναι συνήθως και τα πιο δημοφιλή.

Σχετικά με τα εξετασθέντα μοντέλα, τα μοντέλα των Jensen, Katic, Larsen και Ishihara παρουσίασαν ικανοποιητική προσέγγιση των πειραματικών ή αριθμητικών τιμών, ενώ αυτά των Bastankhah, Tian και Frandsen είχαν μεγαλύτερες αποκλίσεις. Σε περίπτωση επόμενης ανάλυσης, θεωρείται απαραίτητο να ληφθούν υπόψιν οι ιδιαιτερότητες της εκάστοτε σύγκρισης, όπως π.χ. οι διαφορετικές τιμές τραχύτητας εδάφους ή του επιπέδου ατμοσφαιρικής τύρβης, κ.λπ.

Ολοκληρώνοντας, μπορούμε πούμε ότι η παρούσα εργασία, πέραν του γεγονότος ότι συγκέντρωσε και συνέκρινε τα πλέον αξιόπιστα αναλυτικά μοντέλα πρόβλεψης ομόρου αιολικών μηχανών, έδειξε ότι τα αναλυτικά ημι-εμπειρικά μοντέλα υπολογισμού ομόρου μπορούν να προσφέρουν ικανοποιητικές προβλέψεις της έντασης και εξέλιξης του ομόρου όπισθεν μιας αιολικής μηχανής, δεδομένου ότι οι αποκλίσεις που καταγράφηκαν είναι εντός αποδεκτών ορίων. Επιπλέον, παρουσιάσθηκαν και αξιολογήθηκαν νέα μοντέλα τα οποία θα μπορούσαν, κατόπιν προσεκτικής εξέτασης και προσαρμογής, να γίνουν χρήσιμα εργαλεία, δεδομένου ότι λαμβάνουν υπόψιν βασικά δεδομένα διαμόρφωσης του πεδίου ροής, όπως η τραχύτητα εδάφους, οι χωρικές συντεταγμένες, κ.λπ. Συνεπώς, τα υπό εξέταση αναλυτικά μοντέλα παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα για μια προκαταρκτική διερεύνηση και για την εξαγωγή πρώτων συμπερασμάτων σχετικά με την ένταση και την εξέλιξη του ομόρου σε αιολικά πάρκα με ελάχιστο υπολογιστικό κόστος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ainslie, J.F., (1988) Calculating the flowfield in the wake of wind turbines. *J. Wind Eng.Ind. Aerodyn.*, 27, pp. 213-224.
- [2] Troldborg, N., Sorensen, J.N., Mikkelsen, R., (2009). Numerical simulation of wake characteristics of a wind turbine in uniform inflow. *Wind Energy*, 13, pp. 86-99.
- [3] Gonzalez-Longatt, F., Wall, P., Terzija, V., (2012) Wake effect in wind farm performance: Steady-state and dynamic behavior. *Renewable Energy*, 39, pp. 329-338.
- [4] Troldborg, N., Larsen, G.C., Madsen, H.A., Hansen, K.S., Sorensen, J.N., Mikkelsen, R., (2010). Numerical simulations of wake interaction between two wind turbines at various inflow conditions. *Wind Energy*, 14, pp. 859-876.
- [5] Vermeer, L.J., Sorensen, J.N., Crespo, A., (2003) Wind turbine wake aerodynamics. *Progress in Aerospace Sciences*, 39, pp. 467-510.
- [6] Zahle, F., Sorensen, N., (2007) On the influence of far-wake resolution on wind turbine flow simulations. *Journal of Physics:Conference Series* 75. 012042.
- [7] Jensen, N. O. (1983). A note on wind generator interaction. (Risø-M; No. 2411).
- [8] Katic, I., Hojstrup, J., Jensen, N.O. (1986) A simple model for cluster efficiency. *European Wind Energy Association Conference and Exhibition*, 7-9 October 1986, Rome-Italy.
- [9] Larsen, G. C., (1988). A simple wake calculation procedure. (Risoe; No. 2760).
- [10] Ishihara, T., Yamaguchi, A., Fujino, Y., (2004) Development of a new wake model based on a wind tunnel experiment. *Global Wind Power* 2004.
- [11] Frandsen, S., Barthelmie, R., Pryor, S., Rathmann, O., Larsen, S., Hojstrup, J., (2006) ,Analytic modeling of wind speed deficit in large offshore wind farms, *Wind Energy*, 9, pp.39-53.
- [12] Bastankhah, M., Porte-Agel, F. (2014). A new analytical model for wind-turbine wakes. *Renewable Energy*, pp. 1-8.
- [13] Tian, L., Zhu, W., Shen, W., Zhao, N., Shen, Z. (2015) Development and validation of a new two-dimensional wake model for wind turbine wakes. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 137 (2015) pp. 90-99.
- [14] Jeon, S., Kim, B., Huh, J., (2015) Comparison and verification of wake models in an onshore wind farm considering single wake condition of the 2 MW wind turbine. *Energy* 93, pp 1769-1777.
- [15] Andersen, S.J., Sorensen, J.N., Ivanell, S., Mikkelsen, R.F. (2014) Comparison of Engineering Wake Models with CFD Simulations. *Journal of Physics: Conference Series* 524 (2014) 012161.

ΑΠΕ και εκπαίδευση

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΑΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΤΟ INTERNATIONAL HELLENIC UNIVERSITY (ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΕΛΛΑΔΟΣ)

Δρ. Δημήτριος Β. Κανελλόπουλος

Διευθυντής Στρατηγικής & Επιχειρηματικής Ανάπτυξης, ΔΕΗ Ανανεώσιμες Α.Ε.
e-mail: dkanellopoulos@ppcr.gr

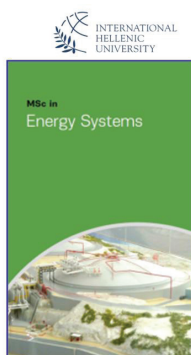
ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σήμερα διάφορα πανεπιστήμια προσφέρουν μαθήματα για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που διαφέρουν σε διάρκεια. Το Διεθνές Ελληνικό Πανεπιστήμιο, που εδρεύει στη Θεσσαλονίκη, έχει ένα 18ωρο μάθημα για την αιολική ενέργεια σχεδιασμένο για μεταπτυχιακούς φοιτητές που παρακολουθούν το πτυχίο MSc in Energy Systems. Το μάθημα προσφέρεται στα Αγγλικά σε έλληνες και ξένους φοιτητές.

Η πρόκληση ήταν να αναπτυχθεί μια σειρά διαλέξεων που συνδυάζουν τον περιορισμό του χρόνου με την ποιότητα της γνώσης λαμβάνοντας υπόψη το διαφορετικό υπόβαθρο των φοιτητών στις επιστήμες. Η εργασία παρουσιάζει τα βασικά θέματα που ένας μεταπτυχιακός φοιτητής πρέπει να γνωρίζει σχετικά με την αιολική μηχανική και εξηγεί γιατί πρέπει να διδαχθούν με αυτήν τη σειρά. Γίνονται αναφορές σχετικά με τις διαπιστευμένες πηγές από τις οποίες το υλικό έχει ληφθεί ή έχει προταθεί για περαιτέρω ανάγνωση. Σημαντικές πηγές του διαδικτύου και ηλεκτρονικά εργαλεία που διατίθενται ελεύθερα σήμερα συζητούνται διεξοδικά και δίνεται πλήθος συνδέσμων.

Τέλος, η χρήση τεχνικών παρουσιάσεων βίντεο και κινούμενων σχεδίων (animation) αποδείχθηκε ότι είναι το πιο διδακτικό εργαλείο το οποίο ήταν ιδιαίτερα ευπρόσδεκτο από τους φοιτητές.

Λέξεις Κλειδιά: αιολική ενέργεια, εκπαίδευση, ανάπτυξη ΑΠΕ.



1. Οι παράμετροι σχεδιασμού και προετοιμασίας των διαλέξεων

Σε συνεργασία με τους διοργανωτές του μεταπτυχιακού MSc in Energy Systems του Διεθνούς Ελληνικού Πανεπιστημίου, μελετήθηκαν τα βιογραφικά σημειώματα των μεταπτυχιακών φοιτητών. Η τάξη του 2016 είχε ένα μείγμα περιβαλλοντολόγων, ηλεκτρολόγων μηχανικών, γεωλόγων, μαθηματικών και χημικών μηχανικών. Μια πολύ ποικιλόμορφη ομάδα επιστημών.

Το γεγονός αυτό ελήφθη υπόψη στο μαθηματικό περιεχόμενο των σημειώσεων των διαλέξεων, στη φυσική και ηλεκτρομηχανολογία που θα παρουσιάζονταν, καθώς και στο επιπλέον υλικό που προτείνεται για περαιτέρω ανάγνωση. Αυτό ήταν αναγκαίο, προκειμένου να ικανοποιηθεί ένας σπουδαστής που χρειαζόταν επιπλέον γνώσεις από αυτές που είχε ήδη από το πρώτο του πτυχίο. Αυτό μπορεί να φαίνεται προφανές, αλλά το υλικό που απευθύνεται αποκλειστικά σε διπλωματούχους μηχανολόγους και ηλεκτρολόγους μηχανικούς, μπορεί να είναι ακατανόητο για πτυχιούχους άλλων επιστημών.

Οι διαλέξεις πραγματοποιήθηκαν τα βράδια της Παρασκευής και το Σάββατο το πρωί, προκειμένου να εξυπηρετηθούν εργαζόμενοι φοιτητές. Η ημέρα περιλάμβανε 3 διδακτικές ώρες. Το μάθημα ολοκληρώθηκε μετά από 6 ημέρες μαθημάτων. Ακολούθησε μια γραπτή εξέταση τον Ιούνιο του 2016. Όλο το υλικό των διαλέξεων είχε ήδη ανεβεί (uploaded) στην πανεπιστημιακή πύλη πριν από τις διαλέξεις. Αυτό κρίθηκε απαραίτητο, διότι οι φοιτητές είχαν το χρόνο να το εξετάσουν και να προετοιμάσουν ερωτήσεις.

Η κάθε ημέρα διδασκαλίας συνοδευόταν και από επιπρόσθετο υλικό σχετικά με τη θεματολογία της ημέρας. Σε αυτό περιλαμβάνονται μελέτες από την Ευρωπαϊκή Ένωση Αιολικής Ενέργειας (EWEA – WindEurope) [1], την Παγκόσμια Ένωση Αιολικής Ενέργειας GWEC [2], τον Διεθνή Οργανισμό Ενέργειας, IEA [3], την Παγκόσμια Τράπεζα [4], το ΔΝΤ [5], ηλεκτρονικά βιβλία, τεχνικές εκθέσεις από τη βιομηχανία και ερευνητικά κέντρα παγκοσμίως.

Κατά τη διάρκεια των διαλέξεων γινόταν συνεχής αναφορά σε αυτές τις πηγές. Οι σύνδεσμοι με διεθνή ερευνητικά κέντρα, όπως το DTU (RISØ) [6], το NREL [7] και το MEASNET [8], παρουσιάστηκαν με σχόλια σχετικά με τη χρησιμότητά τους. Έμφαση δόθηκε στις δημοσιεύσεις των τελευταίων 3-4 ετών προκειμένου να ενημερωθούν οι φοιτητές σε όλες τις πτυχές των σύγχρονων εφαρμογών αιολικής ενέργειας.

Αποφασίστηκε επίσης ότι μια προσεκτική επιλογή βίντεο και κινούμενων σχεδίων που σχετίζονται με τον άνεμο θα ήταν ευεργετική σε σύγκριση με μια παρουσίαση διαφανειών σε powerpoint μόνο. Αφιερώθηκαν πολλές ώρες προετοιμασίας στην επιλογή του συγκεκριμένου εποπτικού υλικού.

2. Το πρόγραμμα των διαλέξεων

Το πρόγραμμα του μαθήματος με τις ενότητες στη σειρά που παρουσιάστηκαν, ο αριθμός των διαφανειών και τα βίντεο παρουσιάζονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1: Τα κύρια θέματα που διδάσκονται, ο αριθμός των διαφανειών, αριθμός video και διάρκεια.

Η τεχνολογία των ανεμογεννητριών, μελλοντικές τάσεις σε επίγειες και υπεράκτιες εφαρμογές, πιστοποίηση ανεμογεννητριών, το πρότυπο IEC 61400	45 διαφάνειες, 6 videos (31 λεπτών)
Αξιολόγηση αιολικού δυναμικού (όργανα-μετρήσεις-μοντελοποίηση), μετεωρολογικές παράμετροι	121 διαφάνειες, 2 videos (6 λεπτών)
Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα, προφίλ ταχύτητας ανέμου, ανάλυση μετρήσεων, αιολικοί άτλαντες ξηράς και θάλασσας	54 διαφάνειες
Μεθοδολογία επιλογής των καταλληλότερων τοποθεσιών, επιτόπιες έρευνες	58 διαφάνειες, 1 video (2 λεπτών)
Ενεργειακή παραγωγή (μετρήσεις- μοντελοποίηση - σύγχρονα υπολογιστικά εργαλεία), απώλειες λόγω ομόρρου (wake shadow), αριθμητικοί κώδικες ρευστομηχανικής, CFD	76 διαφάνειες
Περιβαλλοντικοί περιορισμοί και κοινωνική αποδοχή	79 διαφάνειες, 3 videos (6 λεπτών)

Λεπτομερής μεθοδολογία για τον σχεδιασμό αιολικών πάρκων σε περιοχές σύνθετου ανάγλυφου, πεδιάδων ή θάλασσας	45 διαφάνειες + εργαστήριο
Ένα πλήρες παράδειγμα της τεχνικής και οικονομικής αξιολόγησης ενός μεγάλου αιολικού πάρκου	22 διαφάνειες

Συνολικά το υλικό που παρουσιάστηκε σε 18 ώρες περιελάμβανε 500 διαφάνειες και 45 λεπτά βίντεο. Φάνηκε πως ο αριθμός των διαφανειών ήταν περισσότερο από επαρκής στον διαθέσιμο διδακτικό χρόνο χωρίς να παρακάμπτονται γρήγορα εικόνες ή γραφήματα.

3. Η ΣΕΙΡΑ ΤΩΝ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΕΩΝ

3.1. Το στοιχείο της έκπληξης στην 1η διάλεξη

Πως μπορείς να κερδίσεις το ενδιαφέρον των φοιτητών από τα 15 πρώτα λεπτά του μαθήματος; Θεωρώντας ότι όλοι τους ήταν ήδη γνώστες του θέματος τους παρουσιάστηκε μια περίπτωση επένδυσης για ένα αιολικό πάρκο 54 MW νοτιοδυτικά της Θεσσαλονίκης και εκείνοι θα έπρεπε να διερευνήσουν και να αξιολογήσουν την οικονομική βιωσιμότητα του έργου.

Το στοιχείο της έκπληξης δούλεψε καλά με όλους σχεδόν τους φοιτητές που φυσικά δεν μπορούσαν να απαντήσουν. Με αυτόν τον τρόπο συζητήθηκε το πρόγραμμα των διαλέξεων καταλήγοντας ότι με την ολοκλήρωση του μαθήματος για την αιολική ενέργεια, ο καθένας τους θα μπορούσε να το κάνει.



Εικόνα 1: Οι ερωτήσεις που θέτει ο επικεφαλής της ομάδας σε μια περίπτωση αξιολόγησης.

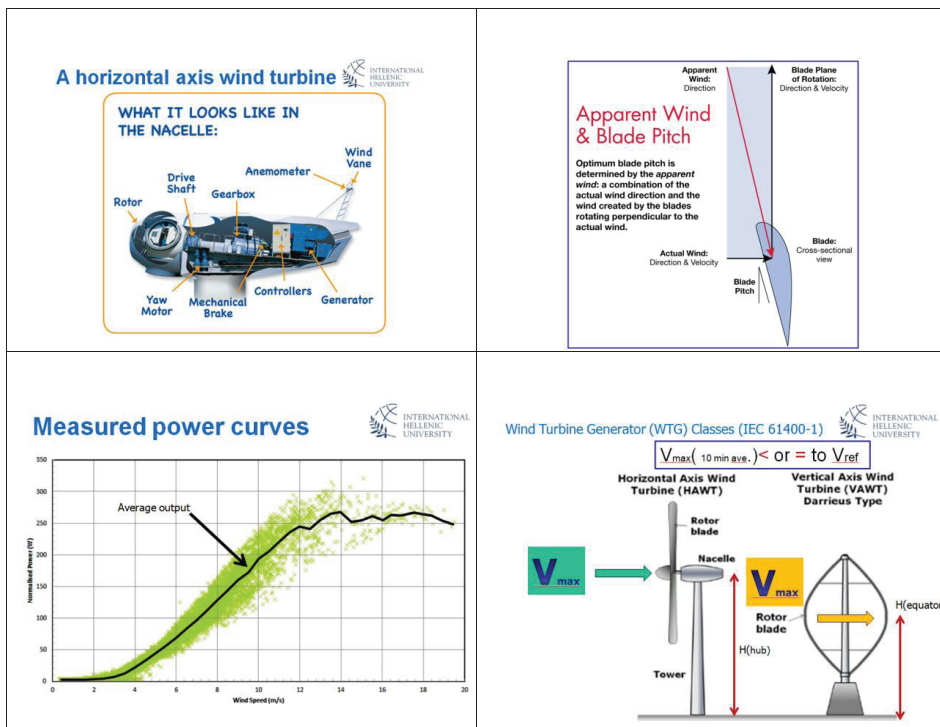
3.2. Τεχνολογίες ανεμογεννητριών

Η κλασική εισαγωγή στην αιολική ενέργεια ξεκινάει τις περισσότερες φορές με την περιγραφή του αιολικού δυναμικού. Η τεχνολογία παρουσιάζεται αργότερα. Το πρόβλημα με αυτήν την προσέγγιση είναι ότι απουσιάζει η τεχνική ορολογία για τις μηχανές που είναι απαραίτητη για να περιγράψει κανείς το πώς η μεταβλητότητα του ανέμου επηρεάζει την απόδοση μιας ανεμογεννήτριας. Η άμεση

εξοικείωση των φοιτητών με την ορολογία και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών με ή χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων, θεωρήθηκε σημαντική.

Γι' αυτό η πρώτη διάλεξη αφορούσε τις υφισταμένες τεχνολογίες μηχανών και τα χαρακτηριστικά τους. Σημαντικό κριτήριο επιλογής μιας α/γ είναι η πιστοποίηση της σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61400. Οι μηχανές πιστοποιούνται για ακραίες ταχύτητες άνεμου και κατατάσσονται σε κατηγορίες I-II-III και S. Σε αυτό δόθηκε ιδιαίτερη σημασία, γιατί μια λάθος επιλογή κατηγορίας θα μπορούσε να οδηγήσει σε καταστροφή της μηχανής σε υψηλές ταχύτητες άνεμου.

Μέσα στις πρώτες 3 ώρες της πρώτης ημέρας θεωρήθηκε σημαντικό να εξηγηθούν οι βασικές αεροδυναμικές αρχές, ο τρόπος λειτουργίας, η μεταφορά και η κατασκευή μεγάλων αιολικών πάρκων σε ξηρά και θάλασσα σε παγκόσμιο επίπεδο με τη χρήση βίντεο. Αυτός ήταν και ο λόγος για τον οποίο παρουσιάστηκαν 6 βίντεο συνολικής διάρκειας 31 λεπτών. Ο χρόνος αυτός αντιστοιχεί στο 70% του συνολικού χρόνου βίντεο που σχεδιάστηκε για το μάθημα. Είναι πολύ εύκολο να παρασυνθούμε και να προσφέρουμε περισσότερα βίντεο καταναλώνοντας χρόνο. Οφείλουμε όμως να έχουμε κατά νου στο πώς θα προκαλέσουμε ενδιαφέρον στους φοιτητές, ώστε με τις ερωτήσεις τους να συμμετάσχουν σε ένα διδακτικό διάλογο. Μετά από κάθε παρουσίαση των video ακολουθούσε συζήτηση. Το οπτικό υλικό δόθηκε εξολοκλήρου στους φοιτητές μαζί με τις πηγές του.



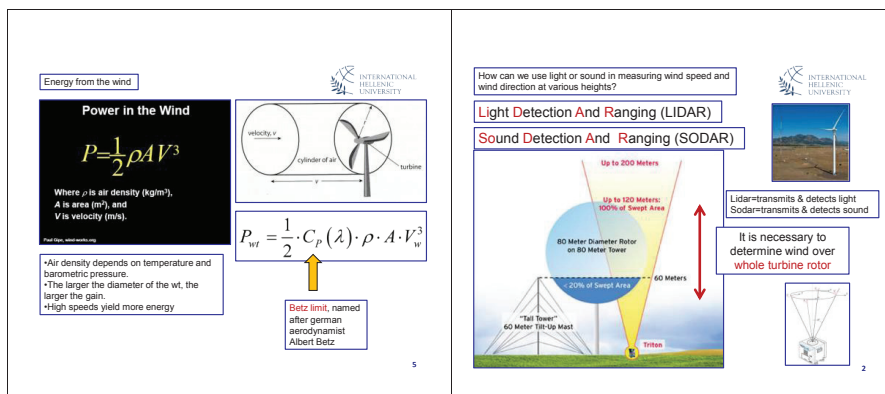
Εικόνα 2: Τέσσερις διαφάνειες από την ενότητα για τις τεχνολογίες των ανεμογεννητριών

3.3. Αιολικό Δυναμικό

Το κεφάλαιο αυτό θεωρείται θεμελιώδες στο μάθημα. Η λάθος εκτίμηση του δυναμικού, κυρίως η υπερεκτίμηση, οδηγεί με βεβαιότητα σε λάθος επένδυση. Για το λόγο αυτό δόθηκε πλούσιο υλικό με τις διαφάνειες να αποτελούν το 24% του συνόλου του μαθήματος. Συζητήθηκαν οι πλέον σύγχρονες τεχνολογίες μετρήσεων με LIDAR και SODAR.

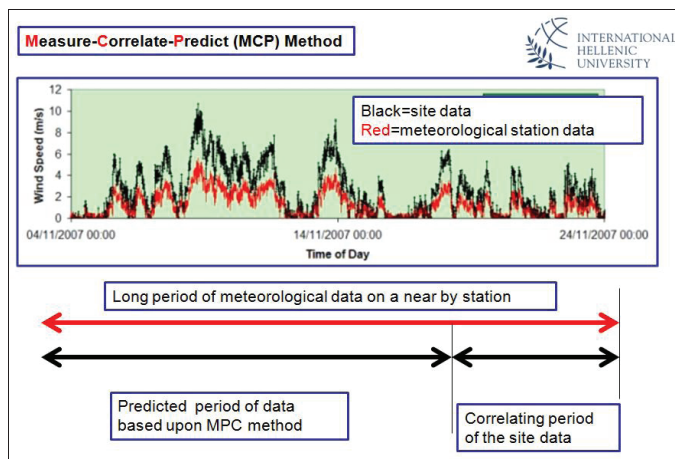
Παρουσιάστηκαν οι παγκόσμιοι επιφανειακοί άνεμοι και ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλονται ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος. Τονίστηκε το ενεργειακό περιεχόμενο στον άνεμο και ο λόγος γιατί είναι τόσο σημαντικό να μετρηθεί η ταχύτητά του με ακρίβεια. Συζητήθηκαν πολλές περιπτώσεις σταθμών μέτρησης με δεδομένα διαρκείας από ένα έως και είκοσι χρόνια. Συζητήθηκε η αναγκαία διάρκεια των μετρήσεων, προκειμένου να αδειοδοτηθεί ένα έργο στην Ελλάδα. Παρουσιάστηκαν όλοι οι τύποι ανεμομέτρων και καταγραφικών που υπάρχουν, προκειμένου να αποτυπωθεί σωστά η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου. Έγινε αναφορά στα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε τεχνολογίας οργάνων. Παρουσιάστηκε μέσω διαφανιών αλλά και video η ανέγερση ενός μετεωρολογικού ιστού.

Καθώς οι τεχνολογίες μετρήσεων δυναμικού με SODAR και LIDAR γίνονται πλέον αποδεκτές για ακριβείς καταγραφές, καλύπτοντας ύψη μέχρι και 300 m χωρίς την ανάγκη ιστών ή πύργων στήριξης, δόθηκαν παραδείγματα συγκρίσεων του προφίλ του ανέμου στο κατώτερο οριακό στρώμα. Έγιναν συγκρίσεις με τυποποιημένους ιστούς εξοπλισμένους με ανεμόμετρα και ανεμοδείκτες.



Εικόνα 3: Ενεργεία από τον άνεμο, τεχνολογίες LIDAR & SODAR

Η μεθοδολογία **Measure Correlate Predict** (MCP) παρουσιάστηκε με παραδείγματα. Χρησιμοποιείται για να συγκριθούν δύο περιοχές όπου στη μία υπάρχουν πολυετείς μετρήσεις, ενώ στην άλλη μετρήσεις μικρότερης χρονικής διάρκειας. Η ισχυρή συσχέτιση, εφόσον αποδειχθεί, οδηγεί σε ασφαλή συμπεράσματα για το δυναμικό της περιοχής με τις περιορισμένες χρονικές διαρκείας μετρήσεις.



Εικόνα 4: Παράδειγμα της μεθοδολογίας MCP

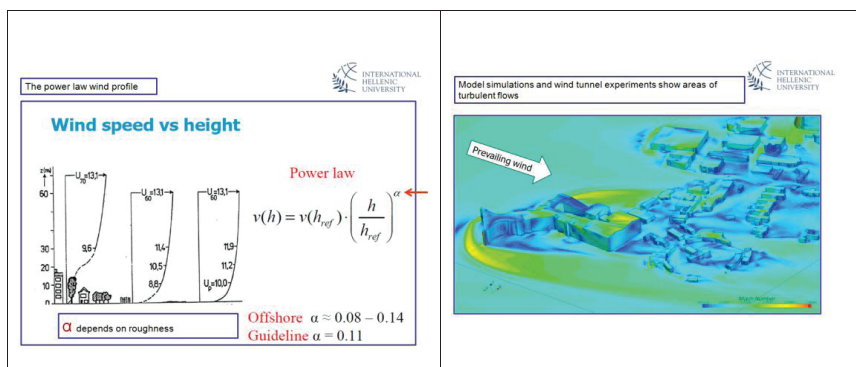
Παρουσιάστηκε το παγκόσμιο σύστημα καταγραφής δεδομένων ταχύτητας από δορυφόρο, The Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications (MERRA) της NASA [9] με παραδείγματα και συγκρίσεις για την Ελλάδα. Η δωρεάν αυτή εφαρμογή χρησιμοποιείται σήμερα από τους μελετητές στη μέθοδο MCP.

Η ανάπτυξη των υπερράκιων αιολικών πάρκων είναι γεγονός. Για τον λόγο αυτόν παρουσιάστηκαν οι πηγές από όπου μπορούν να αντληθούν στοιχεία δυναμικού όπως το σύστημα NESDIS, National Environmental Satellite, Data and Information Service. Για την Ευρώπη ο άτλαντας υπερράκιου αιολικού δυναμικού 4C Offshore είναι ένα τέτοιο παράδειγμα [10]. Σε αυτόν συνδυάστηκε η εκτεταμένη υπερράκια τεχνογνωσία με ένα αξιόπιστο παγκόσμιο δορυφορικό σύνολο δεδομένων υψηλής ανάλυσης, προκειμένου να αναπτυχτεί μια βάση δεδομένων 23 ετών, ώστε να προβλέπεται η παραγωγή των υπερράκιων αιολικών πάρκων με σιγουριά. Παρουσιάστηκε επίσης ο βρετανικός υπερράκιος αιολικό άτλαντας, αποτέλεσμα δορυφορικών μετρήσεων και μοντελοποίησης [11].

Οι φοιτητές αντιλήφθηκαν τις δυνατότητες που υπάρχουν σήμερα διαδικτυακά στην άντληση στοιχείων αιολικού δυναμικού και στο πώς αυτά χρησιμοποιούνται στην πρόβλεψη της μακροχρόνιας ενεργειακής συμπεριφοράς ενός αιολικού πάρκου.

3.4. Επιλογή θέσεων εγκατάστασης αιολικών πάρκων

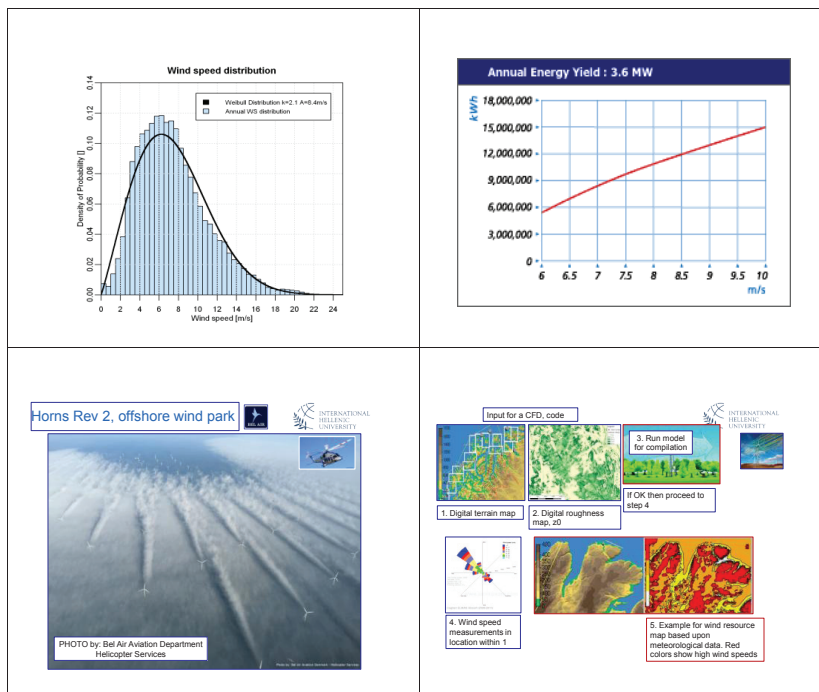
Η ανάπτυξη ενός νέου αιολικού πάρκου μπορεί και πρέπει να είναι δημιουργική και διασκεδαστική. Εξετάστηκαν τα απαραίτητα στοιχεία που χρειάζονται να συγκεντρωθούν από πριν, όπως είναι οι χάρτες, οι δορυφορικές φωτογραφίες, προκαταρκτικές έρευνες διέλευσης οχημάτων μεταφοράς εξοπλισμού, οι περιβαλλοντικοί και τεχνικοί περιορισμοί της υποψήφιας θέσης. Όλα αυτά είναι εξίσου σημαντικά με την αξιολόγηση του αιολικού δυναμικού. Αναφέρθηκαν τα πλεονεκτήματα της χρήσης των κορυφογραμμών σε λόφους ή ορεινές περιοχές. Συζητήθηκε η καταλληλότητα των περιοχών όταν αυτές γειτνιάζουν με κτήρια ή δάση.



Εικόνα 5: Το προφίλ του ανέμου και οι περιοχές υψηλής τύρβης λόγω των κτηρίων

3.5. Ετήσια ενεργειακή παραγωγή

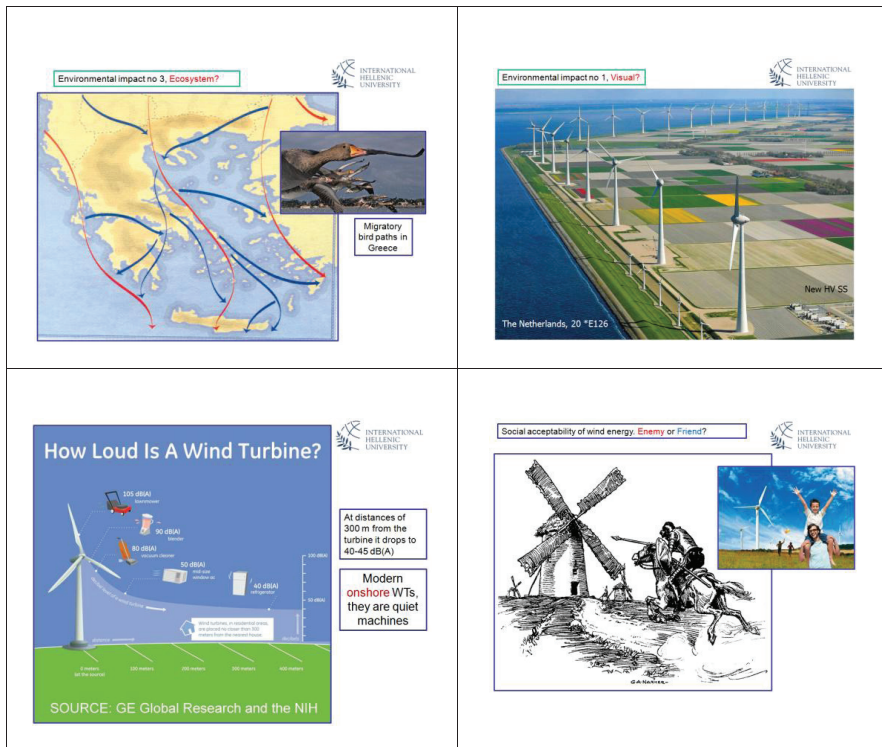
Η συνήθης διάρκεια λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου είναι εικοσαετής. Για τον λόγο αυτόν το περιθώριο λάθους στην πρόβλεψη της ενεργειακής παραγωγής πρέπει να είναι μικρό. Παρουσιάστηκαν παραδείγματα για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης από μετρήσεις αιολικού δυναμικού με τη χρήση μιας καμπύλης διάρκειας, καθώς και με θεωρητικές προσεγγίσεις που βασίζονται στις παραμέτρους Weibull k και C και στην κατανομή Rayleigh σε συνδυασμό με την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας. Για τα αιολικά πάρκα που χωροθετούνται σε περιοχές με σύνθετο ανάγλυφο προτάθηκε η χρήση αλγορίθμων CFD. Τα παραδείγματα τεκμηρίωσαν τη χρησιμότητα των αριθμητικών κωδίκων. Δόθηκε πλήρης λίστα των υφιστάμενων σήμερα κωδίκων.



Εικόνα 6: Κατανομή Weibull, ενεργειακή παραγωγή α/γ 3,6MW για κατανομή ταχυτήτων Rayleigh, φωτογραφία αιολικού παρκου με ομόρρους(wakes), αναγκαία στοιχεία εισόδου σε πρόγραμμα CFD

3.6. Κοινωνική αποδοχή και περιβαλλοντικές επιπτώσεις

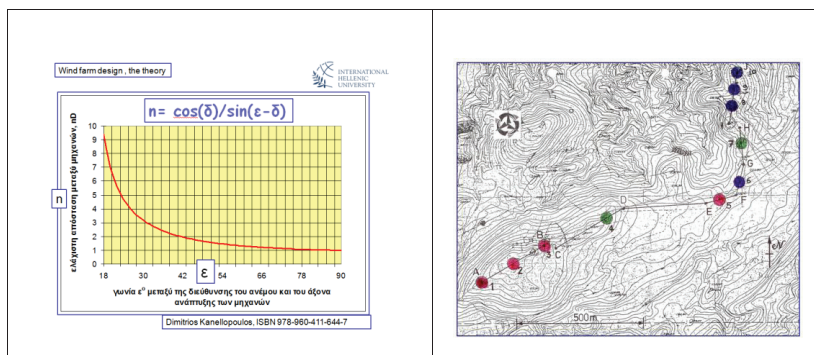
Οι εργαζόμενοι στον τομέα της ανάπτυξης αιολικών πάρκων, παρόλο που η τεχνολογία παράγει καθαρή ενέργεια, βρίσκονται πολλές φορές αντιμέτωποι με κοινωνικές αντιδράσεις και χρειάζονται επιχειρήματα για να την υπερασπιστούν. Χρειάζεται να έχουμε κατά νου ότι η αιολική βιομηχανία οφείλει να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην εκπαίδευση της κοινωνίας με την παροχή στοιχείων επί του θέματος. Δεν υπάρχει τρόπος να πείσουμε το σύνολο των ανθρώπων, αλλά εάν η πληροφορία είναι υπέρ της, τότε η αιολική ενέργεια θα έχει μέλλον. Συνεπώς, είναι επιτακτική ανάγκη οι φοιτητές να γνωρίζουν λεπτομερώς τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της εγκατάστασης ανεμογεννητριών σε ευαίσθητα οικοσυστήματα ή στο θαλάσσιο περιβάλλον. Δεν μπορούμε να κρύψουμε τυχόν προβλήματα στο φυσικό περιβάλλον. Ο λεπτομερής προγραμματισμός εκ των προτέρων, οι περιβαλλοντικές μελέτες και η έγκαιρη εμπλοκή της κοινωνίας σε έναν ανοιχτό και ειλικρινή διάλογο οδηγούν σε επιτυχημένη λειτουργία των αιολικών πάρκων. Αυτό το τμήμα του μαθήματος θεωρήθηκε εξαιρετικά σημαντικό και δόθηκε στους φοιτητές πρόσθετο υλικό από περιβαλλοντικές εκθέσεις διεθνώς. Με 79 διαφάνειες και 3 video η ενότητα αυτή ήταν η δεύτερη μεγαλύτερη σε υλικό που παρουσιάστηκε. Παρουσιάστηκαν ισχυρά αποδεικτικά στοιχεία που υποστηρίζουν την αιολική τεχνολογία και αντικρούουν τους πολέμιούς της που τάσσονται με το σύνδρομο **NIMBY** (Not In My Back Yard).



Εικόνα 7: Μεταναστευτικοί διάδρομοι πτηνών στην Ελλάδα, οπτική όχληση, επίπεδα θορύβου α/γ, κοινωνική συμμετοχή

3.7. Το εργαστήριο. Σχεδιασμός αιολικού πάρκου σε έδαφος με έντονο ανάγλυφο

Οι φοιτητές συμμετείχαν σε ένα εργαστήριο στόχος του οποίου ήταν να σχεδιαστεί ένα αιολικό πάρκο κατά μήκος μιας κορυφογραμμής με μεταβαλλόμενο προσανατολισμό. Επιλέχθηκαν ανεμογεννήτριες ονομαστικής ισχύος από 300 kW έως 3,45 MW και διαμέτρους ρότορα από 30 έως 112 m. Όλοι είχαν στη διάθεσή τους τοπογραφικούς χάρτες σε κλίμακα 1:5000 και διαχωρίστηκαν σε ομάδες των 2 ατόμων. Για την άσκηση γνώριζαν τη θεωρία εξέλιξης του ομόρρου (wake) η οποία βασίστηκε σε πειραματικά δεδομένα [12], [13]. Η άσκηση αποτελεί μια πρώτη προσέγγιση στο σχεδιασμό διάταξης των μηχανών πριν από τη χρήση ενός κώδικα CFD που χρειάζεται ώστε να βελτιστοποιηθεί η απόδοση του αιολικού πάρκου. Η άσκηση αποδείχθηκε πολύ παραγωγική, επειδή μπόρεσαν να συγκρίνουν διαφορετικά σενάρια με διαφορετικούς τύπους μηχανών σε συγκεκριμένο διαθέσιμο χώρο. Όλοι τους εργάστηκαν με ενθουσιασμό.

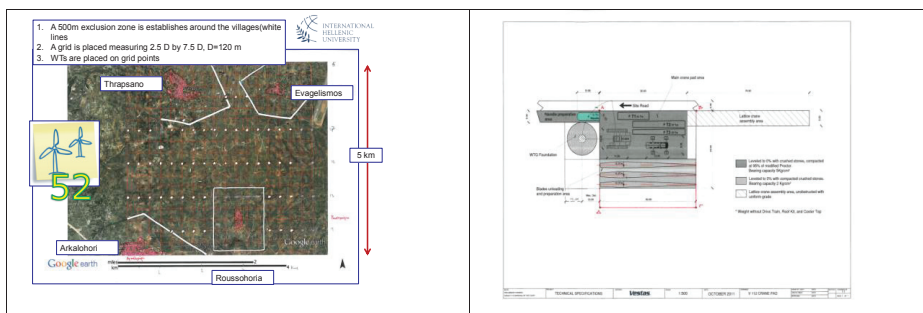


Εικόνα 8: Υπολογισμός εγγύτητας μηχανών εκτός ομόρρου (wake). Σχεδιασμός αιολικού πάρκου με επικρατέστερες διευθύνσεις ανέμου, WNW & NW και α/γ 1MW, διαμέτρου 45m

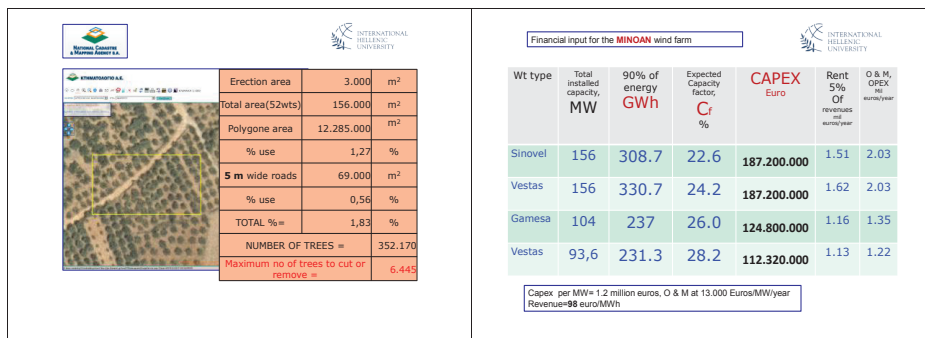
3.8. Η μελέτη σκοπιμότητας- τεχνική και οικονομική ανάλυση υποψήφιου έργου

Παρουσιάστηκε η μελέτη σκοπιμότητας για ένα μεγάλο αιολικό πάρκο στην Κρήτη. Χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία πραγματικών μετρήσεων αιολικού δυναμικού. Με τα στοιχεία αυτά έγινε μοντελοποίηση του αιολικού δυναμικού μιας ευρύτερης περιοχής με CFD σε έκταση διαστάσεων 5 επί 5 χιλιομέτρων.

Επιλέχθηκαν σύγχρονες τεχνολογίες ανεμογεννητριών με ονομαστική ισχύ που κυμαίνεται από 1,8 έως 3 MW. Λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές τιμές του αναγκαίου κεφαλαίου επένδυσης, CAPEX, και τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης, OPEX καθώς και τις συνθήκες δανεισμού, υπολογίστηκαν ο Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης, IRR, και η Περίοδος Αποπληρωμής, Pay Back Time χρησιμοποιώντας το δωρεάν διαθέσιμο μοντέλο RETScreen. Πρόκειται για ένα αξιόπιστο διεθνές λογισμικό που εκτιμά την απόδοση έργων από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και συμπαραγωγής ενέργειας [14].



Εικόνα 9: Περιοχή έκτασης 5*5 km με ζώνες αποκλεισμού, εκτίμηση εμβαδού για την ανέγερση α/γ ονομαστικής ισχύος 3 MW



Εικόνα 10: Εκτίμηση κοπής ή μεταφοράς δένδρων για την εγκατάσταση 52 μηχανών, οικονομικές παραδοχές επένδυσης

Αυτό το τελικό παράδειγμα σχεδιάστηκε ώστε για να συνδυάσει όλα τα βασικά θέματα που οι φοιτητές έμαθαν κατά τη διάρκεια των διαλέξεων. Αυτή η προσέγγιση, βήμα προς βήμα, τεκμηρίωσε την μεθοδολογία που διδάχτηκαν. Αυτή ήταν και η τελευταία διάλεξη, όπου οι φοιτητές είχαν την ευκαιρία να υποβάλουν γενικές ερωτήσεις σχετικά με το σύνολο της ύλης του μαθήματος. Η πλήρης μελέτη που παρουσιάστηκε ήταν απαραίτητη για την κατανόηση των εφαρμογών των αιολικών συστημάτων.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Φάνηκε ότι είναι δυνατή η εκμάθηση θεμάτων αιολικής ενέργειας σε διάστημα 18 διδακτικών ωρών. Οφείλουμε όμως να έχουμε κατά νου ότι η επιλογή του διδακτέας ύλης πρέπει να γίνεται κατανοητή από την πλειοψηφία των φοιτητών λόγω διαφορετικών κατευθύνσεων που είχαν από το πρώτο τους πτυχίο. Η πρόβλεψη των ατομικών αναγκών και η παροχή πρόσθετων πληροφοριών είναι μέρος των διαλέξεων και απαιτεί ιδιαίτερη προετοιμασία.

Οι φοιτητές μπορούσαν επικοινωνήσουν με τον διδάσκοντα με email ώστε να λύνουν τυχόν απορίες τους στο μεσοδιάστημα των διαλέξεων.

Το περιεχόμενο κάλλιστα μπορεί να διαμορφωθεί ανάλογα με το υπόβαθρο των φοιτητών. Από αυτό θα εξαρτηθεί το περιεχόμενο σε μαθηματικές συναρτήσεις και η φυσική που θα συμπεριληφθεί στη ύλη. Η αναζήτηση των κατάλληλων πληροφοριών στο διαδίκτυο δεν είναι εύκολη υπόθεση και οφείλουμε να αναζητούμε αξιόπιστες πηγές. Τα επιστημονικά περιοδικά και τα πρακτικά διεθνών συνεδρίων, όπως αυτά που οργανώνει ετησίως η WindEurope (τέως EWEA), προσφέρουν εξαιρετικό υλικό.

Η διδασκαλία αυτής της υπέροχης μορφής ενέργειας είναι διασκεδαστική.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στον Δρ. Γεώργιο Μαρτινόπουλο της Σχολής Επιστημών Τεχνολογίας και στο διοικητικό προσωπικό με τους οποίους συνεργάστηκα στο Διεθνές Ελληνικό Πανεπιστήμιο για την υλοποίηση του μαθήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] WindEurope statistics
<https://windeurope.org/about-wind/statistics/>
- [2] Global Wind Energy Council, GWEC
<http://www.gwec.net/publications/global-wind-energy-outlook/>
- [3] International Energy Agency, IEA
http://www.ieawind.org/annual_reports.html
- [4] World Bank
<https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/24913/Assessing0and00ble0energy0resources.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [5] International Monetary Fund, IMF
http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2016/01/pdf/sf_commod.pdf
- [6] DTU Technical University of Denmark
<http://www.dtu.dk/english/research/publications-and-projects>
- [7] NREL, National Renewable Energy Laboratory
<http://www.nrel.gov/research/publications.html>
- [8] MEASENET Measuring Network of Wind Energy Institutes
<http://www.measnet.com/documents/>
- [9] NASA - Modern Era Retrospective Analysis for Research Applications, MERRA
<https://gmao.gsfc.nasa.gov/ref/merra/atlas/>
- [10] 4C OFFSHORE
<http://www.4coffshore.com/offshorewind/>
- [11] British offshore atlas
http://vision.abpmer.net/renewables/map_default.phtml?config=tide&reset=session=groups,resultlayers
- [12] D. V. Kanellopoulos, "Wind Farm Lay-out in Areas of Complex Terrain". Proc. Of the European Wind Energy Conference EWEC 94, 10-14 Oct. 1994, Thessaloniki Greece. Volume I, pp. 328-332.
- [13] D. V. Kanellopoulos "Wind Energy, wind farm design". ION Publishers May 2008. 223 pages, ISBN: 978-960-411-644-7. (The book is in Greek).
- [14] RETScreen, National Resources of Canada, Government of Canada
<http://www.nrcan.gc.ca/energy/software-tools/7465>

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΕΣ ΣΠΟΥΔΕΣ ΣΤΟΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΚΤΙΡΙΩΝ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΕΞ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟΥ

Ε. Ανδρέου¹, Κ. Αξαρή¹, Αικ. Μερέση¹, Αικ. Παρπαϊρή¹

¹Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών,
πάροδος Αριστοτέλους 18, 26335 Πάτρα
e-mail: eandreu3@gmail.com, axarli@arch.auth.gr, katmeresi@yahoo.gr,
katerina@parpairis.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σήμερα η εξ αποστάσεως εκπαίδευση αποτελεί μια διαδεδομένη και διαρκώς αναπτυσσόμενη μορφή εκπαίδευσης, που αξιοποιεί, συν τοις άλλοις, τις ραγδαίες εξελίξεις στον τομέα των Τεχνολογιών της Πληροφορίας και της Επικοινωνίας (Τ.Π.Ε.) στην Εκπαίδευση. Σημαντικότερο ελκυστικό στοιχείο της είναι η ευελιξία που παρέχει στους εκπαιδευόμενους σε σχέση με το χώρο και το χρόνο διεξαγωγής της. Στην Ελλάδα, ο κύριος φορέας παροχής εξ αποστάσεως εκπαίδευσης είναι το Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο (Ε.Α.Π.), το οποίο ιδρύθηκε το 1992 και από το 1998 παρέχει πλήθος προπτυχιακών και μεταπτυχιακών προγραμμάτων.

Παρά την ευρεία διάδοση, σε παγκόσμιο αλλά και εγχώριο επίπεδο, της εξ αποστάσεως εκπαίδευσης, έχουν εκφραστεί κατά καιρούς αμφιβολίες για το κατά πόσο οι μέθοδοι αυτής της μορφής εκπαίδευσης είναι κατάλληλες για τη διδασκαλία όλων των αντικειμένων και επιστημονικών πεδίων. Αρκετοί υποστηρίζουν πως πεδία που εμπεριέχουν τεχνικές γνώσεις θα έπρεπε να διδάσκονται με μεθόδους κλασσικής εκπαιδευτικής διαδικασίας.

Στο παραπάνω πλαίσιο, η παρούσα έρευνα στοχεύει σε μια προσπάθεια διερεύνησης του βαθμού αποτελεσματικής διδασκαλίας της θεματικής Ενότητας «Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων και Περιβάλλοντα Χώρου» του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Κτιρίων» που παρέχεται στο Ε.Α.Π. από το 2001 μέχρι και σήμερα. Συγκεκριμένα, μέσω ερωτηματολογίων που στάλθηκαν σε όλους τους απόφοιτους του εν λόγω προγράμματος, μελετήθηκαν διάφορα θέματα που σχετίζονται με την αποτελεσματικότητα της διδασκαλίας του συγκεκριμένου αντικειμένου, όπως η επιρροή της σε εργασιακό και προσωπικό επίπεδο, καθώς και το γενικότερο αίσθημα ικανοποίησης. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το συγκεκριμένο πρόγραμμα είχαν δικαίωμα να παρακολουθήσουν πληθώρα ειδικοτήτων, όπως απόφοιτοι όλων των Πολυτεχνικών Σχολών, γεωπόνοι, δασολόγοι και αρχιτέκτονες τοπίου (Τ.Ε.), εκ των οποίων αρκετοί δεν είχαν διδαχθεί ποτέ κτιριακό σχεδιασμό.

Τα συμπεράσματα της έρευνας ως επί το πλείστον καταδεικνύουν τον ικανοποιητικό βαθμό επιτυχούς/αποτελεσματικής διδασκαλίας του βιοκλιματικού σχεδιασμού κτιρίων στο μεγάλο εύρος επιστημόνων που προαναφέρθηκε, αλλά και τα σημεία που θα μπορούσαν να βελτιωθούν, με σκοπό την επίτευξη ακόμα υψηλότερου επιπέδου εκπαιδευτικής διαδικασίας.

Λέξεις Κλειδιά: Εξ αποστάσεως εκπαίδευση, μεταπτυχιακές σπουδές, βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1. Η εξ αποστάσεως εκπαίδευση και τα χαρακτηριστικά της

Μία προσέγγιση για την εξ αποστάσεως εκπαίδευση, όπως αυτή αναπτύχθηκε στη χώρα μας, είναι αυτή που την ορίζει ως *«την εκπαίδευση που διδάσκει και ενεργοποιεί τον μαθητή πώς να μαθαίνει μόνος του και πώς να λειτουργεί αυτόνομα προς μία ευρετική πορεία αυτομάθησης»* [1]. Βασικά χαρακτηριστικά της εξ αποστάσεως εκπαίδευσης είναι τα εξής [2],[3]:

- Η απόσταση που χωρίζει τον εκπαιδευόμενο από τον εκπαιδευτή, είναι το στοιχείο που διαφοροποιεί την εξ αποστάσεως εκπαίδευση από την πρόσωπο με πρόσωπο διδασκαλία, ωστόσο ο εκπαιδευόμενος καθοδηγείται από τον εκπαιδευτή
- Η χρήση και μέγιστη αξιοποίηση ειδικά σχεδιασμένου- συνθετικού- λειτουργικού- ολοκληρωμένου- πολυμορφικού εκπαιδευτικού υλικού, στοιχείο που διαφοροποιεί την εξ αποστάσεως από την κατ' ιδίαν μελέτη
- Η χρήση τεχνολογικών μέσων και εργαλείων για τη μεταφορά του εκπαιδευτικού περιεχομένου. Μέσω αυτών των τεχνολογικών εργαλείων και μέσων συναντώνται εκπαιδευόμενοι και εκπαιδευτές και γίνεται συστηματική υποστήριξη των εκπαιδευομένων.
- Η εξασφάλιση αμφίδρομης επικοινωνίας έτσι ώστε ο εκπαιδευόμενος να επωφελείται και /ή ακόμα και από τον άμεσο και ζωντανό διάλογο
- Η δυνατότητα συναντήσεων σε περιστασιακή βάση τόσο για διδακτικούς όσο και για κοινωνικούς λόγους
- Η ικανότητα του εκπαιδευτικού φορέα / ιδρύματος να αναπροσαρμόζει το εκπαιδευτικό υλικό, μηχανισμούς και πρακτικές
- Η προσαρμογή ή /και επιλογή της εκπαιδευτικής διαδικασίας σύμφωνα με τις υπάρχουσες ανάγκες
- Ο μεγάλος αριθμός εκπαιδευομένων γεγονός το οποίο, διαφοροποιεί ριζικά την εξ αποστάσεως εκπαίδευση από τις άλλες μορφές της εκπαίδευσης.

Σήμερα η μορφή αυτή εκπαίδευσης είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη παγκοσμίως, αλλά και στη χώρα μας, λόγω της ευελιξίας που παρέχει στους εκπαιδευόμενους και χάρη στην αξιοποίηση της εξέλιξης των Τεχνολογιών της Πληροφορίας και της Επικοινωνίας (Τ.Π.Ε.) στην Εκπαίδευση. Παράλληλα, έχει υποστηριχθεί ότι σε πλείστες εκφάνσεις της ζωής έχουν εισβάλλει κοινωνικο-πολιτισμικές και κοινωνικο- τεχνολογικές τάσεις όπως ο υβριδισμός (π.χ. ανάμεσα στο φυσικό και το ψηφιακό, ανάμεσα στο ιδιωτικό και το δημόσιο), η κοινωνία των δικτύων και η ταχέως μεταβαλλόμενη κοινωνία και ότι οι τάσεις αυτές μπορούν να μεταβάλλουν την εκπαίδευση και τις παραδοσιακές της μορφές [4].

Η εξ αποστάσεως εκπαίδευση βρίσκει παγκοσμίως εφαρμογή στα Προγράμματα Ανοικτών Πανεπιστημίων, στα Μαζικά Ανοικτά Εκπαιδευτικά Προγράμματα μέσω διαδικτύου (Massive Open Online Courses -MOOCs) και σε άλλες μορφές ανοικτών εκπαιδευτικών πόρων (Open Educational Resources – OER). Ανάλογα με τα μέσα και τις τεχνολογίες που εφαρμόζονται, οι συνηθέστερες εφαρμογές μπορεί να περιλαμβάνουν την εικονική τάξη, τη σύγχρονη αναμετάδοση της εκπαιδευτικής διαδικασίας σε απομακρυσμένους χρήστες, τα μη συγχρονισμένα διαδικτυακά μαθήματα τα οποία παρέχουν ευελιξία και δυνατότητα επιλογής του χρόνου παρακολούθησης, τις διαδραστικές τάξεις, τη χρήση ψηφιακών χώρων εκπαίδευσης κλπ., ενώ μπορεί να περιλαμβάνεται ως δυνατότητα και η δια ζώσης επικοινωνία [5].

1.2. Το μεταπτυχιακό πρόγραμμα «Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και κτιρίων» του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου

Στην Ελλάδα, ο κύριος φορέας παροχής εξ αποστάσεως εκπαίδευσης είναι το Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο (Ε.Α.Π.), το οποίο ιδρύθηκε το 1992 και από το 1998 παρέχει πλήθος προπτυχιακών και μεταπτυχιακών προγραμμάτων. Ένα από τα μεταπτυχιακά προγράμματα της Σχολής Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας του Ε.Α.Π. είναι αυτό με τίτλο «Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Κτιρίων». Έτος έναρξης ήταν το 2001, ενώ από το ακαδημαϊκό έτος 2016-2017 δεν γίνονται δεκτοί νέοι φοιτητές (το πρόγραμμα εξακολουθεί να παρακολουθείται από τους παλαιούς φοιτητές που έχουν

την υποχρέωση να το ολοκληρώσουν έως το έτος 2022). Σκοπός του προγράμματος ήταν η απόκτηση γνώσεων και η ανάπτυξη δεξιοτήτων από τους ασχολούμενους με το σχεδιασμό, έλεγχο και διαχείριση πόλεων, κτιρίων και τοπίου σχετικά με τα θέματα προστασίας, λειτουργίας και διαχείρισης του περιβάλλοντος. Για την απόκτηση του μεταπτυχιακού διπλώματος, ήταν υποχρεωτική η επιτυχής παρακολούθηση των παρακάτω τεσσάρων Θεματικών Ενοτήτων, καθώς και η εκπόνηση Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας:

- Θ.Ε. ΠΣΠ50: Εισαγωγή στο Φυσικό και Ανθρωπογενές Περιβάλλον
- Θ.Ε. ΠΣΠ51: Σχεδιασμός, Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις και Μέθοδοι Εκτίμησής τους
- Θ.Ε. ΠΣΠ60: Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Ανοικτών Χώρων
- Θ.Ε. ΠΣΠ61: Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Κτιρίων

Οι κατηγορίες των φοιτητών που γίνονταν δεκτοί φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 1: Δεκτοί φοιτητές στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα του Ε.Α.Π. με τίτλο «Περιβαλλοντικός Σχεδιασμός Πόλεων και Κτιρίων»

Ποσοστό θέσεων (από τις περίπου 140 προσφερόμενες ανά έτος)	Πτυχιακές σπουδές
50%	Διπλωματούχοι πενταετούς κύκλου σπουδών απόφοιτοι Πανεπιστημίου Τμημάτων Αρχιτεκτονικής και αρχιτέκτονες τοπίου από Πανεπιστήμια του εξωτερικού με αναγνώριση πτυχίου από το ΔΙΚΑΤΣΑ/ ΔΟΑΤΑΠ.
30%	Διπλωματούχοι πενταετούς κύκλου σπουδών τμημάτων Πολιτικών Μηχανικών ή Μηχανικών Χωροταξίας, Πολεοδομίας και Περιφερειακής Ανάπτυξης ή Μηχανολόγων Μηχανικών ή Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας ή Μηχανολόγων Ναυπηγών Μηχανικών ή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών ή Χημικών Μηχανικών ή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών ή Μηχανικοί Απόφοιτοι Στρατιωτικών Σχολών.
20%	Πτυχιούχοι Πανεπιστημίου Γεωπόνων ή Δασολόγοι ή και Πτυχιούχοι ΤΕΙ στην ειδικότητα Ανθοκομίας και Αρχιτεκτονική Τοπίου ή Αρχιτεκτονική Κήπων και Τοπίου ή Αρχιτεκτονική Τοπίου.

Η παρούσα έρευνα επικεντρώνεται στη διδασκαλία της Θ.Ε. ΠΣΠ61 με τίτλο «Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Πόλεων και κτιρίων», η οποία περιελάμβανε τα ακόλουθα γνωστικά αντικείμενα:

1. Βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων
2. Προβλήματα αποκατάστασης στη μικρή κλίμακα του αστικού χώρου
3. Βιοκλιματικός σχεδιασμός υπαίθριων χώρων - ασκήσεις
4. Ηλιασμός, φωτισμός, αερισμός, δροσισμός, θέρμανση

Η εκπαιδευτική διαδικασία περιελάμβανε πέντε Ομαδικές Συμβουλευτικές Συναντήσεις καθ' όλη τη διάρκεια κάθε ακαδημαϊκού έτους, μη υποχρεωτικές για τους φοιτητές, καθώς και συνεχή επικοινωνία με τον σύμβουλο καθηγητή μέσω τηλεφώνου και ηλεκτρονικής αλληλογραφίας. Τα τελευταία χρόνια εισήχθησαν στη λειτουργία του ΕΑΠ και νέες δυνατότητες διαδραστικότητας, επικοινωνίας και εφαρμογής εκπαιδευτικών διαδικασιών με χρήση ψηφιακών μέσων τεχνολογίας, όπως ο ψηφιακός χώρος εκπαίδευσης, η ψηφιακή υποβολή και ανατροφοδότηση των εργασιών, η δυνατότητα επικοινωνίας μέσα από το forum της Θ.Ε. κ.α. Οι φοιτητές ήταν υποχρεωμένοι να εκπονήσουν κατ' ελάχιστο τέσσερις από τις πέντε εργασίες που δίνονταν, καθώς και να επιτύχουν στις γραπτές εξετάσεις που περιελάμβαναν θεωρητικές ερωτήσεις και σχεδιαστικό κομμάτι. Τέλος, απαραίτητη προϋπόθεση για να παρακολουθήσουν τη συγκεκριμένη Θεματική Ενότητα ήταν να έχουν παρακολουθήσει, ή να παρακολουθούν ταυτόχρονα, τις δύο πρώτες, δηλαδή τις ΠΣΠ50 και ΠΣΠ51.

1.3. Ερευνητικός στόχος

Κατά καιρούς έχουν εκφραστεί αμφιβολίες για το κατά πόσο οι μέθοδοι της εξ αποστάσεως εκπαίδευσης είναι κατάλληλες για τη διδασκαλία όλων των αντικειμένων και επιστημονικών πεδίων [6],[7]. Αρκετοί υποστηρίζουν πως πεδία που εμπεριέχουν τεχνικές γνώσεις θα έπρεπε να διδάσκονται με μεθόδους της κλασσικής εκπαιδευτικής διαδικασίας [7]. Παράλληλα, αντικείμενα Πολυτεχνικών Σχολών διδάσκονται με διαρκώς εξελισσόμενα μέσα εξ αποστάσεως εκπαίδευσης [8] ενώ οι νέες τεχνολογίες (π.χ. εικονικά εργαστήρια) δίνουν νέες δυνατότητες διδασκαλίας εξ αποστάσεως, ακόμα και σε αντικείμενα που εντάσσονται στις Φυσικές Επιστήμες και στις Επιστήμες Μηχανικών, που μέχρι σήμερα ήταν αυτονόητη η αναγκαιότητα της φυσικής παρουσίας σε συγκεκριμένο χώρο και η χρήση συγκεκριμένων μέσων και εξοπλισμού [9].

Ακόμα, είναι ιδιαίτερος έντονο το ενδιαφέρον επιστημόνων για την εφαρμογή μεθόδων άντλησης δεδομένων που αφορούν στην εκπαίδευση και στο μαθησιακό προφίλ των εκπαιδευόμενων [5],[10],[11],[12]. Στόχος της διαδικασίας αυτής είναι η καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των φοιτητών, ο προσδιορισμός του τρόπου με τον οποίο οι φοιτητές μαθαίνουν και του τρόπου με τον οποίο η διαδικασία μάθησης και η απόδοση των φοιτητών μπορεί να βελτιωθεί και να αυξηθούν οι δυνατότητες επιτυχούς ολοκλήρωσης των σπουδών. Στα πλαίσια της αντίληψης ότι στο επίκεντρο της εξ αποστάσεως εκπαίδευσης πρέπει να είναι ο εκπαιδευόμενος, έχει διατυπωθεί η άποψη [11] ότι η συλλογή πληροφοριών σχετικά με τα χαρακτηριστικά και τις ατομικές ανάγκες των εκπαιδευόμενων συνιστά ουσιώδες προαπαιτούμενο για την επιτυχή ολοκλήρωση των σπουδών. Συνεπώς τονίζεται η σημασία της συλλογής στοιχείων για την κατανόηση του μαθησιακού προφίλ των εκπαιδευόμενων. Σε αυτά μπορεί να περιλαμβάνονται στοιχεία δημογραφικά, όπως η ηλικία, το φύλο, το γνωσιακό υπόβαθρο (π.χ. τι γνωρίζουν ήδη για το αντικείμενο και τι σχετικές δεξιότητες έχουν), στοιχεία που αφορούν σε κίνητρα (π.χ. ο τρόπος με τον οποίο τον αντικείμενο των σπουδών σχετίζεται με τη ζωή και την εργασία τους), στοιχεία μαθησιακών παραγόντων, στοιχεία παραγόντων πηγών (π.χ. που, τότε και πως μελετούν, δυνατότητα πρόσβασης σε ανθρώπινη υποστήριξη) κ.α. [11]

Έχοντας ως δεδομένα: τους παραπάνω προβληματισμούς για την εξ αποστάσεως εκπαίδευση, την πολυκλαδική σύνθεση των εισαχθέντων φοιτητών του εν λόγω μεταπτυχιακού προγράμματος, καθώς και τη φύση του διδασκόμενου αντικείμενου, κύριος σκοπός της παρούσας έρευνας υπήρξε η διερεύνηση του βαθμού αποτελεσματικής διδασκαλίας της θεματικής Ενότητας «Βιοκλιματικός Σχεδιασμός Κτιρίων και Περιβάλλοντα Χώρου». Δευτερεύων στόχος υπήρξε η μελέτη της συσχέτισης της διδασκαλίας με άλλους παράγοντες, όπως οι δυσκολίες που αντιμετώπισαν οι φοιτητές και η οικονομική κρίση.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η έρευνα διεξήχθη μέσω ερωτηματολογίου που απαντήθηκε από απόφοιτους του εν λόγω μεταπτυχιακού προγράμματος και με τη βοήθεια του οποίου μελετήθηκαν διάφορα θέματα που σχετίζονται με τη διδασκαλία του συγκεκριμένου αντικείμενου. Αναλυτικότερα, οι πρώτες ερωτήσεις αφορούσαν σε γενικά στοιχεία όπως φύλο, ηλικία, έτος παρακολούθησης και πρώτο πτυχίο, ενώ οι κύριες ερωτήσεις αφορούσαν τη διδακτέα ύλη της Θεματικής Ενότητας, την επιρροή της διδασκαλίας σε εργασιακό και προσωπικό επίπεδο, καθώς και το γενικότερο αίσθημα ικανοποίησης.

Το ερωτηματολόγιο δημιουργήθηκε σε φόρμα Google [14] και, ενώ στάλθηκε στις ηλεκτρονικές διευθύνσεις περίπου 500 φοιτητών, το έλαβαν περίπου οι 300, λόγω του ότι αρκετές ηλεκτρονικές διευθύνσεις παλαιών φοιτητών δεν ισχύουν πια. Από αυτούς που το έλαβαν απάντησαν οι 170, γεγονός που εκφράζει ένα σχετικά αδύναμο δεσμό των φοιτητών με το πρόγραμμα.

Ως κριτήρια του βαθμού αποτελεσματικής διδασκαλίας της θεματικής Ενότητας θεωρήθηκαν:

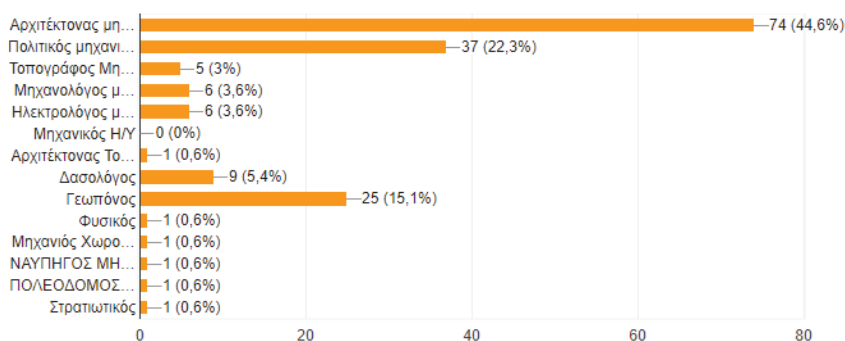
- η ικανοποίηση των αποφοίτων σε σχέση με ό,τι διδάχθηκαν
- ο βαθμός και το είδος επιρροής σε προσωπικό επίπεδο
- ο βαθμός και το είδος επιρροής σε επαγγελματικό επίπεδο
- η διαμορφωμένη άποψή τους για τη σημασία του αντικείμενου, ήτοι του βιοκλιματικού σχεδιασμού κτιρίων και ανοικτών χώρων
- η άποψή τους για το αν θεωρούν πως το συγκεκριμένο αντικείμενο μπορεί να διδαχθεί αποτελεσματικά μέσω της εξ αποστάσεως εκπαίδευσης

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Οι περισσότερες απαντήσεις στο ερωτηματολόγιο που στάλθηκε προήλθαν από γυναίκες (σε ποσοστό 56,3%) και από την ηλικιακή ομάδα μεταξύ 35 και 44 ετών (σε ποσοστό 50,3%). Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε συμφωνία με στοιχεία που αφορούν το σύνολο των προγραμμάτων του ΕΑΠ [10]. Επίσης είναι σε συμφωνία με στοιχεία που αφορούν την εξ αποστάσεως εκπαίδευση γενικότερα [11], σύμφωνα με τα οποία η εξ αποστάσεως εκπαίδευση θεωρείται φιλική ιδιαίτερα για τις γυναίκες, καθώς λειτουργεί ως διέξοδος στα ανελαστικά κριτήρια φοίτησης των συμβατικών πανεπιστημίων και ικανοποιεί τις γυναίκες σε σχέση με τις σύνθετες εργασιακές και οικογενειακές τους υποχρεώσεις. Ακόμα, όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία [11], η ηλικία των περισσότερων εκπαιδευόμενων από απόσταση ποικίλει από 25 έως 50 ετών, ενώ ο μέσος όρος ηλικίας στην τριτοβάθμια εξ αποστάσεως εκπαίδευση κυμαίνεται στα 30 με 34 χρόνια. Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνονται οι απαντήσεις στις ερωτήσεις «κλειστού τύπου», ενώ οι απαντήσεις στις ερωτήσεις «ανοικτού τύπου» περιγράφονται με τη μορφή κειμένου, λόγω του μεγάλου αριθμού διαφορετικών απαντήσεων.

Ειδικότητα

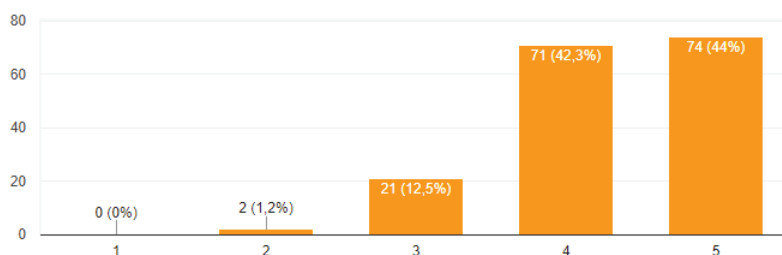
166 απαντήσεις



Εικόνα 1: Η κατανομή των απαντήσεων ως προς την ειδικότητα (βασικό πτυχίο)

Η γενική εντύπωση που σας έχει μείνει από την ΠΣΠ61 είναι:

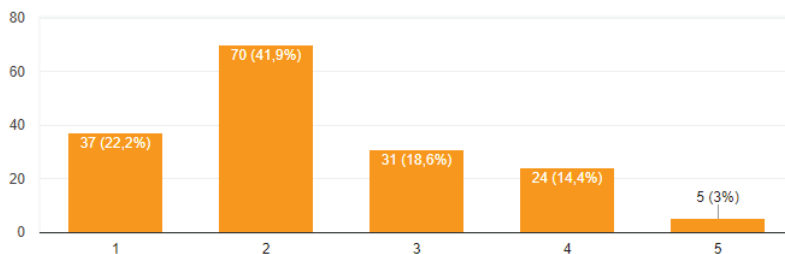
168 απαντήσεις



Εικόνα 2: Οι απαντήσεις στην ερώτηση του τίτλου, σε κλίμακα 1-5 (πολύ αρνητική - πολύ θετική)

Αντιμετωπίσατε δυσκολίες στην εκπλήρωση των βασικών σας υποχρεώσεων (π.χ. εκπόνηση εργασιών) στα πλαίσια της ενότητας ;

167 απαντήσεις

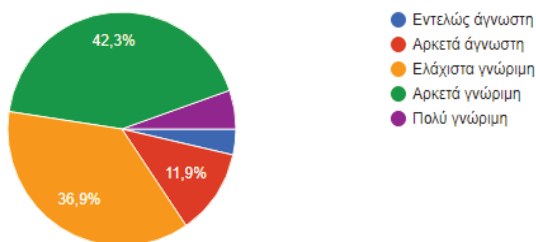


Εικόνα 3: Οι απαντήσεις στην ερώτηση του τίτλου, σε κλίμακα 1-5 (καθόλου - πολύ)

Στην ερώτηση με τίτλο «Αν αντιμετωπίσατε δυσκολίες, σε ποιους λόγους πιστεύετε ότι οφείλονταν αυτές; (Μπορείτε να σημειώσετε παραπάνω από μία απαντήσεις)», το 82% απέδωσε τις δυσκολίες σε έλλειψη χρόνου λόγω οικογενειακών/επαγγελματικών υποχρεώσεων, το 17% στο ότι το βασικό πτυχίο δεν σχετίζεται με τον σχεδιασμό και το 16% στο γεγονός ότι ο φοιτητής βρίσκεται μακριά από τον καθηγητή και τους συμφοιτητές του.

Η ύλη της Θεματικής Ενότητας ΠΣΠ61, πριν την παρακολουθήσετε, σας ήταν:

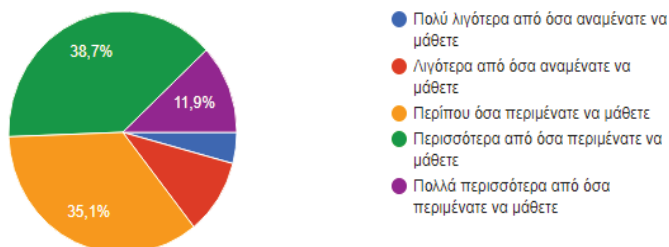
168 απαντήσεις



Εικόνα 4: Οι απαντήσεις στην ερώτηση του τίτλου

Σε γενικές γραμμές, αισθάνεστε ότι μετά την παρακολούθηση αυτής της Θεματικής ενότητας μάθατε:

168 απαντήσεις

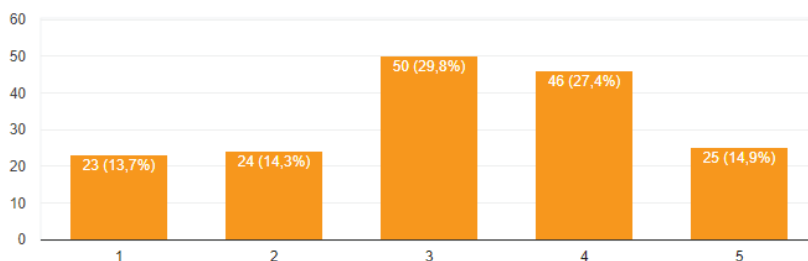


Εικόνα 5: Οι απαντήσεις στην ερώτηση του τίτλου

Στην ερώτηση με τίτλο «Αν υπάρχει κάποιο αντικείμενο που περιμένετε να διδαχθείτε και δεν διδαχθήκατε, ή πιστεύετε ότι δεν αναπτύχθηκε αρκετά, παρακαλούμε να το καταγράψετε», δόθηκαν 42 απαντήσεις, οι οποίες επικεντρώθηκαν στην εμβάθυνση σε κάποια ειδικά θέματα όπως υπολογιστικές μέθοδοι, υλικά, κατασκευαστικές λεπτομέρειες και νέες τεχνολογίες.

Στον επαγγελματικό τομέα, η παρακολούθηση της συγκεκριμένης Θεματικής ενότητας σας βοήθησε:

168 απαντήσεις

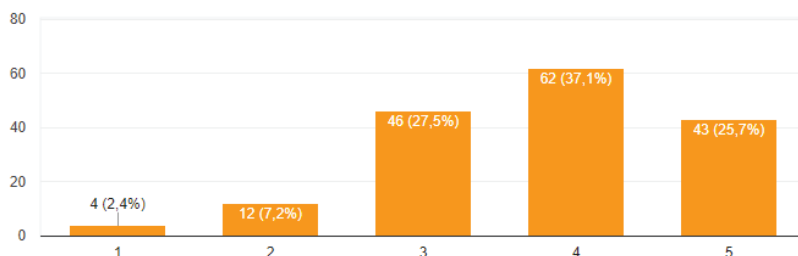


Εικόνα 6: Οι απαντήσεις στην ερώτηση του τίτλου, σε κλίμακα 1-5 (καθόλου - πολύ)

Στην ερώτηση με τίτλο «Εάν σας βοήθησε (από λίγο έως πολύ), μπορείτε να εξειδικεύσετε; (Μπορείτε να σημειώσετε παραπάνω από μία απαντήσεις)», το 75,2% απάντησε πως τους βοήθησε να βελτιωθούν στην ήδη υπάρχουσα δουλειά τους αναβαθμίζοντας τον τρόπο εργασίας σε αντικείμενο που ήδη είχαν (π.χ. λαμβάνοντας υπόψη και τον βιοκλιματικό παράγοντα κατά το σχεδιασμό κατοικιών που ήδη σχεδίαζαν). Ένα μικρό ποσοστό (10%) απάντησε πως τους βοήθησε να βελτιωθούν στην ήδη υπάρχουσα δουλειά τους αναλαμβάνοντας νέα αντικείμενα που δεν είχαν πριν, ενώ ένα ακόμα μικρότερο (3,9%) απάντησε πως τους βοήθησε να βρουν μια νέα δουλειά.

Σε προσωπικό επίπεδο, πιστεύετε ότι η παρακολούθηση της Θεματικής Ενότητας σας έχει επηρεάσει:

167 απαντήσεις

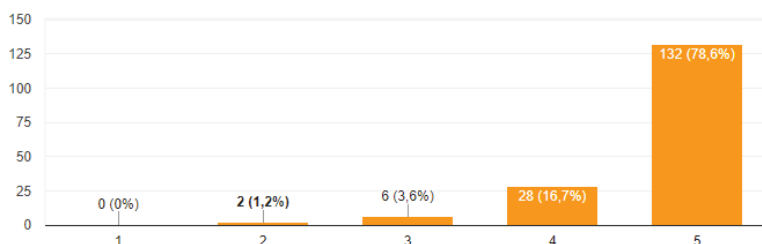


Εικόνα 7: Οι απαντήσεις στην ερώτηση του τίτλου, σε κλίμακα 1-5 (καθόλου - πολύ)

Στην ερώτηση με τίτλο «Αν σας έχει επηρεάσει (από ελάχιστα έως πολύ), μπορείτε να εξειδικεύσετε; (Μπορείτε να σημειώσετε παραπάνω από μία απαντήσεις)», ένα πολύ μεγάλο ποσοστό (89,4%) απάντησε πως τους βοήθησε να κατανοούν καλύτερα τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν το κτισμένο με το φυσικό περιβάλλον. Ένα επίσης σημαντικό ποσοστό (47,8%) απάντησε πως τους βοήθησε να γίνουν πιο συνειδητοποιημένοι χρήστες της κατοικίας τους/να προβούν σε μικρές/μεγάλες βιοκλιματικές επεμβάσεις που βελτίωσαν την ενεργειακή συμπεριφορά της.

Μετά από την εμπειρία παρακολούθησης της ενότητας, πιστεύετε ότι το αντικείμενο του βιοκλιματικού σχεδιασμού κτιρίων και περιβάλλοντα χώρου είναι επίκαιρο και κρίσιμο στη διαδικασία σχεδιασμού;

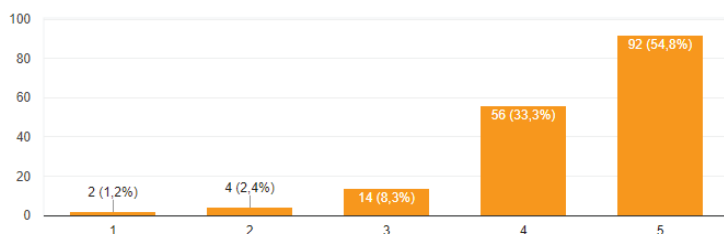
168 απαντήσεις



Εικόνα 8: Οι απαντήσεις στην ερώτηση του τίτλου, σε κλίμακα 1-5 (καθόλου - πολύ)

Συνήθως η εξ αποστάσεως εκπαίδευση ενηλίκων πραγματοποιείται σε μία φάση της ζωής των φοιτητών που αυτοί έχουν ήδη κάποια χρόνια επαγγελματικής εμπειρίας. Κατά πόσο πιστεύετε ότι η εμπειρία, η ωριμότητα και η κριτική σκέψη σας βοήθησαν στην παρακολούθηση του μεταπτυχιακού προγράμματος;

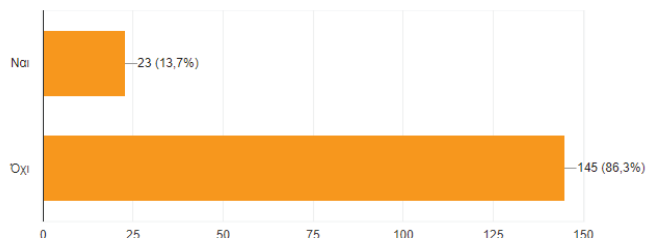
168 απαντήσεις



Εικόνα 9: Οι απαντήσεις στην ερώτηση του τίτλου, σε κλίμακα 1-5 (καθόλου - πολύ)

Θα ήταν εφικτό για εσάς, την ίδια χρονική περίοδο να παρακολουθήσετε ένα συμβατικό (όχι εξ αποστάσεως) μεταπτυχιακό πρόγραμμα αντί γι αυτό που παρακολουθήσατε;

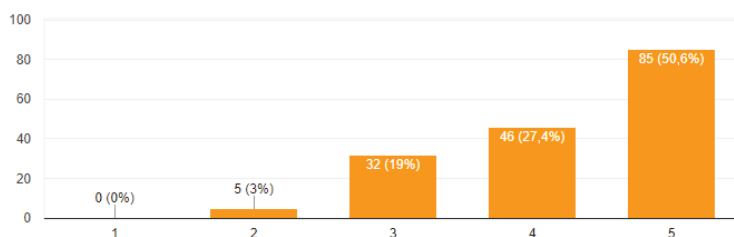
168 απαντήσεις



Εικόνα 10: Οι απαντήσεις στην ερώτηση του τίτλου, σε κλίμακα 1-5 (καθόλου - πολύ)

Πόσο σημαντική θεωρήσατε τη δυνατότητα συνδυασμού εργασίας και σπουδών κατά τη διάρκεια εκπόνησης του μεταπτυχιακού προγράμματος;

168 απαντήσεις

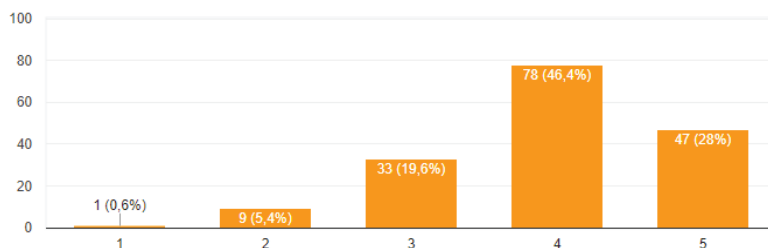


Εικόνα 11: Οι απαντήσεις στην ερώτηση του τίτλου, σε κλίμακα 1-5 (καθόλου - πολύ)

Στην ερώτηση αν θα ήταν εφικτό για τους φοιτητές την ίδια χρονική περίοδο να παρακολουθούν ένα συμβατικό μεταπτυχιακό πρόγραμμα, το 86,3% απάντησε ότι δεν θα μπορούσε να παρακολουθήσει ένα συμβατικό πρόγραμμα. Σημειώνεται επίσης ότι το 78% θεώρησε αρκετά έως πολύ σημαντική τη δυνατότητα να σπουδάζει και να εργάζεται ταυτόχρονα. Τα παραπάνω αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με έρευνα μέσω ερωτηματολογίων που αφορά σε φοιτητές του συνόλου των προγραμμάτων του ΕΑΠ [13], σύμφωνα με την οποία, για τους περισσότερους φοιτητές ήταν πιο εύκολο να διαχειριστούν τις σπουδές στο ΕΑΠ παρά στο συμβατικό πανεπιστήμιο, ενώ ένας σημαντικός αριθμός φοιτητών δηλώνει ότι οι σπουδές τους σε ένα εξ αποστάσεως εκπαιδευτικό ίδρυμα, όπως το ΕΑΠ, είναι προτιμητέες σε σύγκριση με τις σπουδές σε ένα συμβατικό πανεπιστήμιο.

Μετά από την εμπειρία παρακολούθησης της ενότητας, πόσο ικανοποιητικά πιστεύετε ότι μπορεί να διδαχθεί το αντικείμενο του βιοκλιματικού σχεδιασμού με τη διαδικασία της εξ αποστάσεως εκπαίδευσης (συγκριτικά με την κλασσική μορφή εκπαίδευσης);

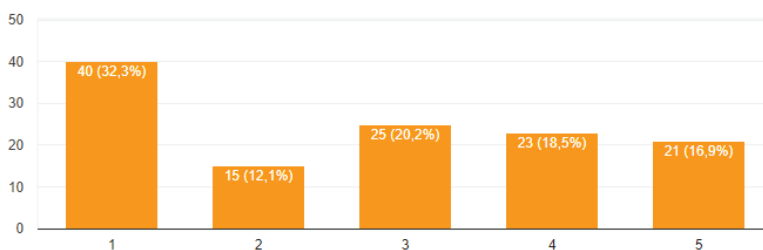
168 απαντήσεις



Εικόνα 12: Οι απαντήσεις στην ερώτηση του τίτλου, σε κλίμακα 1-5 (καθόλου - πολύ)

Αν παρακολουθήσατε την ενότητα μετά το έτος 2010, πιστεύετε ότι η οικονομική κρίση στην Ελλάδα επηρέασε με κάποιο τρόπο την απόδοσή σας και τη συμμετοχή σας στην ενότητα;

124 απαντήσεις



Εικόνα 13: Οι απαντήσεις στην ερώτηση του τίτλου, σε κλίμακα 1-5 (καθόλου - πολύ)

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Είναι γνωστό ότι η συνεχιζόμενη εκπαίδευση είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες στην ατομική ανάπτυξη αλλά και σε αυτή ολόκληρης της κοινωνίας. Είναι επίσης προφανές ότι η εκπαίδευση οδηγεί σε καλύτερες επαγγελματικές ευκαιρίες και άρα βοηθά στην οικονομική και συναισθηματική σταθερότητα και ανάπτυξη του ανθρώπου [15]. Στη σημερινή ιδιαίτερα ανταγωνιστική

επαγγελματική κοινότητα σε συνθήκες οικονομικής κρίσης, η διαρκής μας ενημέρωση για νέες εξελίξεις και η αύξηση/αναβάθμιση των γνώσεών μας μπορεί να γίνει κατά κύριο λόγο με την εξ αποστάσεως εκπαίδευση καθώς είναι ανέφικτο να απέχουμε από την εργασία μας, όταν αυτή είναι συνήθως η μοναδική πηγή εσόδων. Παράλληλα, οι κοινωνικές και τεχνολογικές τάσεις και εξελίξεις, έχουν επηρεάσει σημαντικά και την εκπαίδευση, καθιστώντας εξαιρετικά σημαντικές τις διάφορες μορφές ανοικτής και εξ αποστάσεως εκπαίδευσης.

Αναλύοντας τα γραφήματα που προέκυψαν από το ερωτηματολόγιο, προκύπτουν ιδιαίτερα σημαντικά συμπεράσματα που αναδεικνύουν τη σημασία του μεταπτυχιακού αυτού προγράμματος. Ως γενική εντύπωση, το 86,3% έχει θετική άποψη για την ΠΣΠ61. Το μεγαλύτερο πρόβλημα όμως που αντιμετώπισε το 82% των ερωτηθέντων ήταν η έλλειψη χρόνου λόγω οικονομικών και επαγγελματικών υποχρεώσεων. Ένα σημαντικό ποσοστό (36,9%) σημείωσε ότι αυτά που έμαθε του ήταν ελάχιστα γνώριμα και αντίστοιχα το 38,7% αναφέρει ότι έμαθε περισσότερα από όσα περίμενε. Το 35,1% έμαθε περίπου όσα περίμενε ότι θα μάθει. Επομένως αθροιστικά το 73,8% σημειώνει ότι η παρακολούθηση της ΠΣΠ61 αύξησε τις γνώσεις τους.

Το 75,2% ανέφερε ότι τους βοήθησε να βελτιωθούν στην υπάρχουσα δουλειά τους και το 57,2% ανέφερε ότι η ΠΣΠ61 τους βοήθησε στην εργασία τους. Επιπρόσθετα το 62,8% επηρεάστηκε και σε προσωπικό επίπεδο καθώς οι αντίστοιχοι ερωτηθέντες κατανόησαν καλύτερα πώς να αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον και έτσι να είναι πιο συνειδητοποιημένοι χρήστες των ενεργειακών κτιριακών συστημάτων που συναντούν στην καθημερινότητά τους.

Ακολουθώντας το παγκόσμιο ενδιαφέρον όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας, οι συμμετέχοντες σε ποσοστό 78,6% θεώρησαν το αντικείμενο του βιοκλιματικού σχεδιασμού πολύ επίκαιρο και κρίσιμο. Είναι ιδιαίτερα ενθαρρυντικό το γεγονός ότι το 88% θεωρεί ότι η επαγγελματική εμπειρία και η ωριμότητά του, βοηθήθηκε αρκετά έως πολύ από την παρακολούθηση του μεταπτυχιακού προγράμματος, καθώς το 86,3% δεν θα μπορούσε να παρακολουθήσει ένα συμβατικό πρόγραμμα. Συνηγορεί σε αυτό και το γεγονός ότι το 78% θεώρησε αρκετά έως πολύ σημαντική τη δυνατότητα να σπουδάξει και να εργάζεται ταυτόχρονα.

Τέλος η εξ αποστάσεως διδασκαλία του βιοκλιματικού σχεδιασμού ήταν αρκετά έως πολύ ικανοποιητική για τους συμμετέχοντες σε ποσοστό 74,4% αν και η οικονομική κρίση επηρέασε λίγο έως πολύ την απόδοση και συμμετοχή τους (55,6%).

Αν θέλαμε να συνοψίσουμε τα οφέλη της εξ αποστάσεως εκπαίδευσης στον περιβαλλοντικό σχεδιασμό θα σημειώναμε τα κάτωθι [15]:

- Δίνεται η δυνατότητα στους φοιτητές, που τυγχάνουν στο μεγαλύτερο ποσοστό τους εργαζόμενοι, να συνεχίσουν να δουλεύουν και ταυτόχρονα να αφιερώνουν χρόνο στη συνεχή βελτίωση των γνώσεών τους. Με αυτό τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα σε αυτούς που το επιθυμούν να αποκτούν εξειδίκευση στον περιβαλλοντικό σχεδιασμό και άρα κατάρτιση σε φλέγοντα ζητήματα όπως αυτό της εξοικονόμησης ενέργειας στον κτιριακό τομέα.
- Η πολυπλοκότητα των οικογενειακών και επαγγελματικών υποχρεώσεων σε συνδυασμό με τον τόπο διαμονής και εργασίας δεν θα επέτρεπε σε αυτούς τους επιστήμονες να σπουδάσουν σε συμβατικό πανεπιστήμιο. Η ευέλικτη εκπαίδευση που προσφέρει η εξ αποστάσεως εκπαίδευση είναι ίσως μονόδρομος για την αναβάθμιση και συνεχιζόμενη κατάρτιση του επιστημονικού δυναμικού κάθε χώρας.
- Η ηλεκτρονική επικοινωνία επιτρέπει την διασύνδεση ατόμων σε διαφορετικά μέρη, τόσο εντός των τειχών της χώρας μας αλλά τελικά και σε όλο τον κόσμο. Η ψηφιακή εκπαίδευση είναι ο σύγχρονος τρόπος εκπαίδευσης και δίνει τη δυνατότητα και σε μεγαλύτερης ηλικίας άτομα να ανακαλύψουν μια ανεξάντλητη τράπεζα δεδομένων.
- Αυτού του είδους η εκπαίδευση έχει ένα πρόσθετο όφελος: διδάσκει τους συμμετέχοντες την ορθή διαχείριση του χρόνου τους, το οποίο αποτελεί ένα εξαιρετικά σημαντικό εργαλείο για κάθε άνθρωπο. Καλείται ο φοιτητής να διαχειριστεί τον λίγο ελεύθερο χρόνο του προκειμένου να συνδυάσει επαγγελματικές, οικογενειακές αλλά και φοιτητικές υποχρεώσεις.

Όσον αφορά στα σημεία που θα μπορούσαν να βελτιωθούν, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες του αντικείμενου αλλά και τις απόψεις των ερωτηθέντων, τονίζεται η σημασία της συχνής επικαιροποίησης του εκπαιδευτικού υλικού, ώστε η γνώση που παρέχεται να παρακολουθεί τις εξελίξεις της επιστήμης και την εμπειρία της σύγχρονης πρακτικής. Επιπλέον, για την περαιτέρω αναβάθμιση των σπουδών, προτείνεται η εμβάθυνση σε θέματα όπως η εφαρμογή νέων υλικών και τεχνολογιών, η δυνατότητα εφαρμογής διαθέσιμων πειραματικών και υπολογιστικών μεθόδων και

χρήσης σχετικών εργαλείων. Ακόμα, κρίνεται σκόπιμο το Ανοικτό Πανεπιστήμιο να διατηρεί τους δεσμούς του με τους φοιτητές μετά την αποφοίτησή τους μέσω ποικίλων δομών και δράσεων, ώστε να ενισχύεται η διασύνδεση των αποφοίτων μεταξύ τους και με την πανεπιστημιακή κοινότητα και να παρέχεται διαρκής στήριξη και ανάπτυξη αναφορικά με θέματα ακαδημαϊκά, επιστημονικά κλπ.

Η δυνατότητα που δίνεται στη χώρας μας για εξ αποστάσεως εκπαίδευση έχει τεράστια σημασία και αυτό φαίνεται και από τα θετικά, κατά συντριπτική πλειοψηφία, σχόλια των ερωτηθέντων. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να συνεχίσουν να παρέχονται υψηλής ποιότητας μεταπτυχιακά προγράμματα από καταρτισμένους επιστήμονες με συνάφεια στο αντικείμενο, προκειμένου να προκύψει μια σημαντική αριθμητικά ομάδα επιστημόνων με σύγχρονες γνώσεις πάνω στο παγκόσμιας εμβέλειας θέμα της βιοκλιματικής αρχιτεκτονικής.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Λιοναράκης, Α., 2005, «Ανοικτή και εξ Αποστάσεως Εκπαίδευση και Θεωρίες Μάθησης» στο Α. Λιοναράκης (επιμ.) Παιδαγωγικές και Τεχνολογικές Εφαρμογές, Εκδόσεις Ε.Α.Π., σελ. 13-18.
- [2] Λιοναράκης, Α. και Λυκουργιώτης Α., 1999, «Ανοικτή και Παραδοσιακή Εκπαίδευση» στο Βεργίδης Δ., Λιοναράκης Α., Λυκουργιώτης Α., Μακράκης Β., Μαρταλής Χ., Ανοικτή και εξ Αποστάσεως Εκπαίδευση - Θεσμοί και Λειτουργίες. Τόμος Α' ΕΑΠ, Πάτρα.
- [3] Keegan, D., 2000, Οι βασικές αρχές της Ανοικτής και Εξ Αποστάσεως Εκπαίδευσης, μετάφραση: Αλ. Μελάστη, εκδόσεις Μεταίχμιο, Αθήνα.
- [4] Mas-Garcia X. 2016, *Future Scenarios for Digital Learners: Sociotechnological and sociocultural trends will transform the current educational ecosystem*. The Online, Open and Flexible Higher Education Conference. EADTU, Rome.pp.45-60.
- [5] Suhonen S., 2016, *Students' experiences of different types of (distance) learning*. The Online, Open and Flexible Higher Education Conference. EADTU, Rome, pp.380-389.
- [6] Banday M.T., Ahmed M., Jan T.R., 2014, "Applications of E-Learning in engineering education: A case study", *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 123, pp. 406-413.
- [7] Trivyzadakis, N., 2015, "Teaching an Applied Art through Distance Learning: The case of Lighting Design", *Proc. 8th International Conference in Open & Distance Learning*, November 2015, Athens, Greece, pp. 22-26.
- [8] Mezzalama M., Venuto E., 2016, *Massive on-line learning: moving from web to mobile*. The Online, Open and Flexible Higher Education Conference. EADTU, Rome.pp.749-766.
- [9] Conti L., 2016, *Beyond remote and virtual labs: mobile laboratories for physics and engineering in e-learning and traditional teaching*. The Online, Open and Flexible Higher Education Conference. EADTU, Rome.pp.857-868.
- [10] Kagklis V, Lionarakis A, Stavropoulos E, Verykios V., 2016, *A Learning Analytics Methodology for Student Performance Assessment in a Distance and Open Education Environment*. The Online, Open and Flexible Higher Education Conference. EADTU, Rome.pp.735-748.
- [11] Σπανακά Α., Θεοδοσίου Α., 2013, *Χαρακτηριστικά Επιτυχίας Εκπαιδευομένων στην εξ αποστάσεως εκπαίδευση: Πρόταση πρακτικής εφαρμογής στο Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο (ΕΑΠ)*. *Proc. 8th International Conference in Open & Distance Learning*, November 2015, Athens, Greece, pp. 70-77.
- [12] González-Brignardello M. P, Sánchez A-Elvira Paniagua, 2016, *Prevention of student dropout in higher distance education: Positive Technology*. The Online, Open and Flexible Higher Education Conference. EADTU, Rome, pp.843- 856.
- [13] Ιωακειμίδου Β., Λιοναράκης Α., 2015, *Διερεύνηση της μαθησιακής εμπειρίας των φοιτητών: μελέτη περίπτωσης στο Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο*. *Proc. 8th International Conference in Open & Distance Learning*, November 2015, Athens, Greece, pp. 225-241.
- [14] https://www.google.com/intl/el_gr/forms/about/ (τελευταία πρόσβαση: 12-10-2017).
- [15] Lungu, M., 2016, "Top 5 advantages of online education", [www.distance learning portal.com](http://www.distancelearningportal.com), τελευταία πρόσβαση: 15/10/2017.