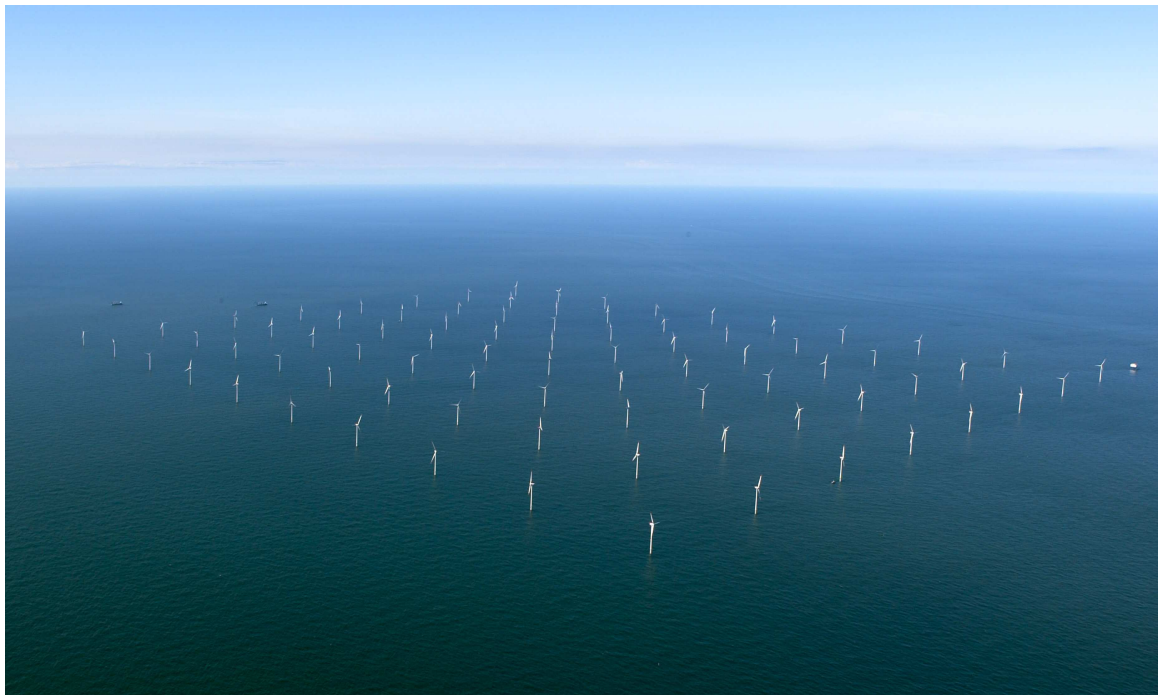




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΕ  
«ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ»**

**Μεταπτυχιακή Εργασία:**

«Εκτίμηση αιολικού δυναμικού στον Ελληνικό Θαλάσσιο χώρο και  
προτάσεις για Υπεράκτια Αιολικά πάρκα»



**Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Δημήτριος Φυτίλης**

**Επιβλέπων καθηγητής: Δρ. Τ. Σουκισιάν**

**Τριμελής Επιτροπή: Τ. Σουκισιάν, Σ. Μαυράκος, Χ. Αναγνώστου**

Αθήνα, Φεβρουάριος 2012

## Περιεχόμενα

### 1. Εισαγωγή

Σκοπός εργασίας

### 2. Ιστορική επισκόπηση – Χρήση αιολικής ενέργειας

### 3. Τύποι υπεράκτιων ανεμογεννητριών

3.1. Κατασκευές έδρασης σε ρηχό νερό

i) Βάσης Βαρύτητας (Gravity base)

ii) Μονού πυλώνα (Monopile)

iii) Τρίποδα (Tripod)

3.2. Κατασκευές έδρασης σε ενδιάμεσο νερό

3.3. Πλωτές δομές έδρασης σε βαθύ νερό

i) Spar buoys (Hywind Demo)

ii) Semi submersible (WindFloat)

3.4. Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα

### 4. Θεωρητική εκτίμηση αιολικού δυναμικού

4.1. Θεωρητική εκτίμηση αιολικής ενέργειας

4.2. Επίδραση της κατανομής Weibull

### 5. Μεθοδολογία και Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν

5.1. Μέθοδος εκτίμησης μέσου αιολικού δυναμικού

5.2. Μετεωρολογικά δεδομένα

Ανεμολογικά δεδομένα

5.3. Ανάλυση ανεμολογικών δεδομένων

5.4. Σύγκριση ‘μοντέλου’ – ‘επιτόπιες μετρήσεις’

### 6. Εκτίμηση αιολικού δυναμικού στον Ελληνικό θαλάσσιο χώρο

Σύγκριση αποτελεσμάτων ‘επιτόπιων μετρήσεων’ – ‘μοντέλου’

## **7. Προβλήματα που σχετίζονται με την λειτουργία αιολικών πάρκων στην Ελλάδα**

7.1. Προβλήματα θορύβου των ανεμογεννητριών

7.2. Αισθητικά προβλήματα και προσβολή του φυσικού τοπίου

7.3. Επιπτώσεις των ανεμογεννητριών στον πληθυσμό των πουλιών

7.4. Πιθανά προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών

7.5. Πιθανές περιβαλλοντικές επιδράσεις των θαλάσσιων αιολικών πάρκων

## **8. Συμπεράσματα και Προτάσεις**

## **9. Βιβλιογραφία**

## Περίληψη

Στην παρούσα εργασία, γίνεται μια πρώτη προσπάθεια για λεπτομερή αξιολόγηση του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού των ελληνικών θαλασσών, με βάση επιτόπιες μετρήσεις ανέμου. Τα ανεμολογικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται στη μελέτη είναι υπό τη μορφή μετρήσεων μακροχρόνιων χρονοσειρών της ταχύτητας ανέμου, κατεύθυνσης ανέμου και ριπής ανέμου, καλύπτοντας μια περίοδο που κυμαίνεται από 5 έως 12 ετών (1999-2011). Τα δεδομένα αποκτήθηκαν μέσω του δικτύου παρακολούθησης ΠΟΣΕΙΔΩΝ. Το δίκτυο αποτελείται από 10 πλωτούς μετρητικούς σταθμούς (buoys), καταγράφοντας συνεχώς διάφορες μετεωρολογικές παραμέτρους όπως ταχύτητα ανέμου, κατεύθυνση, ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία του αέρα. Ειδικότερα, οι μετρήσεις έχουν αποκτηθεί από 5 πλωτούς μετρητικούς σταθμούς του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ, οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στις περιοχές βαθέων υδάτων: Άθως, Μύκονος, ΕΙΜ3Α, Πύλος και Ζάκυνθος. Για τις επιλεγμένες περιοχές μελέτης, οι μετρήσεις των ανεμολογικών δεδομένων συγκρίθηκαν με αποτελέσματα που προέρχονται από αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης.

Το κεφάλαιο 1 περιλαμβάνει μια εισαγωγική αναφορά για τις συμβατικές (ΣΠΕ) και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) αντίστοιχα, καθώς και τα ποσοστά κάλυψης των ευρωπαϊκών ενεργειακών αναγκών από αυτά. Στη συνέχεια, από τις ΑΠΕ γίνεται αναφορά για την αιολική ενέργεια και την χρήση της παγκόσμια, αλλά και ειδικότερα στην Ελλάδα. Ακόμη, αναφέρονται οι λόγοι επιλογής της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας (έναντι της χερσαίας), τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της, καθώς και η πρώτη προκαταρκτική χωροθέτηση θαλάσσιων αιολικών πάρκων στην Ελλάδα.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται ιστορική επισκόπηση και περιγράφεται η χρήση της αιολικής ενέργειας στο πέρασμα των αιώνων. Δηλαδή, παρουσιάζεται μια αναδρομή από την πρώτη ιδέα χρησιμοποίησης του ανέμου για παραγωγή ενέργειας, μέχρι και σήμερα με την χρήση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι τύποι των υπεράκτιων ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται ήδη ή θα χρησιμοποιηθούν στο άμεσο μέλλον από την βιομηχανία για ρηχό, ενδιάμεσο και βαθύ νερό, καθώς επίσης, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών.

Στο κεφάλαιο 4 εξετάζονται βασικές σχέσεις της φυσικής που έχουν σχέση με την ενέργεια και την ισχύ του ανέμου. Γίνεται υπολογισμός, της θεωρητικής αιολικής ενέργειας (χωρίς την εξέταση του μετατροπέα) και του ποσοστού της αιολικής ενέργειας που μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ. Τέλος, αναφέρεται η επίδραση της κατανομής Weibull στη ταχύτητα του ανέμου.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, αλλά και η ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τις επιλεγμένες περιοχές μελέτης του ελληνικού θαλάσσιου χώρου.

Στο κεφάλαιο 7 παρατίθενται τα πιθανά προβλήματα που μπορούν να προκύψουν από την εγκατάσταση και λειτουργία των ανεμογεννητριών των αιολικών πάρκων (χερσαία και θαλάσσια) γενικά, αλλά και στην Ελλάδα. Επίσης, στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου καταγράφονται οι πιθανές αλληλεπιδράσεις μεταξύ περιβάλλοντος και θαλάσσιων αιολικών πάρκων.

Τέλος, στα κεφάλαια 6 και 8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα/προτάσεις αντίστοιχα, όπως προέκυψαν στην παρούσα εργασία από την εκτίμηση του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο.

## **Abstract**

In this work, a first attempt for a detailed assessment of the offshore wind potential of the Greek seas, based on in-situ wind measurements has been made. The wind data used in this study are long time series of measured wind speed, wind direction and wind gust, covering a period ranging from 5 to 12 years (1999-2011). The data were collected by the meteorological instruments onboard the observation buoys of the POSEIDON Marine Monitoring Network (MMN). This network comprises of 10 observation buoys, continuously recording various meteorological parameters such as wind speed, direction, atmospheric pressure and air temperature. Specifically, we used measurements obtained from 5 buoys of the POSEIDON MMN, located at 5 deep water locations: Athos, Mykonos, E1M3A, Pylos and Zakynthos.

Chapter 1 provides a review on conventional (CES) and renewable energy sources (RES), as well as coverage percentage of European energy needs from them. Following, an analysis of RES in the form of wind energy and its global use is being made, with a focus in the Greek reality. Herein, the reasoning for choosing offshore wind energy (as opposed to onshore) is presented, as well as the advantages and disadvantages as they have become clear from the first preliminary settlement of offshore wind farms in Greece.

In Chapter 2, an effort for a historical review and a description of the wind energy use over the centuries has been made. Chapter 3 describes the types of offshore wind turbines that are already being used or will be used in the near future by the industry in shallow, transitional and deep waters, as well as their advantages and disadvantages.

In Chapter 4, the basic equations of physics related to energy and wind power are presented. Based on the equations of the kinetic energy and mass conservation, the theoretical calculation of wind power takes place (without considering the converter). The proportion of wind energy that is converted into mechanical power is calculated. Finally, the influence of Weibull distribution in wind speed is also presented.

Chapter 5 presents the methodology to be followed and the analysis of the data collected from specific locations of the Greek seas.

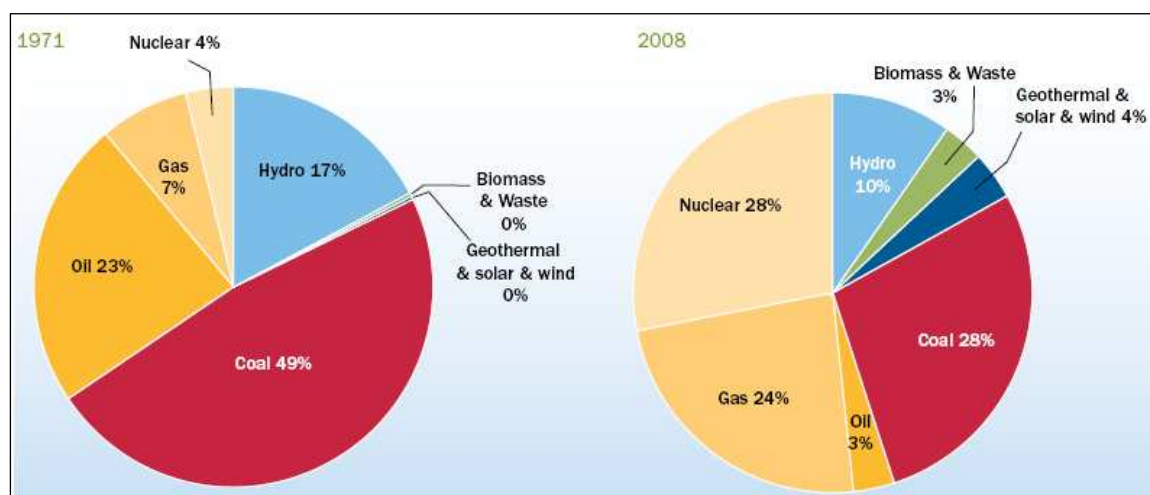
Chapter 7 presents the possible impacts that may arise from the installation and operation of wind farms (onshore and offshore) in general, and in Greece specifically. Moreover, the last section of this chapter describes the possible interactions between the environment and the offshore wind farms.

Finally, in chapters 6 and 8 the results and conclusions as derived from this work are presented.

## 1. Εισαγωγή

Ο άνθρωπος για να καλύψει τις ενεργειακές του ανάγκες εκμεταλλεύεται το φυσικό περιβάλλον χρησιμοποιώντας δύο πηγές ενέργειας, τις συμβατικές και τις ανανεώσιμες αντίστοιχα. Οι συμβατικές (μη ανανεώσιμες) πηγές ενέργειας (Σ.Π.Ε.) όπως είναι το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, οι γαιάνθρακες και τα πυρηνικά καύσιμα θεωρείται πως εξαντλούνται με την πάροδο του χρόνου (Κτενιαδάκης, 1999). Ενώ οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.) ή εναλλακτικές μορφές ενέργειας όπως ο άνεμος, ο ήλιος, η βιομάζα, οι υδατοπτώσεις, η γεωθερμία και η θαλάσσια κίνηση (ρεύμα, κύμα, παλίρροια) χαρακτηρίζονται από διαχρονική ανανέωση και απεριόριστη διαθεσιμότητα (Μαμάσης, 2010).

Η Ευρωπαϊκή ενεργειακή απαίτηση που ικανοποιείται από ποικίλες πηγές άλλαξε δραματικά τα τελευταία 40 χρόνια, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1 (Sathyajith, 2006). Το 2008 τα φυσικά καύσιμα που αποτελούνται από τον άνθρακα, το πετρέλαιο, και το φυσικό αέριο ικανοποιούν περίπου 55% των αναγκών. Το μερίδιο της πυρηνικής ενέργειας είναι περίπου 28%. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρέχουν 17% στο οποίο η παραδοσιακή βιομάζα και τα μεγάλα υδροηλεκτρικά συμβάλλουν το σημαντικότερο μερίδιο. Αυτή τη στιγμή, το μερίδιο των νέων ανανεώσιμων πηγών ενεργειών (άνεμος, ήλιος, γεωθερμία κλπ.) είναι μόνο 4% (EWEA, 2011).



**Εικόνα 1.** Εξελισσόμενη σύνθεση ενεργειακών πηγών της ΕΕ (% κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας) (EWEA, 2011).

Σύμφωνα με τα παραπάνω ποσοστά, η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις συμβατικές πηγές ενέργειας οι οποίες θα

εξαντληθούν εντελώς στο άμεσο μέλλον (Freris and Infield, 2008). Επομένως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα προτιμηθούν ως εναλλακτικές λύσεις για την παραγωγή ενέργειας, κυρίως λόγω της απεριόριστης διαθεσιμότητας τους, αλλά και την συμβολή τους στην ελάττωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης (Burton et al, 2001).

Η Λευκή Βίβλος της Ευρωπαϊκής Επιτροπής του 1997 έθεσε το στόχο να αυξηθεί το μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από ΑΠΕ από 14% το 1997 σε 22% το 2010. Με διεύρυνση, ο συνολικός στόχος της ΕΕ είχε προσαρμοστεί στο 21% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας (EWEA, 2011). Προσωρινά στοιχεία της Eurostat για το 2009 δείχνουν ότι ήδη το 2009 περίπου 19,9% (608 TWh) της Ευρωπαϊκής συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας (3.042 TWh) προήλθε από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η υδροηλεκτρική ενέργεια συμβάλλει με το μεγαλύτερο μερίδιο (11,6%), ακολουθεί ο άνεμος (4,2%), η βιομάζα (3,5%) και η ηλιακή (0,4%). Φαίνεται να υπάρχει μια αύξηση σε σχέση με το 2008, όταν η παραγωγή ηλεκτρισμού από ΑΠΕ κάλυπτε το 16,6% (558 TWh) της συνολικής ηλεκτρικής κατανάλωσης, των 3.357 TWh (EWEA, 2011).

Για την Ελλάδα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Αιολικής Ενέργειας (EWEA) έχει θέσει ως στόχο την αύξηση της χρήσης των ΑΠΕ από το 6,9% (2005) στο 18% το 2020. Σχεδόν το 40% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας προβλέπεται ότι θα πρέπει να προέρχεται από ΑΠΕ το 2020. Η χερσαία και η υπεράκτια αιολική ενέργεια θα πρέπει να αποτελεί τη μερίδα του λέοντος της αγοράς ανανεώσιμης ενέργειας και προβλέπεται ότι θα καλύψει 24,5% της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας το 2020. Για να επιτευχθεί αυτό, το σχέδιο δράσης είναι να φτάσουν τα 7,5 GW της συνολικής εγκατεστημένης αιολικής ισχύος, εκ των οποίων 300 MW από υπεράκτιες εγκαταστάσεις, μέχρι το 2020. Η καθαρά ετήσια αύξηση του δυναμικού της αιολικής ενέργειας αναμένεται να είναι σταθερά περίπου 600 MW. Η υπεράκτια ανάπτυξη δεν αναμένεται να ξεκινήσει πριν από το 2016 και προβλέπεται ότι θα αυξάνεται σταθερά κατά 50 MW το χρόνο. Το 2020, οι υπεράκτιες κατασκευές αναμένεται να την αυξήσουν στα 100 MW (EWEA, 2011).

Αιολική ενέργεια είναι η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου. Ο άνεμος προκαλείται από τις κινήσεις των αέριων μαζών, λόγω της διαφοράς πίεσης και θερμοκρασίας που δημιουργούνται στην ατμόσφαιρα από την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία (Φλόκας, 1997). Έτσι, στον ισημερινό η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει κάθετα, ενώ στους πόλους υπό γωνία. Αυτό σε συνδυασμό με την περιστροφική κίνηση της γης, έχει ως αποτέλεσμα οι θερμότερες

αέριες μάζες (μικρής πυκνότητας) να κινούνται ανοδικά και την θέση τους καταλαμβάνουν οι ψυχρότερες αέριες μάζες (πυκνότερες), δημιουργώντας έτσι την κυκλοφορία των ανέμων γύρω από την γη ([www.aquaret.com](http://www.aquaret.com)).

Σε χάρτη της παγκόσμιας μετεωρολογικής οργάνωσης έχει υπολογιστεί σε ύψος 10 m από το έδαφος, ότι επικρατούν άνεμοι με μέση ετήσια ταχύτητα πάνω από 5.1 m/s, στο 25 % της επιφάνειας γης. Σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα, το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής θεωρείται εκμεταλλεύσιμο ενεργειακά, όταν η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου ξεπερνά την τιμή των 5.1m/s. Όμως όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου τόσο περισσότερη είναι η παρεχόμενη (διαθέσιμη) ενέργεια, καθώς η ισχύς είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητας του ανέμου (βλέπε κεφάλαιο 4). Επομένως είναι σημαντικό να γνωρίζουμε με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια γίνεται το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής, έτσι ώστε με τον κατάλληλο και ορθό σχεδιασμό του αιολικού πάρκου να γίνεται η βέλτιστη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας.

Η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου (αιολική ενέργεια) σε ηλεκτρική ενέργεια, γίνεται μέσω των ανεμογεννητριών. Η Ελλάδα διαθέτει αρκετές περιοχές με πλούσιο αιολικό δυναμικό (όπως είναι τα νησιά, παράκτιες περιοχές και ορισμένα οροπέδια) για εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας (Καζαντζίδης, 2009). Συγκεκριμένα η παραγόμενη ισχύς από τα χερσαία αιολικά πάρκα το έτος 1997 ήταν 28 MW, ενώ το έτος 2006 έφθασε τα 746 MW (Κωλέτσης, 2007).

Στη σημερινή εποχή, οι κύριοι λόγοι που έχουν οδηγήσει στην ανάγκη για δημιουργία θαλάσσιων αιολικών πάρκων είναι: η έλλειψη θέσεων στην ξηρά, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και περισσότερη διαθέσιμη ενέργεια από την θάλασσα (Esteban et al., 2010). Οι ταχύτητες των ανέμων πάνω από την ανοικτή θάλασσα είναι μεγαλύτερες σε σχέση με της ξηράς. Αυτό συμβαίνει διότι ο άνεμος πνέοντας στη θάλασσα, δεν συναντά εμπόδια και το μόνο μέρος ενέργειας που χάνει είναι λόγω της τριβής με την επιφάνεια της θάλασσας (όπου και δημιουργούνται τα κύματα). Σε αντίθεση, πάνω στην ξηρά συναντά διαρκώς εμπόδια όπως για παράδειγμα βουνά, δάση, κ.λ.π. Επομένως όσο απομακρύνεται από την ακτή και όσο αυξάνεται το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας, τόσο αυξάνει και η ένταση του ανέμου.

Στο παρελθόν ενισχύθηκε η εγκατάσταση χερσαίων αιολικών πάρκων (Χ.Α.Π.), σε σχέση με την κατασκευή θαλάσσιων αιολικών πάρκων (Θ.Α.Π.), λόγω διάφορων παραγόντων όπως η υποδομή, η τοποθέτηση, η ηλεκτρική σύνδεση και η χρήση ανθεκτικών υλικών από τη θάλασσα διάβρωση. Αυτοί οι παράγοντες ήταν περιοριστικοί για την υπεράκτια χρήση ανεμογεννητριών, κυρίως λόγω της



μεγαλύτερης ταχύτητας των υπεράκτιων ανέμων σε σχέση με τους ανέμους της ξηράς. Σήμερα όμως, η αύξηση του μεγέθους και της αποδοτικότητας των ανεμογεννητριών καθώς και της εμπειρίας στον τομέα αυτό, έχουν κάνει εφικτή την δημιουργία θαλάσσιων αιολικών πάρκων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απόκτηση μεγάλου δυναμικού, από την αξιοποίηση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας ([www.aquaret.com](http://www.aquaret.com)).

Αν και τα χερσαία αιολικά πάρκα έχουν εδραιωθεί στις ευρωπαϊκές χώρες της Μεσογείου, αναμένεται στα επόμενα χρόνια ότι τα υπεράκτια αιολικά πάρκα θα αυξηθούν σημαντικά. Τα πλεονεκτήματα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είναι τα ακόλουθα (Jonkman, 2007; Henderson et al., 2003; Musial and Butterfield, 2004):

- Ο άνεμος τείνει να πνέει με περισσότερη ένταση λόγω της μειωμένης τύρβης και της μικρότερης διάτμησης στη θάλασσα απ' ό,τι στη ξηρά.
- Το μέγεθος μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας δεν περιορίζεται λόγω της παρουσίας υλικοτεχνικών υποδομών στην ξηρά (π.χ., οδικά ή σιδηροδρομικά δίκτυα).
- Οι οπτικές ενοχλήσεις και ο θόρυβος των ανεμογεννητριών μπορεί να αποφευχθεί εάν οι ανεμογεννήτριες εγκατασταθούν σε επαρκή απόσταση από την ακτή.
- Απέραντες εκτάσεις συνεχούς ανοιχτής θάλασσας είναι διαθέσιμες και οι εγκαταστάσεις δεν καταλαμβάνουν γη, παρεμβαίνοντας στις άλλες χρήσεις της.

Αυτά τα πλεονεκτήματα αντισταθμίζονται με τα ακόλουθα μειονεκτήματα που προκύπτουν από τη τοποθέτηση ανεμογεννητριών υπεράκτια (Jonkman, 2007; Henderson et al., 2003; Musial and Butterfield, 2004):

- Απαιτείται υψηλότερο επενδυτικό κεφάλαιο για τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες, λόγω του κόστους που συνδέεται με την εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας στη θάλασσα και την πρόσθετη περιπλοκότητα έδρασης/θεμελίωσης, υποστηρικτικής κατασκευής, εγκατάστασης και παροπλισμού.
- Οι υπεράκτιες εγκαταστάσεις είναι λιγότερο προσβάσιμες από τις χερσαίες εγκαταστάσεις, γεγονός που αυξάνει τις εργασίες και τις δαπάνες συντήρησης και αυξάνει ενδεχομένως το χρόνο διακοπής των μηχανών.

- Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες δεν δέχονται περιβαλλοντική φόρτιση μόνο από τον άνεμο, επομένως, πρέπει επίσης να αντέχουν και σε άλλες συνθήκες φόρτισης, όπως η υδροδυναμική φόρτιση από τα κύματα και τα θαλάσσια ρεύματα.

Στην Ελλάδα μετά την ψήφιση του νόμου 3851/2010 για τις ΑΠΕ, τον Ιούλιο του 2010 ξεκίνησε η διαδικασία προκαταρκτικής χωροθέτησης θαλάσσιων αιολικών πάρκων. Οι περιοχές που επιλέχθηκαν αρχικά στον Ελληνικό θαλάσσιο χώρο (Εικόνα 2) κατά την 1<sup>η</sup> φάση του προγράμματος των ΘΑΠ, πρόκειται να αναπτυχθούν την περίοδο 2012 έως 2017. Ο προσδιορισμός των περιοχών στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί αφού εφαρμοστεί η Στρατηγική Περιβαλλοντική Εκτίμηση (Σ.Π.Ε), σύμφωνα με την οποία θα προκύψουν τα τελικά πολύγωνα, τα εμβαδά και η μέγιστη ισχύς που θα επιτρέπεται να εγκατασταθεί σε αυτά. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι τέσσερεις από τις δώδεκα περιοχές (Πίνακας 1) της προκαταρκτικής χωροθέτησης (Αη Στράτης, Κάρπαθος, Κρουνέρι και Λευκάδας) δεν ικανοποίησαν επαρκώς τα κριτήρια επιλογής (ΥΠΕΚΑ, 2010).

**Πίνακας 1.** Περιοχές αρχικής προκαταρκτικής χωροθέτησης ΘΑΠ (ΥΠΕΚΑ, 2010).

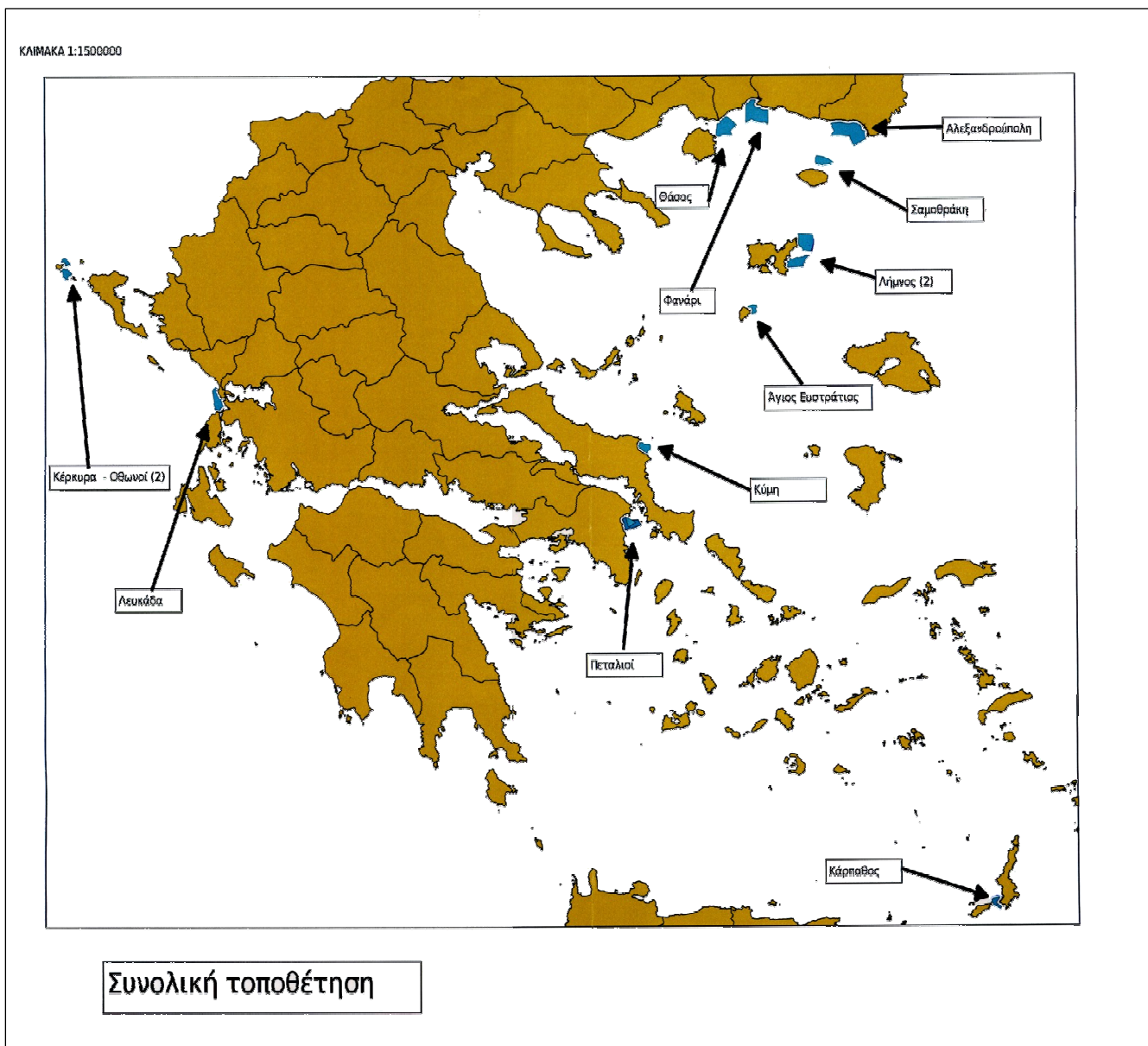
	Θαλάσσιο Αιολικό Πάρκο	Προτεινόμενο Εμβαδό Πολυγώνου (km <sup>2</sup> )	Αέρας	Δίκτυο	Βάθος	Μέγεθος	Βαθμός
		274					
1	Αη Στράτη	5	☹	☹	☹	☹	-1
2	Αλεξανδρούπολης	55	☹☹	☹	☹	☹	+2
3	Θάσου	35	☹☹	☹	☹	☹	+1
4	Καρπάθου	6	☹	☹	☹	☹	-1
5	Κέρκυρας	8	☹	☹	☹	☹	+1
6	Κρουνερίου		☹	☹	☹	☹	-1
7	Κύμης	9	☹	☹	☹	☹	+1
8	Λευκάδας	8	☹	☹	☹	☹	0
9	Λήμνου	49	☹	☹	☹	☹	+1
10	Πεταλιών	25	☹	☹	☹	☹	+1
11	Σαμοθράκης	33	☹	☹	☹	☹	+1
12	Φαναρίου	41	☹☹	☹	☹	☹	+2

### Σκοπός εργασίας

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται, μια πρώτη προσπάθεια για εκτίμηση του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού των Ελληνικών θαλασσών με βάση επιτόπιες μετρήσεις ανέμου. Τα ανεμολογικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται στη μελέτη είναι υπό τη μορφή μετρήσεων μακροχρόνιων χρονοσειρών της ταχύτητας ανέμου,

κατεύθυνσης ανέμου και ριπής ανέμου, καλύπτοντας μια περίοδο που κυμαίνεται από 5 μέχρι 12 χρόνια (1999-2011). Τα δεδομένα αποκτήθηκαν μέσω του δικτύου παρακολούθησης ΠΟΣΕΙΔΩΝ. Για τις επιλεγμένες περιοχές μελέτης, οι μετρήσεις των ανεμολογικών δεδομένων θα συγκριθούν με αποτελέσματα που προέρχονται από αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυση.

Για την προσέγγιση του προβληματισμού βοήθησαν τα ακόλουθα μεθοδολογικά εργαλεία: η θεωρητική εκτίμηση του αιολικού δυναμικού, η εκτίμηση του μέσου αιολικού δυναμικού στις περιοχές μελέτης, η σύγκριση των επιτόπιων μετρήσεων με το μοντέλο, καθώς και η μελέτη των προβλημάτων που σχετίζονται με την λειτουργία των θαλάσσιων αιολικών πάρκων στην Ελλάδα.



Εικόνα 2. Χάρτης «Προκαταρκτικής Χωροθέτησης των ΘΑΠ» για τον Ελληνικό θαλάσσιο χώρο (ΥΠΕΚΑ).

## 2. Ιστορική επισκόπηση-Χρήση αιολικής ενέργειας

Από τους αρχαίους χρόνους έχουν γίνει ανθρώπινες προσπάθειες να χρησιμοποιηθεί ο άνεμος ως πηγή ενέργειας. Αρχικά η ενέργεια του ανέμου (ή αιολική ενέργεια) χρησιμοποιήθηκε στη ναυσιπλοΐα, για την ώθηση των πλοίων. Ενώ, εδώ και 3.000 έτη οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιούν τον άνεμο για το άλεσμα των δημητριακών ή την άντληση των υδάτων (Burton et al, 2001).

Οι Πέρσες το 200 π.Χ. φαίνεται πως ήταν οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν τους ανεμόμυλους για την άλεση των δημητριακών. Συγκεκριμένα οι ανεμόμυλοι κάθετου άξονα για το άλεσμα δημητριακών αναφέρθηκαν στην Περσία το 10<sup>ο</sup> αιώνα και στην Κίνα το 13<sup>ο</sup> αιώνα. Οι ανεμόμυλοι μαζί με τους υδρόμυλους, αποτέλεσαν τις μεγαλύτερες πηγές ενέργειας πριν από την εφεύρεση της μηχανής ατμού (Nelson, 2009).

Αυτός ο τύπος ανεμόμυλου (κάθετου άξονα) εισήχθηκε πιθανότατα από τους σταυροφόρους στην Ευρώπη κατά το 13<sup>ο</sup> αιώνα (Hau, 2006), με αποτέλεσμα να γίνουν δημοφιλείς στο μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης (Sathyajith, 2006). Σε αντίθεση με τη Περσική κατασκευή κάθετου άξονα (Εικόνα 3), οι ευρωπαϊκοί μύλοι είχαν οριζόντιο άξονα (Εικόνα 3). Ο πρώτος ανεμόμυλος οριζόντιου άξονα εμφανίστηκε στην Αγγλία περίπου το 1150, στη Γαλλία το 1180, στη Γερμανία το 1222 και στη Δανία το 1259 (Ackermann, 2005). Η διατομή του πύργου ήταν κυκλική ή πολυγωνική και κατασκευάζονταν από ξύλο ή τούβλα. Ο ρότορας προσανατολιζόταν χειροκίνητα προς τον άνεμο. Ο μύλος προστατευόταν από τους ισχυρούς ανέμους γυρνώντας το ρότορα από τον άνεμο ή με αφαίρεση του καμβά που κάλυπτε το ρότορα.

Οι Ολλανδοί, με τον διάσημο σχεδιαστή Jan Adriaenszoon ήταν πρωτοπόροι στην κατασκευή αυτών των ανεμόμυλων. Εκτός από το άλεσμα των δημητριακών, οι ανεμόμυλοι χρησιμοποιήθηκαν για την αποξήρανση των ελωδών εδαφών της Ολλανδίας. Αυτοί οι ανεμόμυλοι έφθασαν στην Αμερική στα μέσα του 1700, μέσω των ολλανδών αποίκων (Sathyajith, 2006). Η αποκαλούμενη Αμερικάνικη multi bladed ανεμογεννήτρια εμφανίστηκε στην ιστορία της αιολικής ενέργειας στα μέσα του 1800. Το βασικό της μοτίβο ήταν η άντληση των υδάτων μερικά μέτρα κάτω από την επιφάνεια, για γεωργικές χρήσεις.



Εικόνα 3. Ανεμόμυλοι (Μαμάσης, 2010).

Οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούν την ενέργεια του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εφευρέθηκαν στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα στη Δανία. Μέχρι το 1900 υπήρχαν περίπου 2500 ανεμόμυλοι για τα μηχανικά φορτία όπως οι αντλίες και οι μύλοι, παράγοντας μια κατ' εκτίμηση συνδυασμένη μέγιστη δύναμη περίπου 30 MW (Lehmann, 2007).

Το 1891, ο Δανός Roul LaCour ήταν ο πρώτος που κατασκεύασε ανεμογεννήτρια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Ackermann, 2005). Συγκεκριμένα, παρείχε ηλεκτρική ενέργεια στις αγροτικές περιοχές. Κατά τη διάρκεια της ίδιας περιόδου, μια μεγάλη ανεμογεννήτρια που είχε διάμετρο ρότορα 17 m κατασκευάστηκε στο Cleveland, του Ohio. Για πρώτη φορά, ένα επιταχυνόμενο

κιβώτιο ταχυτήτων εισήχθη στην κατασκευή. Το σύστημα αυτό λειτούργησε για 20 έτη, παράγοντας ισχύ των 12 kW (Sathyajith, 2006).

Εντούτοις, για μεγάλο μέρος του 20<sup>ου</sup> αιώνα, υπήρξε μικρό ενδιαφέρον για χρήση της αιολικής ενέργειας πέραν της φόρτισης των μπαταριών για τις απομακρυσμένες κατοικίες και των χαμηλής ισχύος συστήματα που αντικαταστάθηκαν γρήγορα όταν η πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο έγινε διαθέσιμη. Μια αξιοσημείωτη εξαίρεση ήταν η ανεμογεννήτρια 1250kW Smith-Putnam που κατασκευάστηκε στις ΗΠΑ το 1941. Ο Golding (1955) και οι Shepherd και Divone στη Spera (1994) παρέχουν μια εξαιρετικά ενδιαφέρον ιστορία της πρώιμης ανάπτυξης των ανεμογεννητριών. Καταγράφουν την ανεμογεννήτρια Balaclava των 100 kW διαμέτρου 30 m στην τότε USSR το 1931 και του Andrea Enfield 100 kW διαμέτρου 24 m πνευματικό σχέδιο που κατασκευάστηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο στις αρχές του 1950. Στη Δανία η μηχανή Gedser των 200 kW διαμέτρου 24 m χτίστηκε το 1956, ενώ η «Electricité de France» δοκίμαζε μια ανεμογεννήτρια 1.1 MW διαμέτρου 35 m το 1963. Στη Γερμανία, ο καθηγητής Hutter κατασκεύασε μια σειρά από καινοτόμες, ελαφριές ανεμογεννήτριες στη δεκαετία του 1950 και του 1960. Παρά αυτές τις τεχνολογικές προόδους και τον ενθουσιασμό του Golding, από τον Ηλεκτρικό Ερευνητικό Οργανισμό του Ηνωμένου Βασιλείου υπήρξε μικρό συνεχές ενδιαφέρον για την παραγωγή αιολικής ενέργειας έως ότου αυξήθηκε εντυπωσιακά η τιμή του πετρελαίου το 1973 (Burton et al., 2001).

Το κίνητρο για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας το 1973 ήταν η τιμή του πετρελαίου και η ανησυχία για τους περιορισμένους πόρους των φυσικών καυσίμων (fossil-fuel). Σήμερα, ο κύριος λόγος της χρήσης ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρισμού είναι οι πολύ χαμηλές εκπομπές CO<sub>2</sub> (εκτός του κύκλου ζωής της κατασκευής, της εγκατάστασης, της λειτουργίας και του αποπλισμού) και η δυνατότητα της αιολικής ενέργειας να βοηθήσει στον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής. Το 1997 η Επιτροπή (Commission) της Ευρωπαϊκής Ένωσης δημοσίευσε την Λευκή Βίβλο (CEU, 1997) απαιτώντας να συμβάλουν οι ΑΠΕ της Ευρωπαϊκής Ένωσης το 12% της συνολικής ενέργειας, μέχρι το 2010. Η αιολική ενέργεια διαδραματίζει το βασικό ρόλο στις ΑΠΕ με μια αύξηση της ισχύος των ανεμογεννητριών από 2.5 GW που ήταν το 1995, σε 40 GW μέχρι το 2010 (Burton et al., 2001). Ως αποτέλεσμα, σήμερα η Ευρώπη παίρνει περίπου το 20% της ηλεκτρικής της ενέργειας από τις ΑΠΕ, συμπεριλαμβανομένου το 5.3% από την αιολική ενέργεια (EWEA, 2011).

Οι πρώτες ιδέες για την παραγωγή ηλεκτρισμού χρησιμοποιώντας τον άνεμο στο υπεράκτιο περιβάλλον εμφανίστηκαν πριν το τέλος της δεκαετίας του 1970 και μετά από πολλές μελέτες σκοπιμότητας στην επόμενη δεκαετία. Στις αρχές τις δεκαετίας του 1990 τα ΘΑΠ που κατασκευάστηκαν είναι: (μια μοναδική ανεμογεννήτρια) στο Nogensud, της Σουηδίας το 1990 και στο Vindeby, της Δανίας το 1991. Το ΘΑΠ στο Vindeby (Εικόνα 4) περιλάμβανε 11 ανεμογεννήτριες, των 450 kW, δίνοντας συνολική ισχύ περίπου 5 MW (Lehmann, 2007).

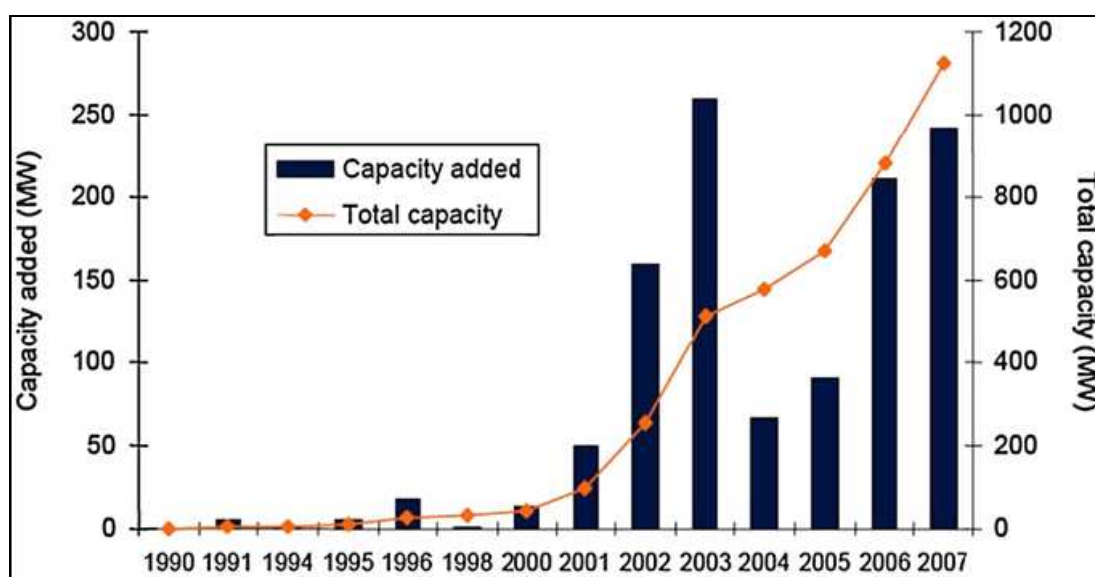


**Εικόνα 4.** Θαλάσσιο αιολικό πάρκο στο Vindeby, της Δανίας το 1991 (Hau, 2006).

Το Vindeby ακολούθησε σύντομα ένα δεύτερο ΘΑΠ στη Δανία, το Tunø Knob και δύο ακόμα ΘΑΠ που κατασκευάστηκαν στην Ολλανδία. Αυτά ήταν ενσωματωμένα πάνω σε θεμελιώσεις μονού πυλώνα (monopiles), η οποία έγινε η προτιμώμενη δομή στήριξης για τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες. Από το 1995 έως το 2000 υπήρχε μικρή δραστηριότητα, με ένα ΘΑΠ να κατασκευάζεται στο Bockstigen-Valor της Σουηδίας. Κατά το έτος 2000 νέα ΘΑΠ άρχισαν να κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας μεγάλες (multi-megawatt) ανεμογεννήτριες (Lehmann, 2007). Το

πρώτο ΘΑΠ με multi-megawatt ανεμογεννήτριες (7 ανεμογεννήτριες των 1.5 MW) κατασκευάστηκε το 2000 στο Utgrunden της Σουηδίας. Αρκετές των εν λόγω εγκαταστάσεων σηματοδότησαν την έναρξη των πρώτων εμπορικών ΘΑΠ όπως: το Blyth στο Ηνωμένο Βασίλειο (το 2000) αποτελούμενο από 2 ανεμογεννήτριες των 2 MW, το Middelgrunden στη Δανία (το 2001) αποτελούμενο από 20 ανεμογεννήτριες των 2 MW και το Yttre Stengrund στη Σουηδία (το 2001) αποτελούμενο από 5 ανεμογεννήτριες των 2 MW (Esteban et al., 2010).

Αργότερα στις ακτές τις Δανίας, τα ΘΑΠ Horns Rev (το 2002, όπου ήταν και το μεγαλύτερο στο κόσμο) και Nysted (το 2003) με 80 και 76 πολύ μεγάλα (multi-megawatt) ανεμογεννήτριες αντίστοιχα, αποτέλεσαν την επιβεβαίωση της δυνατότητας προσαρμογής τέτοιων τύπων ανεμογεννητριών στο θαλάσσιο περιβάλλον. Από τότε, οι εγκαταστάσεις αυτού του τύπου συνεχίζουν να κατασκευάζονται. Τον Νοέμβριο του 2010, το έργο Thanet στο Ηνωμένο Βασίλειο είναι το μεγαλύτερο ΘΑΠ στον κόσμο με 300 MW (100 ανεμογεννήτριες των 3 MW), ακολουθεί το Horns Rev II (2009) της Δανίας με 209 MW (91 ανεμογεννήτριες των 2.3 MW) ([http://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_farm](http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_farm)). Στην πραγματικότητα, είναι ουσιαστικό να προωθηθεί η χρήση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας για να επιτευχθούν οι δεσμεύσεις που απαιτούνται από το πρωτόκολλο του Κιότο. Εν συνεχεία, στην Εικόνα 5 παρουσιάζεται ένα ιστόγραμμα όπου παρουσιάζει την εξέλιξη της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας από το 1990 μέχρι το 2007 (Esteban et al., 2010).

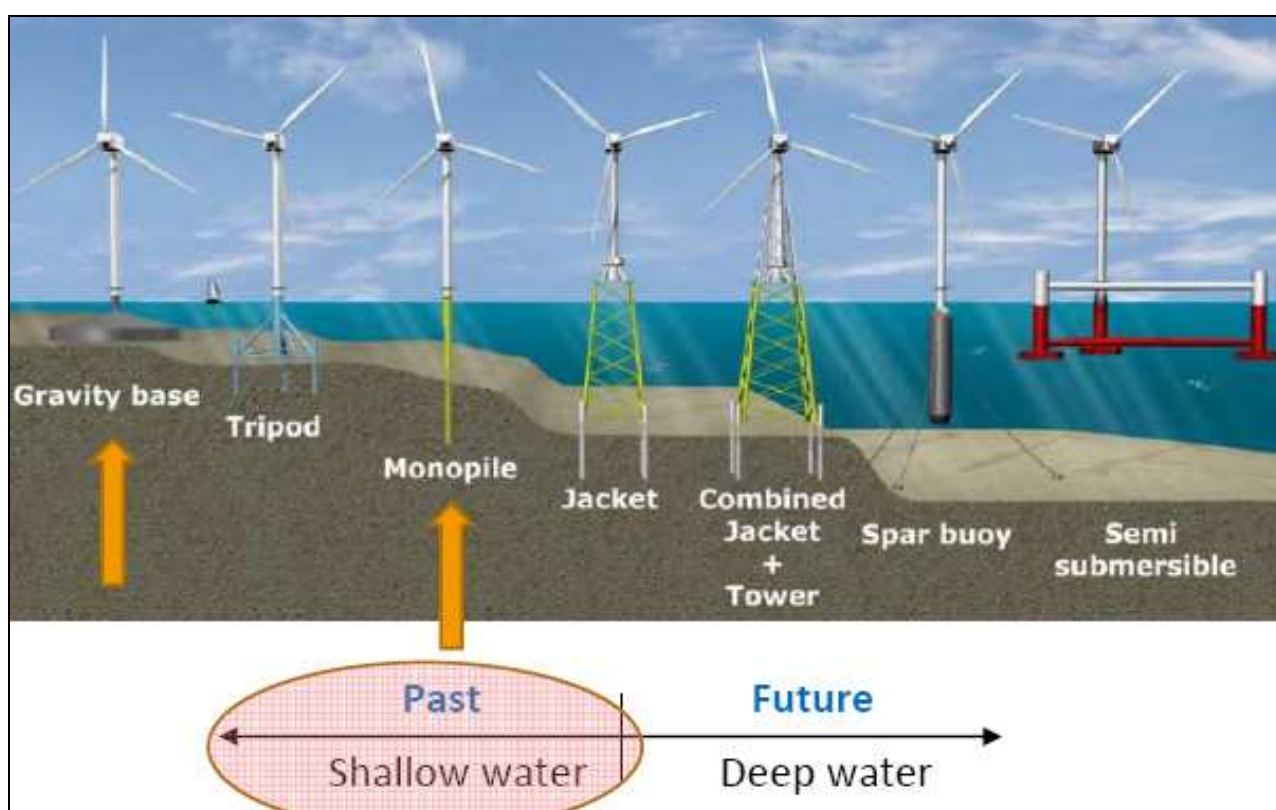


Εικόνα 5. Η ανάπτυξη της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας από το 1990 έως το 2007 (Esteban et al., 2010).



### 3. Τύποι υπεράκτιων ανεμογεννητριών

Η δομή των υπεράκτιων ανεμογεννητριών αποτελείται από δύο κύρια συστήματα υποδομής: το ρότορα και το σύστημα του πύργου. Το σύστημα του ρότορα απαρτίζεται συνήθως από τα τρία περύγια του ρότορα και την άτρακτο του κινητήρα, ενώ το σύστημα του πύργου περιλαμβάνει τον πύργο και τον τύπο έδρασης/θεμελίωσης (Lehmann, 2007). Οι τύποι των υπεράκτιων ανεμογεννητριών (Εικόνα 6) χαρακτηρίζονται από διαφορετικούς τύπους κατασκευών έδρασης ανάλογα με το βάθος και το τύπο του πυθμένα της θάλασσας (www.aquaret.com).



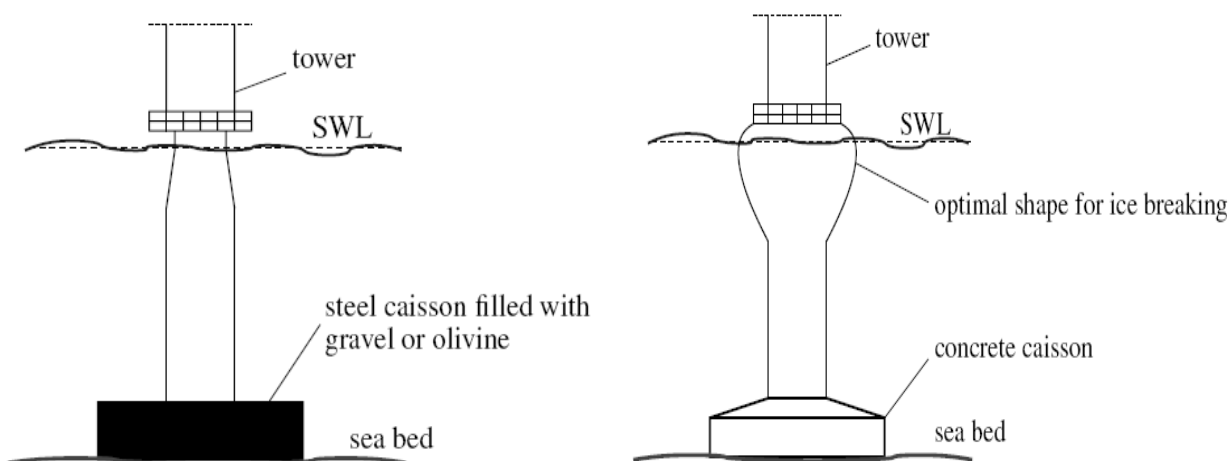
Εικόνα 6. Τύποι υπεράκτιων ανεμογεννητριών (Frandsen, 2009).

Για την επιλογή του κατάλληλου τύπου έδρασης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, εκτός από τα χαρακτηριστικά του ανέμου, σημαντικοί παράγοντες είναι: το βάθος του νερού, οι κυματικές συνθήκες, τα χαρακτηριστικά του πυθμένα της θάλασσας, η εγγύτητα στο ηλεκτρικό δίκτυο, η δυνατότητα σχηματισμού πάγου και η επίδραση στο θαλάσσιο περιβάλλον (Sathyajith, 2006).

Αρχικά, οι τύποι των υπεράκτιων ανεμογεννητριών υποδιαιρούνται σε κατασκευές έδρασης/θεμελίωσης ρηχού, ενδιάμεσου και βαθύ νερού, όπως περιγράφονται παρακάτω.

### 3.1. Κατασκευές έδρασης στο ρηχό νερό (βάθη 0 ως 30 m)

ι) Βάσης Βαρύτητας (Gravity base). Η αρχή της έδρασης βαρύτητας βασίζεται στη χρήση της δύναμης της βαρύτητας. Οι κατασκευές βάσης βαρύτητας αποτελούνται από κιβώτια σκυροδέματος ή χάλυβα (Εικόνα 7) (Kaltschmitt et al, 2007). Τα περισσότερα από τα υπάρχοντα Θ.Α.Π. έχουν χρησιμοποιήσει τις θεμελιώσεις βαρύτητας από σκυρόδεμα. Μια νέα τεχνολογία, αντί του ενισχυμένου σκυροδέματος χρησιμοποιεί έναν κυλινδρικό σωλήνα από χάλυβα που τοποθετείται πάνω στο επίπεδο κιβώτιο χάλυβα στον πυθμένα της θάλασσας. Η κατασκευή βαρύτητας από χάλυβα είναι ελαφρύτερη από του σκυροδέματος. Όταν ολοκληρωθεί η έδραση της κατασκευής πρέπει να έχει μάζα γύρω στα  $10^6$  kg, η κατασκευή χάλυβα έχει μάζα μόνο  $8 \cdot 10^4$  kg με  $10^5$  kg για βάθος νερού 4 m και 10 m.



**Εικόνα 7.** Κατασκευή έδρασης βαρύτητας με βάση από χάλυβα (αριστερά) και σκυρόδεμα (δεξιά) (Lehmann, 2007).

Το σχετικά μικρό βάρος επιτρέπει στις φορηγίδες την γρήγορη μεταφορά και έδραση των κατασκευών, χρησιμοποιώντας τον ίδιο γερανό που χρησιμοποιείται για την ανέγερση των τουρμπινών. Οι εδράσεις βαρύτητας γεμίζουν με ορυκτό ολιβίνης (olivine), ένα πολύ πυκνό μέταλλευμα, το οποίο δίνει το απαραίτητο βάρος στην θεμελίωση για να αντέξει στην πίεση του κυματισμού και του πάγου. Η βάση της

θεμελίωσης αυτού του τύπου θα είναι 14 m ( ή διάμετρος 15 m για κυκλική βάση) για βάθος νερού από 4 ως 10 m (ο υπολογισμός αυτός βασίζεται σε ανεμογεννήτριες με διάμετρο ρότορα 65 m).

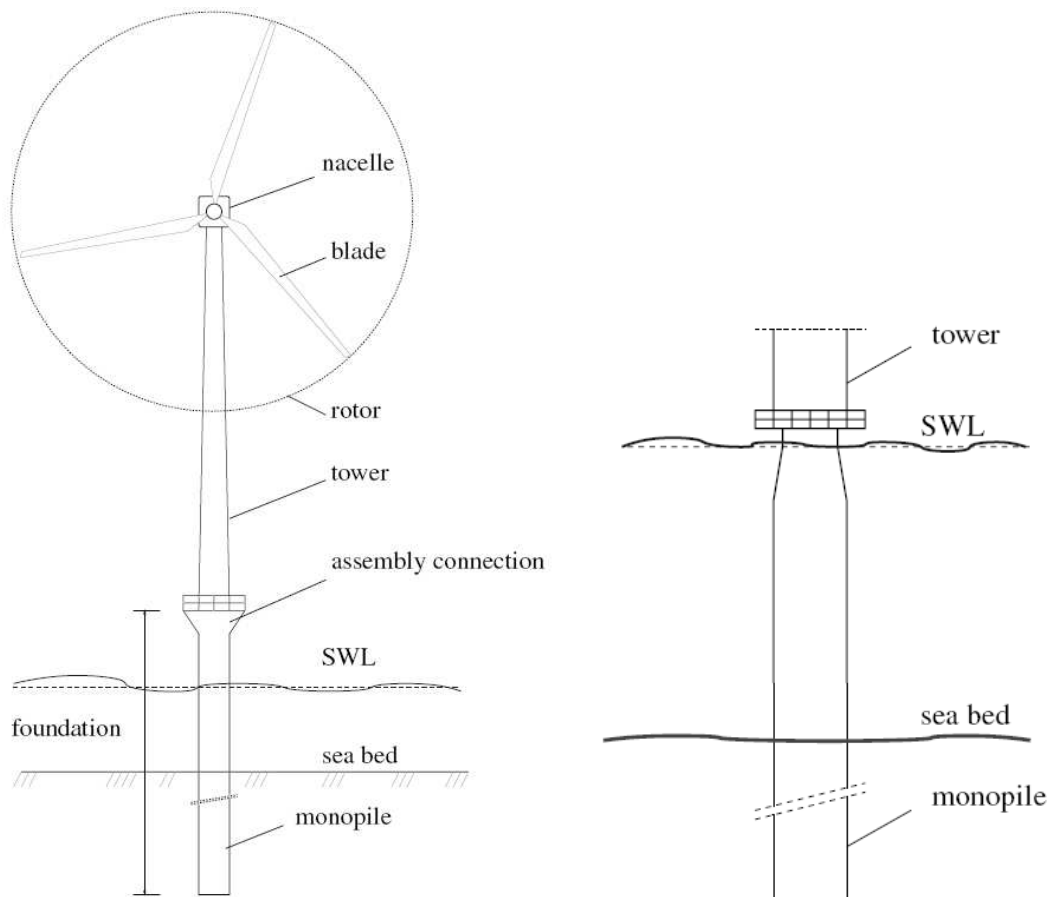
Το πλεονέκτημα της λύσης των κιβωτίων χάλυβα είναι ότι κατασκευάζονται στην ξηρά. Ακόμη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλους τους τύπους πυθμένα, αν και απαιτείται προετοιμασία των πυθμένων αυτών. Ο πυθμένας γύρω από τη βάση της θεμελίωσης θα πρέπει κανονικά να προστατευθεί από τη διάβρωση με την τοποθέτηση ογκόλιθων ή βράχων γύρω από τις άκρες της βάσης. Ο παράγοντας που καθορίζει την καταλληλότητα της βάσης και του βάρους της θεμελίωσης δεν είναι η τουρμπίνα, αλλά οι δυνάμεις πίεσης που της ασκούνται από το κυματισμό και τον πάγο (Lehmann, 2007).

ii) Μονού πυλώνα (Monopile). Η έδραση μονού πυλώνα (Εικόνα 8) είναι απλή: αποτελείται από ένα πυλώνα χάλυβα με διάμετρο μεταξύ 3 m και 4.5 m, μάζας από 100 ως 400 t (Kaltschmitt et al, 2007). Ο πυλώνας οδηγείται από 3.5 D μέχρι 8 D (όπου D είναι η διάμετρος του μονού πυλώνα) μέσα στον πυθμένα της θάλασσας ανάλογα με τον τύπο του υποστρώματος (Πίνακας 2) (Lehmann, 2007).

**Πίνακας 2.** Μήκος στερέωσης της κατασκευής θεμελίωσης μονού πυλώνα για διαφορετικούς θαλάσσιους πυθμένες (Lehmann, 2007).

<b>Τύπος θαλάσσιου πυθμένα</b>	<b>Μήκος στερέωσης</b>
Μέσος όρος	6 D
Συνεκτικός πηλός (Stiff clay)	3.5 D- 4.5D
Μαλακή ιλύς (Soft silt)	7 D-8 D

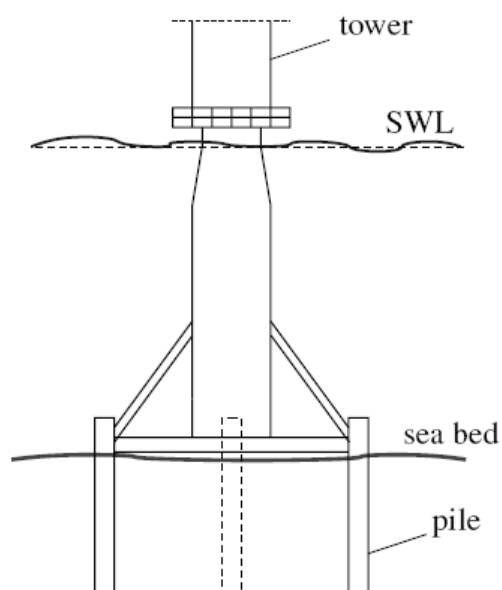
Η συγκεκριμένη έδραση δεν χρειάζεται ουσιαστικά καμία προετοιμασία του πυθμένα, αλλά το υλικό του θα πρέπει να είναι άμμος ή αμμοχάλικο προκειμένου να αποφευχθεί η ακριβή εργασία της γεώτρησης (Hau, 2006). Αν ένας μεγάλος ογκόλιθος παρεμβάλλεται κατά την διάρκεια της έδρασης, είναι δυνατό να τρυπηθεί από το τρυπάνι και να ανατιναχθεί με εκρηκτικές ύλες (Lehmann, 2007). Το μέγιστο βάθος νερού, μέχρι το οποίο η εγκατάσταση θεμελίωσης μονού πυλώνα είναι λογική, φαίνεται να είναι τα 25 m (Kaltschmitt et al, 2007).



**Εικόνα 8.** Κατασκευή έδρασης μονού πυλώνα (Lehmann, 2007).

iii) Τρίποδα (Tripod). Η έδραση τρίποδα βασίζεται στην εμπειρία που αποκτήθηκε από χαλύβδινες κατασκευές jackets τριπόδων με μικρό βάρος και αποτελεσματικών από πλευράς κόστους, που εγκαταστάθηκαν σε παράκτιες περιοχές που χρησιμοποιεί η βιομηχανία πετρελαίου. Ένα πλαίσιο χάλυβα συνδέεται με τον πύργο της ανεμογεννήτριας και μεταφέρει τις δυνάμεις από τον πύργο στους τρεις πυλώνες χάλυβα (Εικόνα 9) (Lehmann, 2007).

Η διάμετρος των θεμελιωμένων πυλώνων που αγκυρώνονται στο βυθό από την οδήγηση των πυλώνων, με διάτρηση και δονήσεις, ισοδυναμεί περίπου με 0.9 m (Kaltschmitt et al, 2007). Ανάλογα με τους αντίστοιχους τύπους υποστρώματος, το επιθυμητό βάθος διείσδυσης στον πυθμένα ποικίλλει μεταξύ 10 και 20 m (Hau, 2006). Επιπλέον, απαιτείται ελάχιστη προετοιμασία της περιοχής όπου θα γίνει η εγκατάσταση (Lehmann, 2007). Οι εδράσεις τρίποδα είναι καταλληλότερες για βάθη νερού που υπερβαίνουν τα 20 m. Ο κύριος λόγος είναι ότι για βάθη μικρότερα των 7 m, τα θαλάσσια σκάφοι μπορεί να συγκρουστούν στο πλαίσιο χάλυβα της θεμελίωσης (Kaltschmitt et al, 2007).



Εικόνα 9. Κατασκευή έδρασης τρίποδα (Lehmann, 2007).

### 3.2. Κατασκευές έδρασης σε ενδιάμεσο νερό (βάθη 30 ως 50 m)

Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες που μπορούν να επιλεγούν για ενδιάμεσα βάθη νερού (transitional water) είναι είτε μια jacket είτε μια τρίποδη κατασκευή, οι οποίες καταλαμβάνουν μεγάλο χώρο και έχουν μικρότερη διάμετρο σωληνοειδών (tubulars) (Wang and Bai, 2010). Η κατασκευή έδρασης τρίποδα περιγράφηκε παραπάνω για τα ρηγά νερά.

Η συνολική εγκατάσταση της έδρασης jacket προϋποθέτει την επιλογή ενός ανοιχτού χώρου στις αποβάθρες ως περιοχή συναρμολόγησης, προσωρινή επισκευή της στήριξης στο έδαφος, τοποθέτηση του πυλώνα του πύργου στην θεμελίωση και χρησιμοποίηση μπουλονιών για τη σύνδεση τους, ανύψωση του πυλώνα του πύργου, την καμπίνα, μεταφορά της πλήμνης και των πτερυγίων, ολοκλήρωση της συναρμολόγησης και της επισκευής βλαβών των ανεμογεννητριών στην ξηρά. Στη συνέχεια, ένας μεγάλος γερανός χρησιμοποιείται για να ανυψώσει την ανεμογεννήτρια και την προσωρινή στήριξη στο κάτω μέρος της ανεμογεννήτριας στο σκάφος. Το ρυμουλκό θα ρυμουλκήσει το σκάφος γερανών στο σημείο εγκατάστασης και το σκάφος γερανών ανυψώνει την ολοκληρωμένη ανεμογεννήτρια πάνω στην πλατφόρμα jacket (Εικόνα 10). Μετά την σύνδεση του πυλώνα του

πύργου με μπουλόνια, η προσωρινή στήριξη μπορεί να αφαιρεθεί (Wang and Bai, 2010).



**Εικόνα 10.** Κατασκευή έδρασης Jacket (διαδικασία ανύψωσης ανεμογεννητριών στο Beatrice) (Wang and Bai, 2010).

Η έδραση jacket έχει κατασκευαστεί στο Beatrice της Σκωτίας (ΘΑΠ σε απόσταση 22 km από την ακτή και βάθος 45 μέτρων). Δύο 5 MW υπεράκτιες ανεμογεννήτριες έχουν εγκατασταθεί στο Beatrice (2007) ως υποδειγματικό σχέδιο υπεράκτιας αιολικής ενέργειας με τη μέθοδο γενικής εγκατάστασης (overall installation). Μια έδραση jacket κατασκευάστηκε με συνολικό ύψος 70 m και 43.5 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Το συνολικό ύψος της ανεμογεννήτριας είναι 145 m πάνω από τη θάλασσα με μήκος πτερυγίων 63 m. Το σκάφος γερανών, Rambizin, με τη μέγιστη ικανότητα ανύψωσης 4000 tons, χρησιμοποιήθηκε για τη γενική εγκατάσταση. Ο πρώτος πύργος έχει μήκος 68 m και βάρος 4000 tons, ενώ ο δεύτερος πύργος έχει μήκος 82 m και βάρος 3256 tons (Wang and Bai, 2010).

### 3.3. Πλωτές δομές έδρασης σε βαθύ νερό (βάθη πάνω από 60 m )

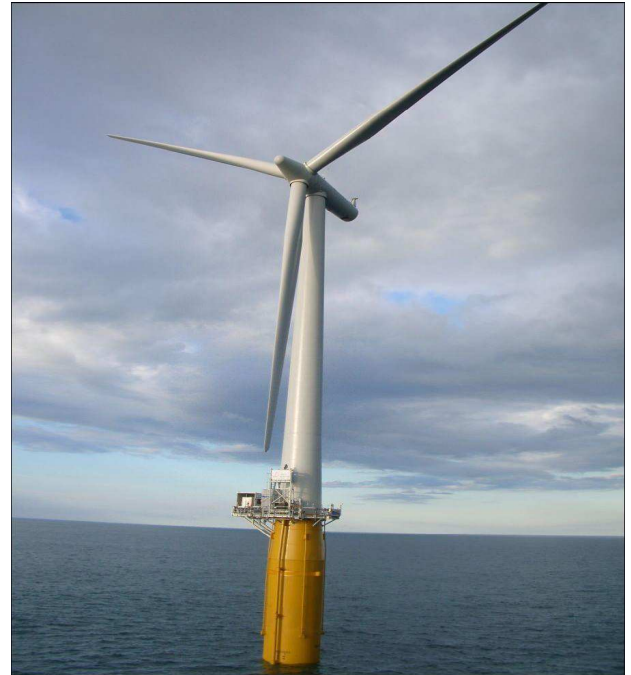
Η τεχνολογία για τις πλωτές δομές έδρασης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών εξελίσσεται. Σύμφωνα με τους περισσότερους ειδικούς η βιομηχανία υπεράκτιων αιολικών θα δει σημαντική αύξηση δραστηριότητας στο κοντινό μέλλον. Οι σταθερές υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι περιορισμένες σε βάθη νερού 30-50 m. Η μετάβαση της αγοράς σε βαθύτερα νερά είναι αναπόφευκτη, εάν οι κατάλληλες τεχνολογίες μπορούν να αναπτυχθούν. Αυτήν την περίοδο, υπάρχουν διάφορες πλωτές δομές έδρασης υπεράκτιων ανεμογεννητριών που βρίσκονται σε διαφορετικά στάδια ανάπτυξης (Roddier et al, 2010). Αυτές διαιρούνται σε δύο κύριες κατηγορίες: spars και semi submersible/υβριδικά συστήματα.

i) Spar buoys (Hywind Demo). Η Hywind spar buoy είναι σχέδιο της Statoil για τις πλωτές δομές έδρασης υπεράκτιων αιολικών. Η Hywind Demo εγκαταστάθηκε στο σκληρό ωκεάνιο περιβάλλον της δυτικής ακτής της Νορβηγίας το Σεπτεμβρίου 2009. Η Hywind Demo είναι εξοπλισμένη με μια 2.3 MW ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας από τη Siemens Wind Power και είναι η πρώτη πολύ-μεγαβάτ (multi-megawatt) πλωτή ανεμογεννήτρια στον κόσμο. Η Hywind Demo παρουσιάζεται στην Εικόνα 11 και τα κύρια χαρακτηριστικά της δίνονται στον πίνακα 3.

Ο σκελετός (hull) έχει κατασκευαστεί από χάλυβα (επίσης ένας συμπαγής σκελετός είναι πιθανός στις μελλοντικές εκδόσεις) και πάνω από το τμήμα του σκελετού τοποθετείται ένας πύργος από χάλυβα (Skaare et al, 2010). Όλη η εργασία κατασκευής μπορεί να εκτελεσθεί στα προφυλαγμένα ύδατα. Η πλήρης δομή μπορεί έτσι να ρυμουλκηθεί στη μόνιμη θέση της όπου οι μόνες διεργασίες που εκτελούνται στην ανοιχτή θάλασσα είναι η σύνδεση των γραμμών αγκύρωσης και του ηλεκτρικού καλωδίου (Skaare et al, 2007). Το σύστημα δένεται από τρεις γραμμές αγκύρωσης που αποτελούνται από τα χαλύβδινα σύρματα και τα βάρη μάζας (clump weights). Ακόμη η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από την ανεμογεννήτρια μεταφέρεται με καλώδιο στην ακτή (Skaare et al, 2010). Τέλος η Hywind απέδωσε 7.3G Wh το 2010 και επέζησε από κύματα 11 μέτρων φαινομενικά χωρίς φθορές (Skaare et al, 2010).

**Πίνακας 3.** Κύρια χαρακτηριστικά της πλωτής ανεμογεννήτριας Hywind (Skaare et al, 2010).

Turbine power	2.3 MW
Nacelle height above water line	65 m
Rotor diameter	82.4 m
Water depth	220 m
Displacement	5300 m <sup>3</sup>
Mooring	3 lines



**Εικόνα 11.** Hywind (Spar buoy), η πρώτη παγκόσμια πολύ-μεγαβάτ πλωτή ανεμογεννήτρια (Skaare et al, 2010).



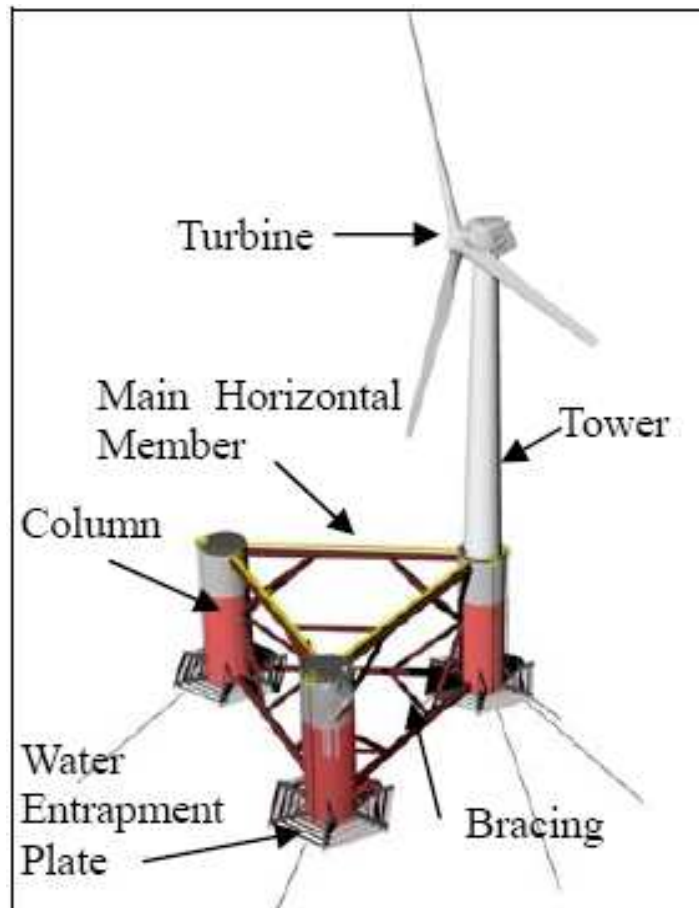
ii) Semi submersible (WindFloat). Μια ημιβυθισμένη πλατφόρμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πλωτή δομή έδρασης για ανεμογεννήτριες (multi-megawatt), καλείται επίσης WindFloat. Το σχέδιο WindFloat που περιγράφεται παρακάτω είναι βασισμένο επί του παρόντος στις διαθέσιμες ανεμογεννήτριες των 5 MW με σκοπό την δημιουργία ενός ΘΑΠ 150 MW στη δυτική ακτή της Πορτογαλίας σε βάθος νερού 80 m (βλέπε Εικόνα 12).



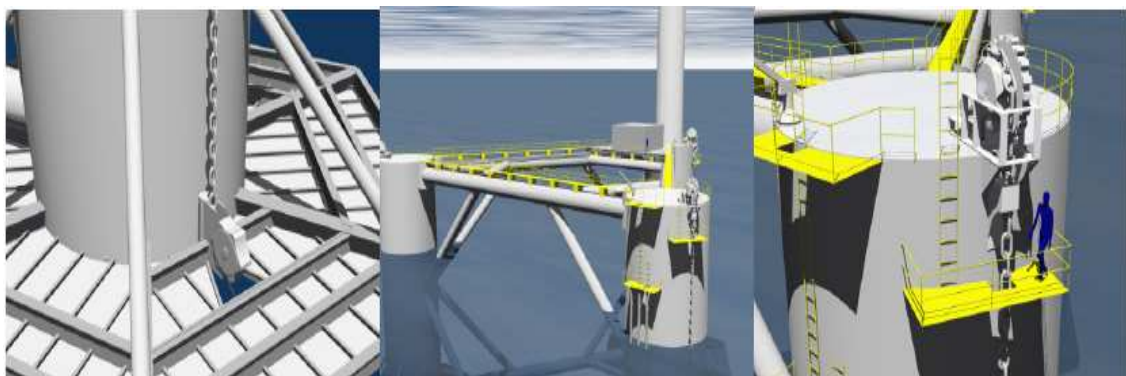
**Εικόνα 12.** Καλλιτεχνική απόδοση του ΘΑΠ 150 MW WindFloat (Cermelli et al, 2010).

Τα κύρια τμήματα της πλατφόρμας WindFloat (βλέπε εικόνα 13 και 14), περιγράφονται εν συντομία: υπάρχουν τρεις κατακόρυφες κυκλικές κολόνες αλληλοσυνδεόμενες με οριζόντια σωληνοειδή μέλη και bracing. Οι κολόνες είναι σκληρού περιβλήματος κατασκευές με δοκούς δακτύλιο και κάθετα ενισχυτικά ελάσματα. Μία πλάκα παγίδευσης-νερού (water-entrapment plate) βρίσκεται στη βάση των κολόνων και εκτείνεται οριζόντια προς τα έξω. Είναι κατασκευασμένη από σκληρές πλάκες με ακτινωτά ενισχυτικά ελάσματα στερεωμένα στη βάση των κολόνων και υποστηρίζεται από τις κάθετες ενισχύσεις (bracing) συνδέοντας το εξωτερικό άκρο της πλάκας με τις κολόνες. Η πλάκα παγίδευσης-νερού αυξάνει στη πλατφόρμα την πρόσθετη-μάζα και την απόσβεση του πλάτους ταλάντωσης. Αποτελεί βασικό συστατικό υδροδυναμικής απόδοσης της πλατφόρμας. Ο πύργος της ανεμογεννήτριας τοποθετείται σε μια από τις κολόνες. Τα πτερύγια του ρότορα και η

άτρακτος είναι σταθερά στην κορυφή του πύργου. Το ύψος της πλήμνης είναι 80m πάνω από τη μέση στάθμη του νερού. Η πλατφόρμα είναι αγκυρωμένη στο βυθό της θάλασσας με τέσσερις έως έξι γραμμές αγκύρωσης. Υπάρχει μια πολύ μικρή γέφυρα μεταξύ των κολόνων που χρησιμοποιείται για συντήρηση ορισμένου ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, ο οποίος είναι πρακτικότερο να ρυθμιστεί και να συντηρηθεί στο κατάστρωμα της γέφυρας παρά στο εσωτερικό του πύργου.



Εικόνα 13. Βασικά τμήματα της WindFloat (Aubault et al, 2009).



Εικόνα 14. Water-entrapment plate (αριστερά), deck layout (κέντρο) και top of column (δεξιά) (Cermelli et al, 2010).

Ένα ενεργό σύστημα έρματος νερού είναι εγκατεστημένο στην πλατφόρμα για να μεταφέρει το νερό μεταξύ των κολόνων ώστε να αντισταθμίσει τη μεταβολή της ροπής ανατροπής λόγω της αλλαγής στη μέση ταχύτητα ανέμου ή κατεύθυνση. Το σύστημα έρματος δεν έχει καμία σύνδεση σωληνώσεων εξωτερικά για να ελαχιστοποιήσει τους κινδύνους που συνδέονται με τη δυσλειτουργία της σταθεροποίησης του εξοπλισμού (ballasting equipment). Το σύστημα έρματος σχεδιάζεται μόνο για να αντισταθμίσει τη μέση ροπής ανατροπής. Έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει μέχρι 200 τόνους ενεργού νερού έρματος σε περίπου 30 λεπτά χρησιμοποιώντας δύο ανεξάρτητες πορείες ροής με περιττή ικανότητα άντλησης. Ένα ενεργό διαμέρισμα έρματος βρίσκεται στον άνω μισό της κάθε κολόνας (Cermelli et al, 2010).

Η WindFloat όπως περιγράφεται η διαμόρφωση της παραπάνω, έχει τις διαστάσεις που αναφέρονται στον πίνακα 4 (Roddier et al, 2010).

**Πίνακας 4.** Κύριες διαστάσεις της πλατφόρμας WindFloat (Roddier et al, 2010).

Column diameter	35	ft	10.7	m
Length of heave plate edge	45	ft	13.7	m
Column center to center	185	ft	56.4	m
Pontoon diameter	6	ft	1.8	m
Operating draft	75	ft	22.9	m
Airgap	35	ft	10.7	m
Bracing diameter	4	ft	1.2	m
Displacement	7833	st	7105	ton

### **3.4. Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα**

Στις παραπάνω ενότητες έγινε παράθεση των τύπων υπεράκτιων ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται ήδη ή θα χρησιμοποιηθούν στο άμεσο μέλλον (όπως η πλωτή ανεμογεννήτρια Windfloat) από την βιομηχανία. Στην συνέχεια, δημιουργήθηκε ο πίνακας 5, στον οποίο συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα όλων των τύπων υπεράκτιων ανεμογεννητριών που μελετήθηκαν στο κεφάλαιο αυτό.

**Πίνακας 5.** Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των υπεράκτιων ανεμογεννητριών.

Τύποι Υπεράκτιων Ανεμογεννητριών	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
<b>Βάση βαρύτητας (Gravity base)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Κατασκευή στην ξηρά</li> <li>• Χρησιμοποίηση σε όλους τους τύπους πυθμένων της θάλασσας.</li> <li>• Οικονομικά αποδοτικότερη κατασκευή στα ρηχά νερά</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Προετοιμασία του πυθμένα της θάλασσας</li> <li>• Δαπανηρότερο σε περιοχές με μεγάλη διάβρωση</li> <li>• Πολύ βαρύτερα και ακριβότερα για βάθη μεγαλύτερα των 10 m</li> </ul>
<b>Μονού πυλώνα (Monopile)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Δεν είναι απαραίτητη η προετοιμασία του πυθμένα της θάλασσας.</li> <li>• Η διάβρωση δεν είναι πρόβλημα</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Δεν είναι κατάλληλο για πυθμένα θάλασσας σκληρού υποστρώματος</li> <li>• Η εφαρμογή του περιορίζεται μέχρι το βάθος των 25 m</li> </ul>
<b>Τρίποδα (Tripod)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Καταλληλότερα για βάθη μεγαλύτερα των 20 m.</li> <li>• Δεν χρειάζεται μεγάλη προετοιμασία του πυθμένα της θάλασσας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Δεν είναι κατάλληλο για βάθη μικρότερα των 6 m και 7 m</li> <li>• Ακατάλληλο για πυθμένα θάλασσας με ογκόλιθους</li> <li>• Δυσκολία μεταφοράς</li> </ul>
<b>Jacket</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Οικονομικότερη εγκατάσταση μέχρι τα βάθη των 50 ή 60 m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Προετοιμασία του πυθμένα της θάλασσας</li> <li>• Μη εγκατάσταση σε μεγάλα βάθη λόγω παρουσίας υδρογονανθράκων</li> </ul>
<b>Spar buoy (Hywind)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Συναρμολόγηση της κατασκευής στην ξηρά</li> <li>• Σταθερά χαρακτηριστικά κίνησης κατά τη διάρκεια λειτουργίας πάνω από την εκτιμημένη ταχύτητα ανέμου</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περισσότερες pitch και roll κινήσεις</li> </ul>
<b>Semi submersible (WindFloat)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Συναρμολόγηση της κατασκευής στην ξηρά</li> <li>• Η χαμηλή pitch και yaw κίνηση παρέχει στατική και δυναμική σταθερότητα στις υπάρχουσες ανεμογεννήτριες</li> <li>• Ρυμούλκηση σε περιοχή μεγάλου βάθους μη ορατή από την ακτή</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Αυξημένο κόστος</li> </ul>

#### 4. Θεωρητική εκτίμηση «αιολικού δυναμικού»

Σε αυτό το κεφάλαιο, εξετάζονται βασικές σχέσεις της φυσικής που έχουν σχέση με την ενέργεια και την ισχύ του ανέμου. Στη συνέχεια, βάση των σχέσεων της κινητικής ενέργειας και της διατήρησης μάζας γίνεται υπολογισμός της θεωρητικής αιολικής ενέργειας (χωρίς την εξέταση του μετατροπέα). Ακόμη, υπολογίζεται το ποσοστό της αιολικής ενέργειας που μετατρέπεται σε μηχανική ισχύ. Τέλος, παρουσιάζεται η επίδραση της κατανομής Weibull στη ταχύτητα του ανέμου.

##### 4.1. Θεωρητική εκτίμηση αιολικής ενέργειας

Η κινητική ενέργεια μιας μάζας αέρα  $m$  που κινείται με μια ταχύτητα  $u$  μπορεί να εκφραστεί ως:

$$E = \frac{1}{2} mu^2. \quad (1)$$

Για μία συγκεκριμένη διατομή  $A$ , μέσω της οποίας ο αέρας με πυκνότητα  $\rho$  διέρχεται με ταχύτητα  $u$ , η ροή μάζας είναι:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho u A. \quad (2)$$

Οι εξισώσεις (1) και (2) που εκφράζουν την κινητική ενέργεια του κινούμενου αέρα και της ροής μάζας παράγουν το ποσό ενέργειας που περνά μέσω της διατομής  $A$  ανά μονάδα χρόνου. Αυτή η ενέργεια  $\dot{E}$  είναι φυσικά ίδια με την ισχύ  $P_0$ :

$$P_0 = \dot{E} = \frac{1}{2} \dot{m} u^2 = \frac{1}{2} \rho A u u^2 = \frac{1}{2} \rho A u^3. \quad (3)$$

Η ερώτηση είναι πόση μηχανική ενέργεια μπορεί να εξαχθεί από τη ροή αέρος ελεύθερου ρεύματος από έναν ενεργειακό μετατροπέα. Δεδομένου ότι η μηχανική ενέργεια μπορεί μόνο να εξαχθεί με κόστος τη κινητική ενέργεια που περιλαμβάνεται στο ρεύμα αέρα, αυτό σημαίνει ότι, με μια αμετάβλητη μαζική ροή, η ταχύτητα ροής πίσω από τον μετατροπέα αιολικής ενέργειας πρέπει να μειωθεί. Η μειωμένη ταχύτητα, εντούτοις, σημαίνει συγχρόνως μια διεύρυνση της διατομής, δεδομένου ότι η ίδια ροή μάζας πρέπει να περάσει μέσω αυτής. Είναι επομένως απαραίτητο να εξεταστούν οι όροι μπροστά και πίσω από το μετατροπέα (Εικόνα 15).

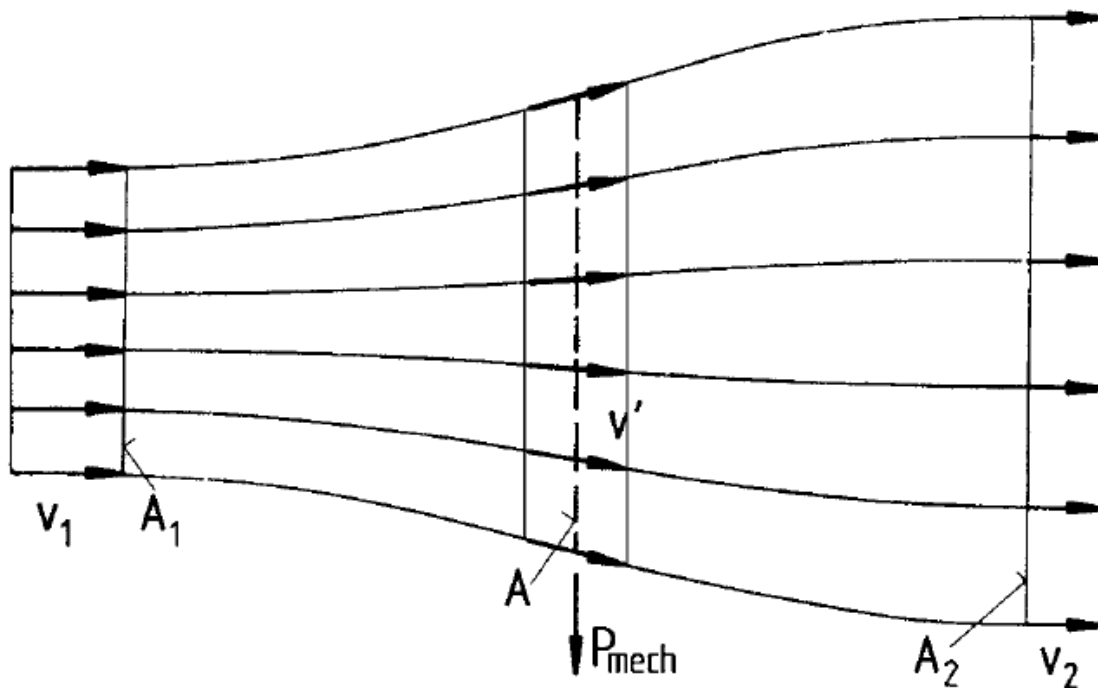
Εδώ,  $u_1$  είναι η χωρίς καθυστέρηση ταχύτητα ελεύθερης ροής, η ταχύτητα του ανέμου, προτού να φθάσει στο μετατροπέα, ενώ  $u_2$  είναι η ταχύτητα ροής πίσω από το μετατροπέα.

Η μηχανική ενέργεια που ο μετατροπέας (disk-shaped) εξάγει από τη ροή αέρα αντιστοιχεί στη διαφορά ισχύος του ρεύματος αέρα πριν και μετά το μετατροπέα:

$$P = \frac{1}{2} \rho A_1 u_1^3 - \frac{1}{2} \rho A_2 u_2^3 = \frac{1}{2} \rho (A_1 u_1^3 - A_2 u_2^3). \quad (4)$$

Η διατήρηση της ροής μάζας (εξίσωση συνέχειας) ορίζει ότι:

$$\rho u_1 A_1 = \rho u_2 A_2 \quad (5)$$



**Εικόνα 15.** Συνθήκες ροής που οφείλονται στην εξαγωγή μηχανικής ενέργειας από ένα ελεύθερο ρεύμα της ροής του αέρα, σύμφωνα με τα στοιχειώδη της θεωρίας ορμής (momentum theory) (Hau, 2006).

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση συνέχειας (2), η παραπάνω σχέση (4) γίνεται

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} (u_1^2 - u_2^2). \quad (6)$$

Από την εξίσωση αυτή προκύπτει, σε καθαρά τυπικούς όρους, ότι η ισχύς θα έπρεπε να είναι στο μέγιστό της όταν  $u_2$  είναι μηδέν, δηλαδή όταν ο άνεμος φέρεται σε πλήρη ακινητοποίηση από το μετατροπέα. Εντούτοις, αυτό το αποτέλεσμα δεν έχει νόημα φυσικά. Εάν η ταχύτητα εκροής  $u_2$  πίσω από το μετατροπέα είναι μηδέν, κατόπιν η ταχύτητα εισροής πριν το μετατροπέα πρέπει επίσης να γίνει μηδέν, υπονοώντας ότι δεν θα υπήρχε άλλη ροή μέσω του μετατροπέα καθόλου. Όπως θα μπορούσε να αναμένεται, ένα φυσικά σημαντικό αποτέλεσμα συνίσταται σε ένα συγκεκριμένο αριθμητικό λόγο  $u_2 / u_1$  όπου η εξαχθείσα ισχύς φθάνει στο μέγιστό της.

Αυτό απαιτεί μια άλλη εξίσωση εκφράζοντας τη μηχανική ισχύ του μετατροπέα. Χρησιμοποιώντας το νόμο διατήρησης της ορμής, η δύναμη που ασκεί ο άνεμος στο μετατροπέα μπορεί να εκφραστεί ως:

$$F = \dot{m}(u_1 - u_2), \quad (7)$$

Σύμφωνα με την αρχή «δράση ισούται αντίδραση», αυτή η δύναμη, η ώση (thrust), πρέπει να αντισταθμιστεί με μια ίση δύναμη που ασκείται από το μετατροπέα στη ροή αέρα. Η ώση (thrust), σα να λέμε, ωθεί τη μάζα αέρα στην ταχύτητα αέρα  $u'$ , που υπάρχει στο επίπεδο ροής του μετατροπέα. Η ισχύς που απαιτείται για αυτό είναι:

$$P = Fu' = \dot{m}(u_1 - u_2)u'. \quad (8)$$

Κατά συνέπεια, η μηχανική ενέργεια που εξάγεται από τη ροή αέρα μπορεί να προέλθει από τη διαφορά ενέργειας ή δύναμης πριν και μετά το μετατροπέα, αφ' ενός και αφ' ετέρου από την ώθηση (thrust) και την ταχύτητα ροής. Η εξίσωση αυτών των δύο εκφράσεων (6) και (8) παράγει τη σχέση για την ταχύτητα ροής  $u'$ :

$$\frac{1}{2}\dot{m}(u_1^2 - u_2^2) = \dot{m}(u_1 - u_2)u', \quad (9)$$

$$u' = \frac{1}{2}(u_1 + u_2), \quad (10)$$

Κατά συνέπεια η ταχύτητα ροής μέσω του μετατροπέα είναι ίση με τον αριθμητικό μέσο όρο  $u_1$  και  $u_2$ :

$$u' = \frac{1}{2}(u_1 + u_2). \quad (11)$$

Η εξίσωση (2) ροή μάζας γίνεται ως εξής:

$$\dot{m} = \rho A u' = \frac{1}{2} \rho A (u_1 + u_2). \quad (12)$$

Η μηχανική ισχύς που παράγεται από το μετατροπέα μπορεί τώρα να εκφραστεί ως:

$$P = \frac{1}{4} \rho A (u_1^2 - u_2^2) (u_1 + u_2). \quad (13)$$

Ο λόγος μεταξύ της μηχανικής ισχύος που παράγεται από το μετατροπέα (σχέση 13) προς την ισχύ του μη διαταραγμένου ρεύματος αέρα (σχέση 3) καλείται «συντελεστής ισχύος»  $c_p$ :

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (u_1^2 - u_2^2) (u_1 + u_2)}{\frac{1}{2} \rho u_1^3 A} \quad (14)$$

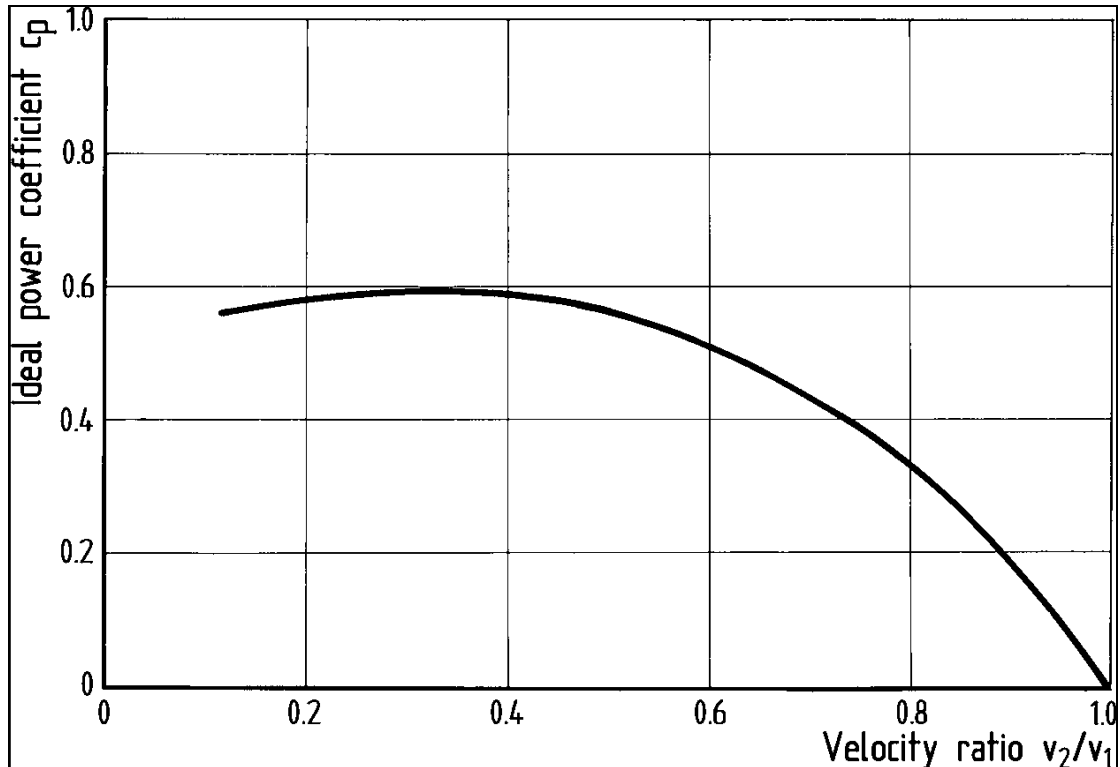
Μετά από κάποια αναδιάταξη, ο συντελεστής ισχύος μπορεί να καθορίζεται άμεσα ως συνάρτηση του λόγου των ταχυτήτων  $u_2 / u_1$ :

$$c_p = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2} \left| 1 - \left( \frac{u_2}{u_1} \right)^2 \right| \left| 1 + \frac{u_2}{u_1} \right| \quad (15)$$

Ο συντελεστής ισχύος, ο λόγος της εξαγόμενης μηχανικής ισχύος προς την ισχύ που περιέχεται στο ρεύμα αέρα, ως εκ τούτου, τώρα εξαρτάται μόνο από τον λόγο των ταχυτήτων αέρα πριν και μετά το μετατροπέα. Εάν αυτή η αλληλεπίδραση



σχεδιαστεί γραφικά-φυσικά, μια αναλυτική λύση μπορεί επίσης να βρεθεί εύκολα, μπορεί διαπιστωθεί ότι ο συντελεστής ισχύος φθάνει σε ένα μέγιστο για ένα ορισμένο λόγο ταχύτητας (Εικόνα 16).



Εικόνα 16. Συντελεστής ισχύος έναντι της ταχύτητας ροής σε σχέση με τη ροή πριν και μετά τον ενεργειακό μετατροπέα (Hau, 2006).

Με  $u_2 / u_1 = 1 / 3$ , ο μέγιστος «ιδανικός συντελεστής ισχύος»  $c_p$  γίνεται

$$c_p = \frac{16}{27} = 0.593. \quad (16)$$

ο Betz ήταν ο πρώτος που προσδιόρισε αυτήν την σημαντική τιμή και επομένως, καλείται συχνά «παράγοντας (factor) Betz».

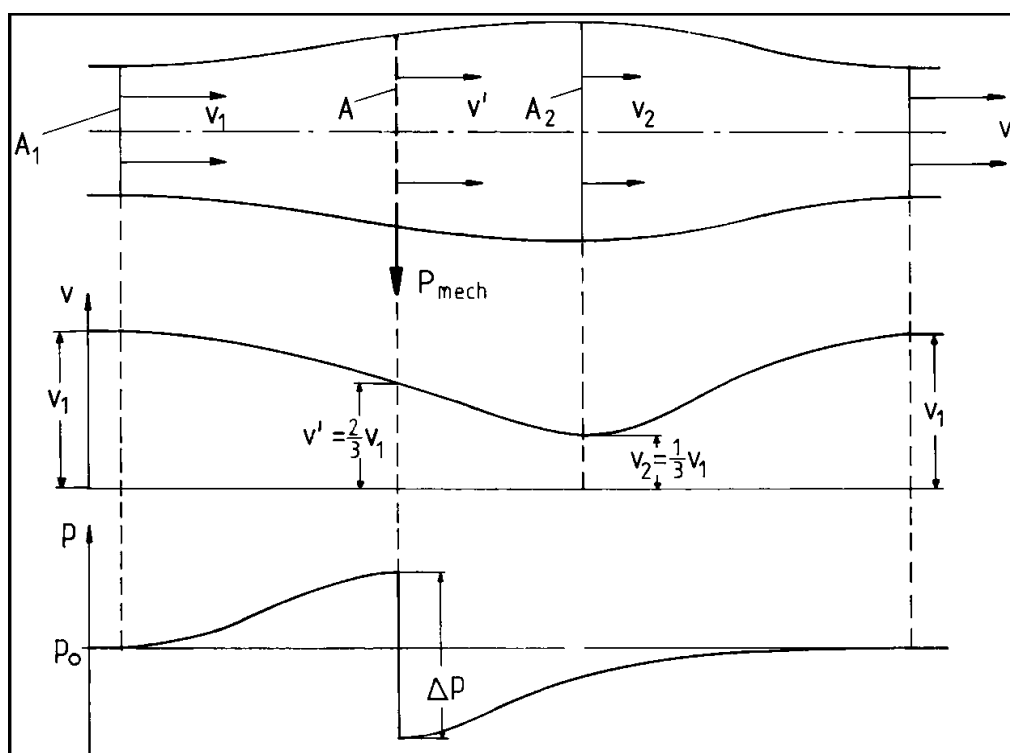
Γνωρίζοντας ότι ο μέγιστος, ιδανικός συντελεστής ισχύος επιτυγχάνεται για  $u_2 / u_1 = 1 / 3$ , η ταχύτητα ροής  $u'$  (σχέση 11) γίνεται:

$$u' = \frac{2}{3} u_1 \quad (17)$$

και η απαιτούμενη μειωμένη ταχύτητα  $u_2$  πίσω από το μετατροπέα μπορεί να υπολογιστεί:

$$u_2 = \frac{1}{3} u_1 \quad (18)$$

Στην εικόνα 17 παρουσιάζονται οι συνθήκες ροής μέσω του μετατροπέα αιολικής ενέργειας άλλη μια φορά, με μεγαλύτερες λεπτομέρειες. Εκτός από τις γραμμές ροής, αναφέρονται οι μεταβολές της σχετικής ταχύτητας ροής και της στατικής πίεσης. Όταν προσεγγίζει το επίπεδο του μετατροπέα ο αέρας επιβραδύνεται, ρέει μέσα και έπειτα επιβραδύνεται περαιτέρω στην ελάχιστη τιμή του πίσω από την τουρμπίνα. Οι γραμμές ροής δείχνουν μια διεύρυνση του σωλήνα ρευμάτων σε μια μέγιστη διάμετρο στο σημείο της χαμηλότερης ταχύτητας αέρα. Πλησιάζοντας την τουρμπίνα, η στατική πίεση αυξάνεται και έπειτα αποκτά χαμηλότερη τιμή, στο επίπεδο πάλι της ατμοσφαιρικής πίεσης πίσω από το μετατροπέα λόγω της εξίσωσης πίεσης. Η ταχύτητα ροής, στη συνέχεια, επίσης αυξάνει πάλι στην αρχική της τιμή μακριά πίσω από το μετατροπέα και η διεύρυνση του σωλήνα του ρεύματος εξαφανίζεται.



**Εικόνα 17.** Συνθήκες ροής του ρεύματος μέσω ενός ιδανικού ενεργειακού μετατροπέα (disk-shaped) με τη μέγιστη πιθανή εξαγωγή της μηχανικής ισχύος (Hau, 2006).

Αξίζει να υπενθυμιστεί ότι οι βασικές σχέσεις παρήχθησαν για μια ιδανική, χωρίς τριβές ροής και ότι το αποτέλεσμα παρήχθη προφανώς χωρίς να εξεταστεί προσεκτικά ο μετατροπέας αιολικής ενέργειας. Σε πραγματικές περιπτώσεις, ο συντελεστής ισχύος θα είναι πάντα μικρότερος από την ιδανική τιμή του Betz. Τα ουσιαστικά συμπεράσματα που προέρχονται από τη θεωρία ορμής μπορούν να συνοψιστούν με λέξεις ως εξής (Hau, 2006):

- Η μηχανική ισχύς που μπορεί να εξαχθεί από ένα ελεύθερο ρεύμα ροής αέρα μέσω ενός ενεργειακού μετατροπέα αυξάνεται με την τρίτη δύναμη της ταχύτητας του ανέμου.
- Η ισχύς αυξάνεται γραμμικά με το εμβαδόν της διατομής του μετατροπέα που διαβαίνει, επομένως αυξάνεται με τα τετραγωνικά (square) της διαμέτρου του.
- Ακόμη και με την ιδανική ροή αέρα και χωρίς απώλειες μετατροπής, ο λόγος της εξαχθείσας μηχανικής ενέργειας προς την ισχύ που περιέχεται στον άνεμο περιορίζεται στην τιμή των 0.593. Επομένως, μόνο περίπου 60% της αιολικής ενέργειας από μια ορισμένη διατομή μπορεί να μετατραπεί σε μηχανική ισχύ.
- Όταν ο ιδανικός συντελεστής ισχύος επιτυγχάνει τη μέγιστη τιμή του  $c_p = 0.593$ , η ταχύτητα του ανέμου στο επίπεδο της ροής του μετατροπέα ισοδυναμεί με τα δύο τρίτα της μη διαταραγμένης ταχύτητας ανέμου και μειώνεται στο ένα τρίτο πίσω από το μετατροπέα.

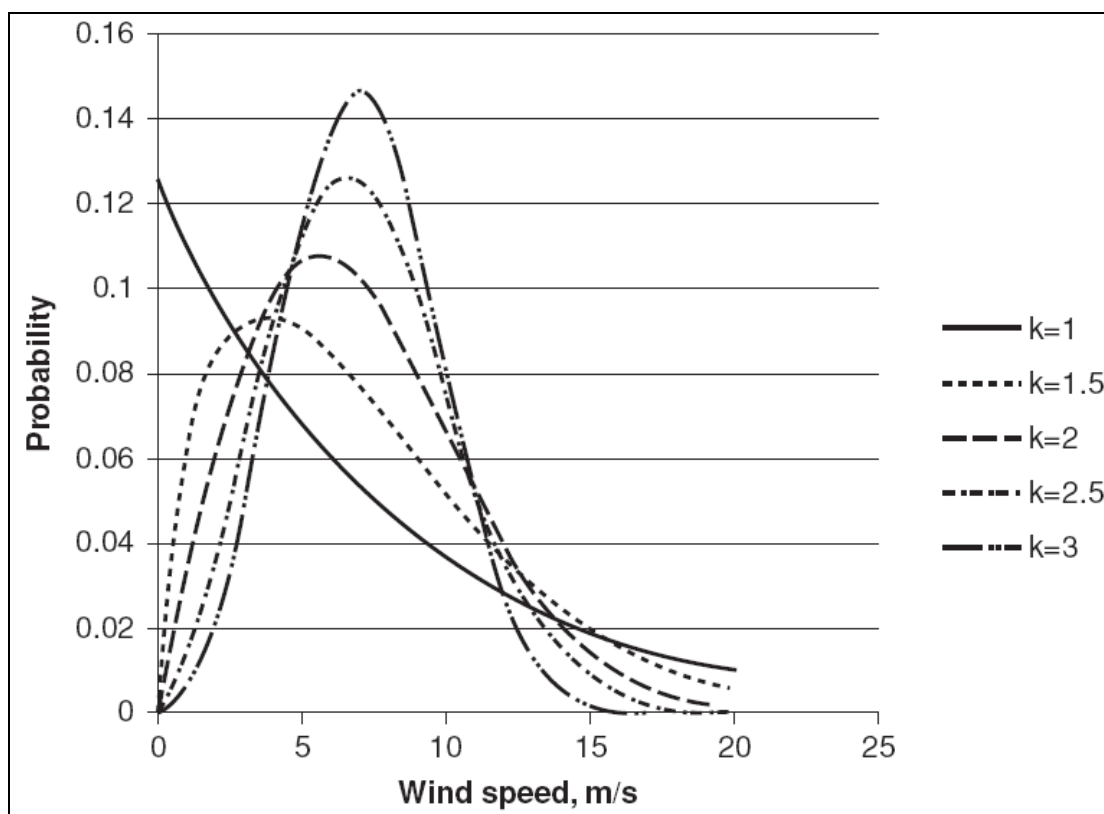
#### **4.2. Επίδραση της κατανομής Weibull**

Είναι πολύ σημαντικό να γίνει κατανοητή η μεταβολή των ταχυτήτων του ανέμου στο πλαίσιο των μελετημένων/μετρούμενων χρονικών περιόδων δεδομένου ότι διέπει σημαντικά την παραγωγή ενέργειας. Εάν κάποιος μετρά την ταχύτητα του ανέμου καθ' όλη τη διάρκεια ενός έτους, μπορεί να παρατηρήσει ότι στις περισσότερες περιοχές οι ισχυροί θυελλώδεις άνεμοι είναι σπάνιοι, ενώ οι μέτριοι και ήπιοι (fresh) άνεμοι είναι αρκετά συνηθισμένοι. Η επίδραση αυτής της μεταβολής στην παραγωγή ενέργειας περιγράφεται στην παρούσα ενότητα (Wagner & Mathur, 2009).

Η ταχύτητα του ανέμου είναι μια στοχαστική ποσότητα. Η πιο κοινή συνάρτηση κατανομής που χρησιμοποιείται για αναπαράσταση της ταχύτητας ανέμου είναι η Weibull, της οποίας η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας  $pd(u)$  είναι:

$$pd(u) = (k/A)(u/A)^{k-1}e^{-(u/A)^k} \quad (19)$$

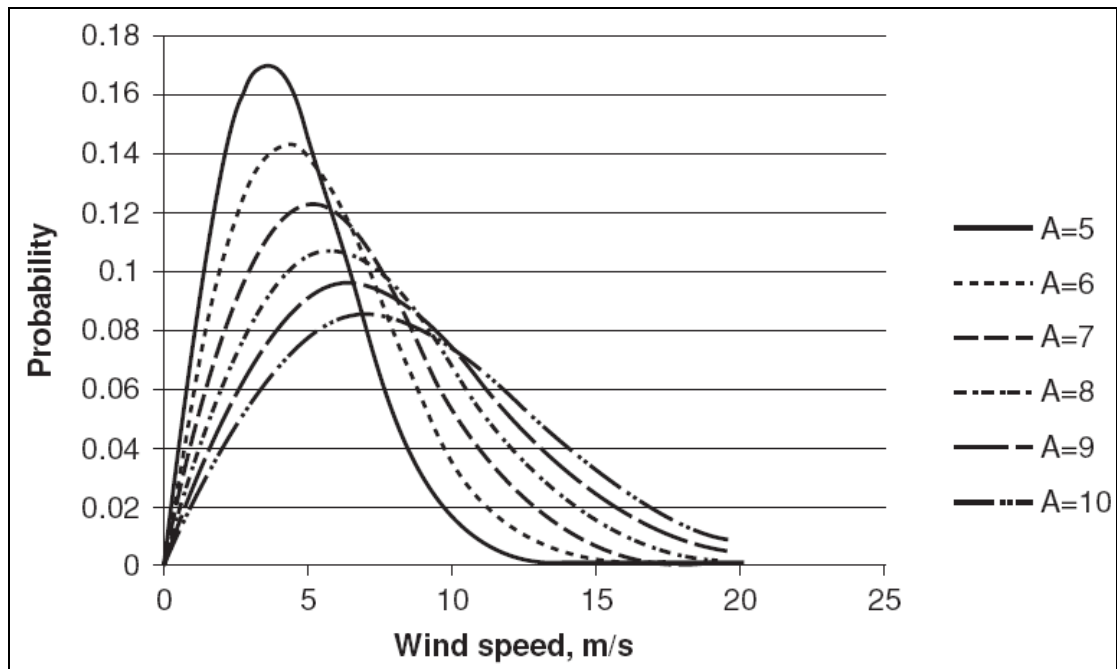
για  $u > 0$ , όπου  $u$  είναι η ταχύτητα ανέμου,  $k$  είναι η παράμετρος που καθορίζει τη μορφή της καμπύλης και  $A$  είναι η παράμετρος που καθορίζει την κλίμακα της καμπύλης (βλέπε εικόνα 18 και 19, όπου το  $k$  είναι αδιάστατος όρος και το  $A$  έχει μονάδες m/s) (Jain, 2011).



**Εικόνα 18.** Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull για  $A = 8$  m/s (Jain, 2011).

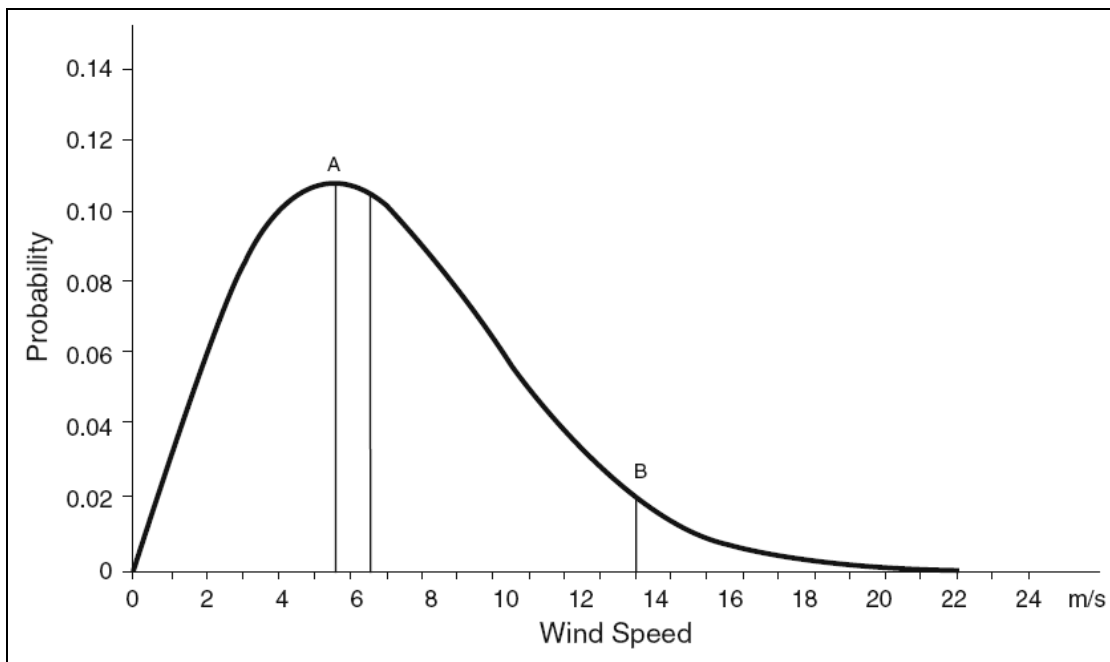
Η κατανομή Weibull ορίζεται μόνο για θετική τιμή της ταχύτητας του ανέμου. Οι άλλες ιδιότητες Weibull για τη διαφορετική τιμή του  $k$  (Jain, 2011) είναι:

- $k = 1$ , η κατανομή Weibull γίνεται εκθετική κατανομή.
- $k = 2$ , η κατανομή Weibull γίνεται κατανομή Rayleigh (Εικόνα 18).
- $k > 3$ , η κατανομή Weibull πλησιάζει μια γκαουσσιανή κατανομή.



**Εικόνα 19.** Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull για  $k = 2$  και διαφορετικές τιμές του  $A$  (Jain, 2011).

Η διακύμανση του ανέμου για μια χαρακτηριστική περιοχή περιγράφεται συνήθως χρησιμοποιώντας την αποκαλούμενη κατανομή Weibull, όπως φαίνεται στην εικόνα 20. Η συγκεκριμένη περιοχή έχει μια μέση ταχύτητα ανέμου  $7 \text{ m/s}$  και η μορφή της καμπύλης καθορίζεται για  $k = 2$ .



**Εικόνα 20.** Γράφημα κατανομής Weibull μεταξύ ταχύτητας ανέμου και πιθανότητας (Wagner & Mathur, 2009).

Μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι η παρούσα γραφική παράσταση είναι μια κατανομή πιθανότητας. Η περιοχή κάτω από την καμπύλη είναι πάντα ακριβώς 1, καθώς η πιθανότητα ότι ο άνεμος θα πνέει με κάποια ταχύτητα ανέμου πρέπει να είναι 100%.

Η μισή από την περιοχή είναι αριστερά της κάθετης μαύρης γραμμής στα 6,6 m/s και η άλλη μισή είναι στη δεξιά πλευρά του. Τα 6,6 m/s καλούνται διάμεσος της κατανομής όπως φαίνεται παρακάτω. Από την μία περιοχή στην άλλη, η τιμή της διαμέσου είναι διαφορετική. Για την μία περιοχή, σημαίνει ότι μισό χρόνο ο άνεμος θα πνέει λιγότερο από 6,6 m/s, ενώ το άλλο μισό θα πνέει γρηγορότερα από 6,6 m/s. Όπως μπορεί να δει κανείς, η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου είναι ασύμμετρη. Μερικές φορές θα υπάρξουν πολύ υψηλές ταχύτητες ανέμου, αλλά είναι πολύ σπάνιο. Οι ταχύτητες ανέμου 5,5 m/s, από την άλλη πλευρά, είναι οι πιο συνηθισμένες. Η στατιστική κατανομή της ταχύτητας του ανέμου ποικίλλει από τόπο σε τόπο σε όλη την υδρόγειο, ανάλογα με τις τοπικές κλιματικές συνθήκες, το τοπίο και την επιφάνειά της.

Η κατανομή Weibull μπορεί να ποικίλει από τόπο σε τόπο και στη μορφή της και στη τιμή της διαμέσου. Υπάρχουν δύο παράμετροι που καθορίζουν τη μορφή της καμπύλης της κατανομής Weibull, δηλαδή, η παράμετρος κλίμακας  $A$  και η παράμετρος μορφής  $k$ . Μια υψηλότερη τιμή της παραμέτρου κλίμακας σημαίνει ότι η κατανομή είναι κατανεμημένη σε ένα ευρύτερο φάσμα και η πιθανότητα της μέσης ταχύτητας του ανέμου έχει υψηλότερη τιμή. Μια υψηλότερη τιμή της παραμέτρου μορφής (μεταξύ 2 και 3) σημαίνει ότι η κατανομή είναι πιο ασύμμετρη προς τις ταχύτητες υψηλότερου ανέμου, εάν η παράμετρος μορφής είναι μεταξύ 1 και 2, αυτό σημαίνει ότι η κατανομή είναι ασύμμετρη προς τις χαμηλότερες ταχύτητες, που δείχνουν μια μεγαλύτερη πιθανότητα των χαμηλότερων ταχυτήτων ανέμου. Φυσικά και οι δύο αυτές παράμετροι επηρεάζουν την κορυφή της καμπύλης της κατανομής, αλλά κάποια έχει σημαντική επιρροή στη μέση τιμή και η άλλη επηρεάζει πρώτιστα την ασυμμετρία της καμπύλης. Για μία ακριβή αίσθηση της καμπύλης και οι δύο θα πρέπει να εξετάζονται από κοινού.

Εάν η παράμετρος μορφής είναι ακριβώς 2, η κατανομή είναι γνωστή ως κατανομή Rayleigh. Οι κατασκευαστές ανεμογεννητριών δίνουν συχνά τους τυποποιημένα στοιχεία απόδοσης για τις μηχανήματα τους χρησιμοποιώντας την κατανομή Rayleigh (Wagner & Mathur, 2009).

Ο λόγος για τον οποίο πρόκειται να λαμβάνονται προσεκτικά οι ταχύτητες του ανέμου είναι η ενέργεια που περιέχουν. Η αιολική ενέργεια ποικίλλει με τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Ο σχεδιασμός/επιλογή μιας ανεμογεννήτριας σύμφωνα με τη μαθηματική μέση ταχύτητα του ανέμου μπορεί να οδηγήσει σε μη κατάλληλη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού στην περιοχή. Στην εικόνα 20, παρουσιάστηκαν δύο όροι ο Α και ο Β, ο ένας αντιστοιχεί στη μέγιστη ταχύτητα δηλαδή 5,5 m/s που έχει μια πιθανότητα 11% και ο άλλος με ταχύτητα 14 m/s που έχει μια πιθανότητα 2% μπορούν να συγκριθούν. Λόγω της εξάρτησης της ισχύος από τον κύβο της ταχύτητας, σε αυτές τις δύο ταχύτητες 5,5 m/s και 14 m/s, η διαφορά μεταξύ των κύβων τους, δηλαδή μεταξύ 166 και 2.744, είναι τεράστια. Γεγονός που σημαίνει ότι στην υψηλή ταχύτητα 14 m/s, περισσότερες από 16 φορές η ισχύς είναι διαθέσιμη αλλά μόνο κατά τη διάρκεια 2%, ενώ για μια μεγάλη διάρκεια 11% μόνο μικρή ποσότητας της ενέργειας είναι διαθέσιμη. Εάν η ανεμογεννήτρια επιλεγόταν σύμφωνα με την ταχύτητα ανέμου των 14 m/s, θα παρέμενε μη χρησιμοποιημένη δεδομένου ότι η πιθανότητα της παρουσίας μικρότερων ταχυτήτων ανέμου είναι πολύ μεγαλύτερη (Wagner & Mathur, 2009).

## 5. Μεθοδολογία και Δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν

### 5.1. Μέθοδος εκτίμησης μέσου αιολικού δυναμικού

Στο προηγούμενο κεφάλαιο (βλέπε κεφάλαιο 4.1) αναπτύχθηκε λεπτομερώς η θεωρητική εκτίμηση του αιολικού δυναμικού, επομένως σύμφωνα με τη εξίσωση (3) η θεωρητική αιολική ισχύς είναι:

$$P = \frac{1}{2} \rho A u^3. \quad (20)$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του αέρα ( $1.225 \text{ kg/m}^3$ ),  $A$  η επιφάνεια αναφοράς ( $\text{m}^2$ ) και  $u$  η ταχύτητα του ανέμου ( $\text{m/s}$ ). Ο υπολογισμός της αιολικής ενέργειας που πραγματοποιείται ανά μονάδα επιφανείας (δηλαδή  $A = 1\text{m}^2$ ) είναι:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho u^3. \quad (21)$$

Τελικά, για τον υπολογισμό του μέσου αιολικού δυναμικού  $\bar{P}$  για όλες τις διαθέσιμες μετρήσεις, χρησιμοποιήσαμε την ακόλουθη σχέση:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{P_i}{A}}{N}, \quad (22)$$

όπου  $N$  είναι ο συνολικός αριθμός ανεμολογικών μετρήσεων.

### 5.2. Μετεωρολογικά δεδομένα

Το σύστημα ΠΟΣΕΙΔΩΝ έχει εγκαταστήσει στο Αιγαίο δίκτυο μετρητικών σταθμών τύπου Sea Watch. Κάθε σταθμός Sea Watch είναι εφοδιασμένος με μετεωρολογικούς αισθητήρες (θερμοκρασία, ατμοσφαιρική πίεση, διεύθυνση ανέμου, ταχύτητα και ριπή ανέμου), αισθητήρα μέτρησης κυματικών παραμέτρων (Seatex MRU-Motion Reference Unit), ακουστικό ρευματογράφο σε βάθος τριών 3m με επιπλέον αισθητήρες θερμοκρασίας και αλατότητας. Η ενέργεια του εξασφαλίζεται από ηλιακές κυψέλες και επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Η συλλογή των δεδομένων γίνεται κάθε τρεις ώρες και ακολουθεί η αποστολή τους με το δορυφορικό σύστημα



Inmarsat-C και με κινητή τηλεφωνία GSM. Το δορυφορικό σύστημα έχει παγκόσμια κάλυψη και μεγάλη αξιοπιστία. Το πλεονέκτημα της κινητής τηλεφωνίας είναι η δυνατότητα μεταφοράς του πλήρους σετ δεδομένων αλλά το σύστημα λειτουργεί μόνο όπου υπάρχει σχετική κάλυψη. Το δίκτυο είναι σε λειτουργία από τις αρχές του 1999 και κάθε 3-4 μήνες πραγματοποιείται η συντήρηση του από το ωκεανογραφικό σκάφος Αιγαίο (Νίττης & Χρόνης, 2003).

Ανεμολογικά δεδομένα: Τα ανεμολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού συνίστανται σε χρονοσειρές της ταχύτητας ανέμου, διεύθυνσης ανέμου και ριπής ανέμου καλύπτοντας μια περίοδο που κυμαίνεται από 5 έως 12 χρόνια (1999-2011). Οι μετρήσεις ανέμου έχουν διάρκεια καταγραφής 600s και διενεργούνται κάθε 3 ώρες. Ειδικότερα, οι μετρήσεις έχουν αποκτηθεί από 5 πλωτούς μετρητικούς σταθμούς (buoys) του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ, οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στις περιοχές βαθέων υδάτων: Άθως [39.9635° B, 24.7226° A], Μύκονος [37.5113° B, 25.4590° A], E1M3A [35.7860° B, 24.9199° A], Πύλος [36.8359° B, 21.6113° A] και Ζάκυνθος [37.9541° B, 20.6104° A].

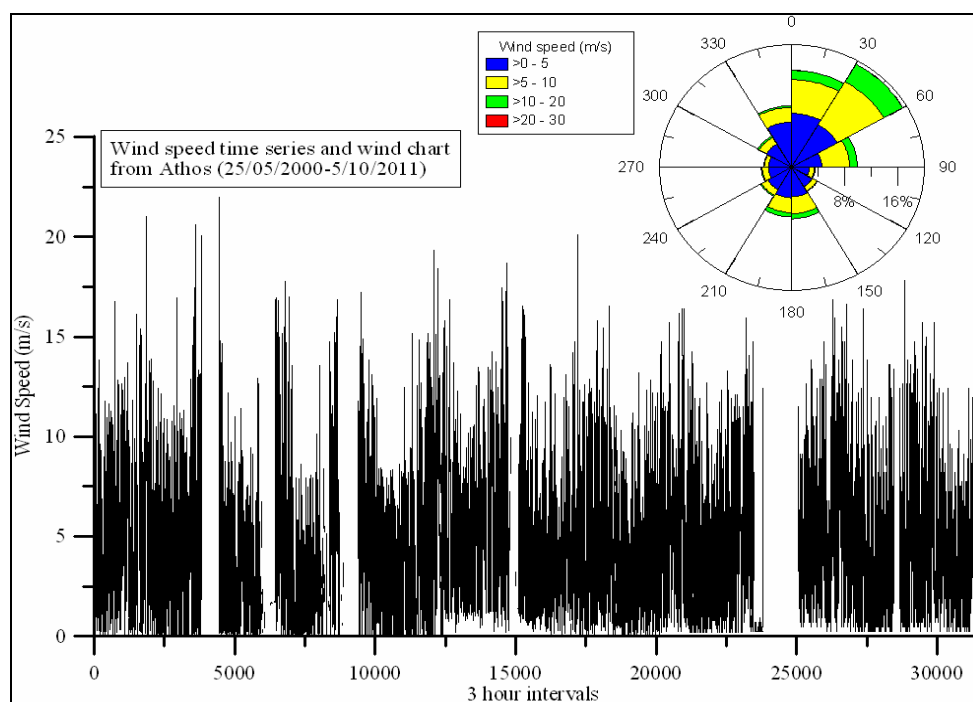


Εικόνα 21. Μετρητικοί σταθμοί (buoys) συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ.

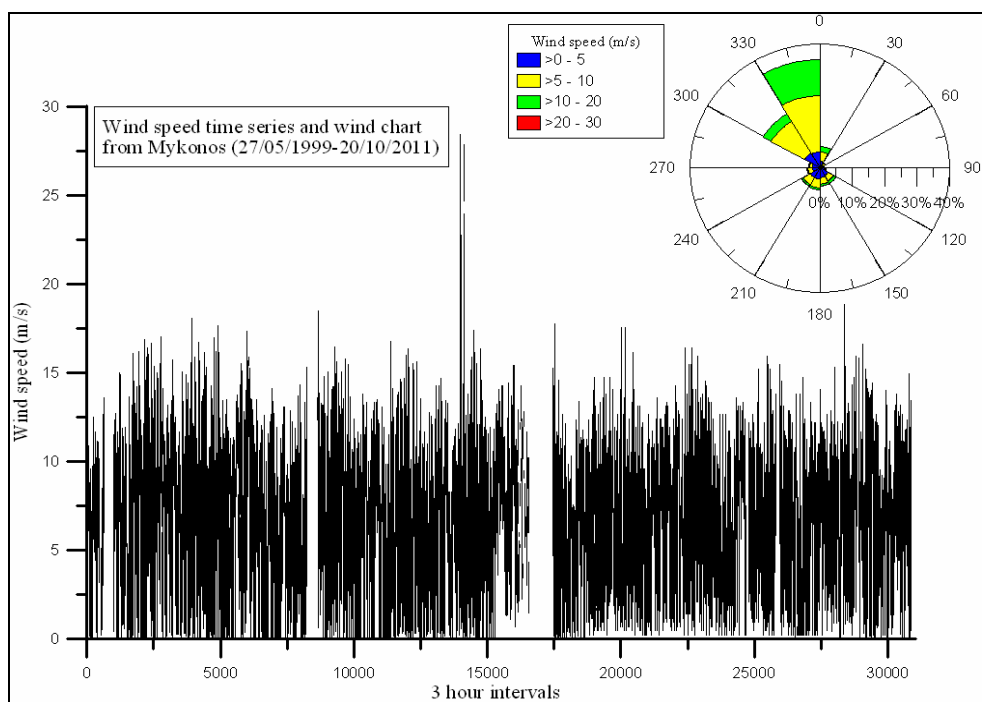
### 5.3. Ανάλυση ανεμολογικών δεδομένων

Αρχικά πραγματοποιήθηκε διόρθωση και φιλτράρισμα των ληφθέντων δεδομένων, δηλαδή έγινε απαλοιφή των αρνητικών, μηδενικών και ακραίων τιμών που περιέχονταν σ' αυτά. Ακόμα, απερρίφθησαν οι μήνες στους οποίους υπήρχαν μετρήσεις κάτω από 10 ημέρες. Στη συνέχεια, από τα διορθωμένα δεδομένα δημιουργήθηκαν ροδογράμματα (για κάθε μετρητικό σταθμό) με την βοήθεια του λογισμικού πακέτου *Grapher 7*. Τα ροδογράμματα που δημιουργήθηκαν περιέχουν την διεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου.

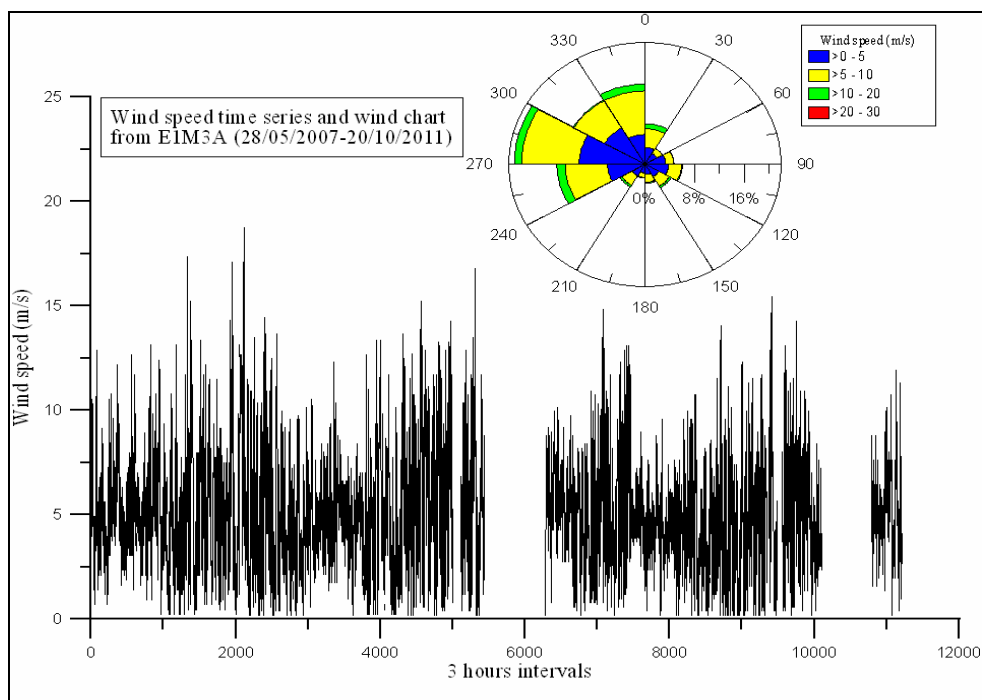
Στη συνέχεια, ακολουθούν διαγράμματα που απεικονίζουν τις χρονοσειρές της ταχύτητας ανέμου για τις πέντε περιοχές μελέτης: Άθως (Εικόνα 22), Μύκονος (Εικόνα 23), Ε1Μ3Α (Εικόνα 24), Πύλος (Εικόνα 25) και Ζάκυνθος (Εικόνα 26). Παράλληλα, απεικονίζονται και ροδογράμματα από τα ανεμολογικά δεδομένα που περιέχουν την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου.



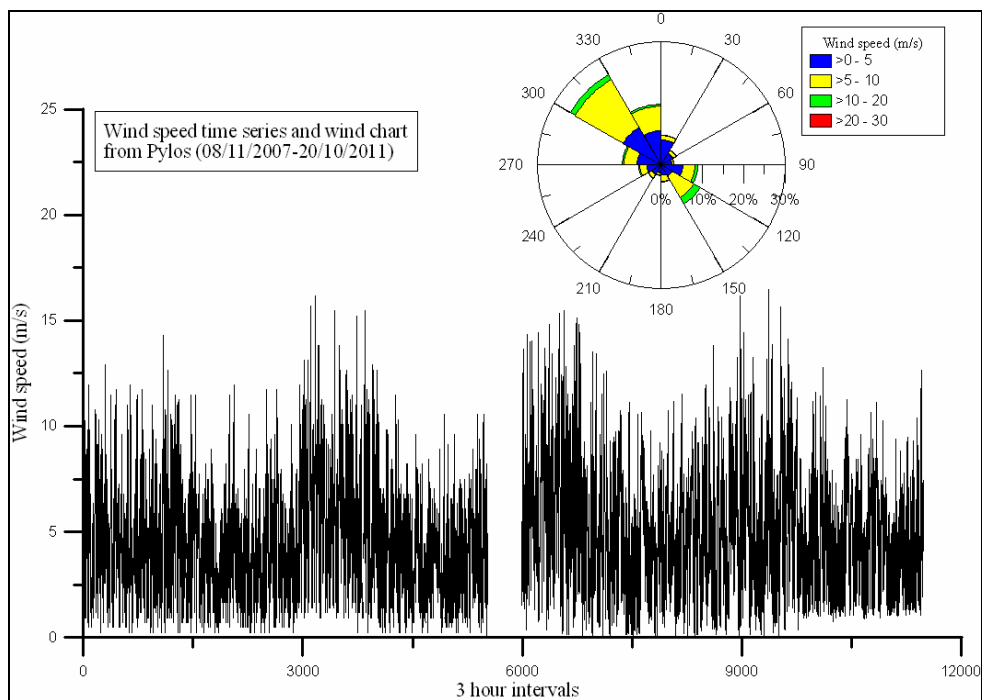
Εικόνα 22. Διάγραμμα χρονοσειράς της ταχύτητας ανέμου και το αντίστοιχο ροδογράμμα για τον σταθμό Άθως.



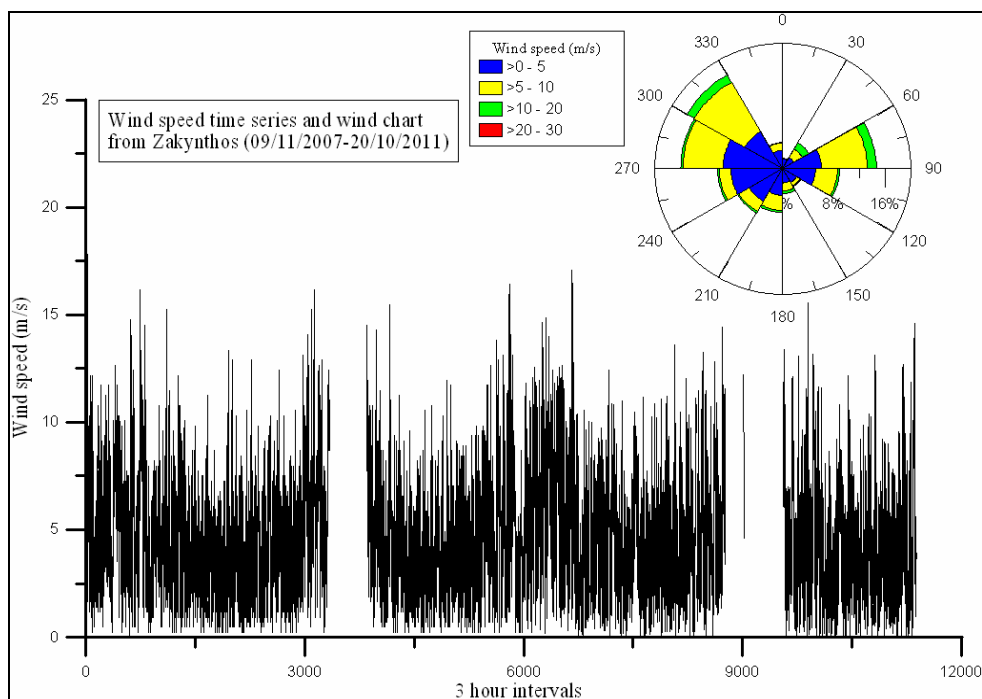
Εικόνα 23. Διάγραμμα χρονοσειράς της ταχύτητας ανέμου και το αντίστοιχο ροδόγραμμα για τον σταθμό Μύκονος.



Εικόνα 24. Διάγραμμα χρονοσειράς της ταχύτητας ανέμου και το αντίστοιχο ροδόγραμμα για τον σταθμό EIM3A.



Εικόνα 25. Διάγραμμα χρονοσειράς της ταχύτητας ανέμου και το αντίστοιχο ροδόγραμμα για τον σταθμό Πύλος.



Εικόνα 26. Διάγραμμα χρονοσειράς της ταχύτητας ανέμου και το αντίστοιχο ροδόγραμμα για τον σταθμό Ζάκυνθος.

Από τη μελέτη των διαγραμμάτων χρονοσειράς της ταχύτητας ανέμου και των αντίστοιχων ροδογραμμάτων, στον σταθμό Άθως (Εικόνα 21), παρατηρήθηκε ότι οι

BA και BBA άνεμοι είναι συχνότεροι και εντονότεροι και μπορεί να φτάσουν τα 21.96 m/sec, σε αντίθεση με της μικρότερης έντασης N και NA ανέμους που κυμαίνονται κυρίως μεταξύ 5-10 m/sec. Στον σταθμό της Μυκόνου (Εικόνα 23), επικρατούν κυρίως άνεμοι διεύθυνσης BBΔ και ΒΔ, η υψηλότερη ένταση των οποίων μπορεί να φτάσει ακόμη και τα 28.49 m/sec (ή 22.75 m/sec). Επίσης εμφανίζονται με πολύ μικρή συχνότητα NΝΔ, N και NΝΑ διεύθυνσης άνεμοι. Στον επόμενο σταθμό Ε1Μ3Α (Εικόνα 24), εμφανίστηκε μεγαλύτερη διασπορά των διευθύνσεων ανέμου Β, BBΔ, ΒΔ, ΔΒΔ, Δ και ΔΝΔ, με επικρατούντες τους ΔΒΔ ανέμους εντάσεως 5-15 m/sec. Αξιοσημείωτο, είναι ότι η μέγιστη καταγεγραμμένη ταχύτητα ανέμου 18.75 m/sec, εμφανίστηκε στους λιγότερο συχνούς BBA ανέμους. Στον σταθμό της Πύλου (Εικόνα 25), εκτός από τους συχνότερους ΒΔ και BBΔ ανέμους εντάσεως 5-15 m/sec, εμφανίζονται συχνά έντονοι ΝΑ άνεμοι η ένταση των οποίων μπορεί να φτάσει τα 16.46 m/sec. Τέλος στον σταθμό της Ζακύνθου (Εικόνα 26), επικρατούν συχνότερα και εντονότερα ΑΒΑ, ΔΒΔ και ΒΔ άνεμοι εντάσεως μέχρι 17.81 m/sec, αλλά επίσης παρουσιάζονται και με μικρή συχνότητα ΑΝΑ, ΝΝΔ, ΝΔ και ΔΝΔ άνεμοι.

Επιπρόσθετα, από τα φιλτραρισμένα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, με την βοήθεια του λογισμικού πακέτου *Matlab R2009a* έγινε υπολογισμός του μέσου μηνιαίου και ετήσιου αιολικού δυναμικού. Για την αξιοποίηση των δεδομένων όλων των χρόνων, δημιουργήθηκαν διαγράμματα που απεικονίζουν τη μέση τιμή ανά μήνα της αιολικής ενέργειας, για κάθε μία από τις πέντε περιοχές μελέτης που βρίσκονται στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο.

#### **5.4. Σύγκριση ‘μοντέλου’ – ‘επιτόπιες μετρήσεις’**

Το ατμοσφαιρικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία των ανεμολογικών δεδομένων βασίστηκε σε ένα βελτιωμένο μη-υδροστατικό μοντέλο SKIRON-ETA με χωρική ανάλυση  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  (περίπου  $9 \times 11$  km) και χρονικό βήμα της αριθμητικής ολοκλήρωσης 36 sec. Στο πεδίο του μοντέλου περιλαμβάνονται το σύνολο της Μεσογείου και της Μαύρης θάλασσας (για περαιτέρω ανάλυση της λειτουργίας του μοντέλου βλέπε Soukissian et al., 2008). Η χρήση των δορυφορικών δεδομένων (με σκοπό την διόρθωση των αποτελεσμάτων του μοντέλου) για τον ελληνικό θαλάσσιο χώρο με την πολύπλοκη ορογραφία και την παρουσία νησιωτικών συμπλεγμάτων θα είχε οδηγήσει σε σημαντικές στατιστικές αβεβαιότητες. Κατά

συνέπεια, η βαθμολόγηση ή διόρθωση των αποτελεσμάτων του μοντέλου βασίστηκε στις επιτόπιες μετρήσεις των πλωτήρων και παρήχθη μια «μέση» σχέση διόρθωσης για όλο τον ελληνικό θαλάσσιο χώρο. Η διόρθωση αυτή βελτιώνει ομοιόμορφα τα αποτελέσματα του μοντέλου σε όλη την περιοχή μελέτης. Η τελική σχέση που χρησιμοποιήθηκε για τη διόρθωση της ταχύτητας ανέμου ( $m / s$ ) του μοντέλου, ήταν η ακόλουθη:

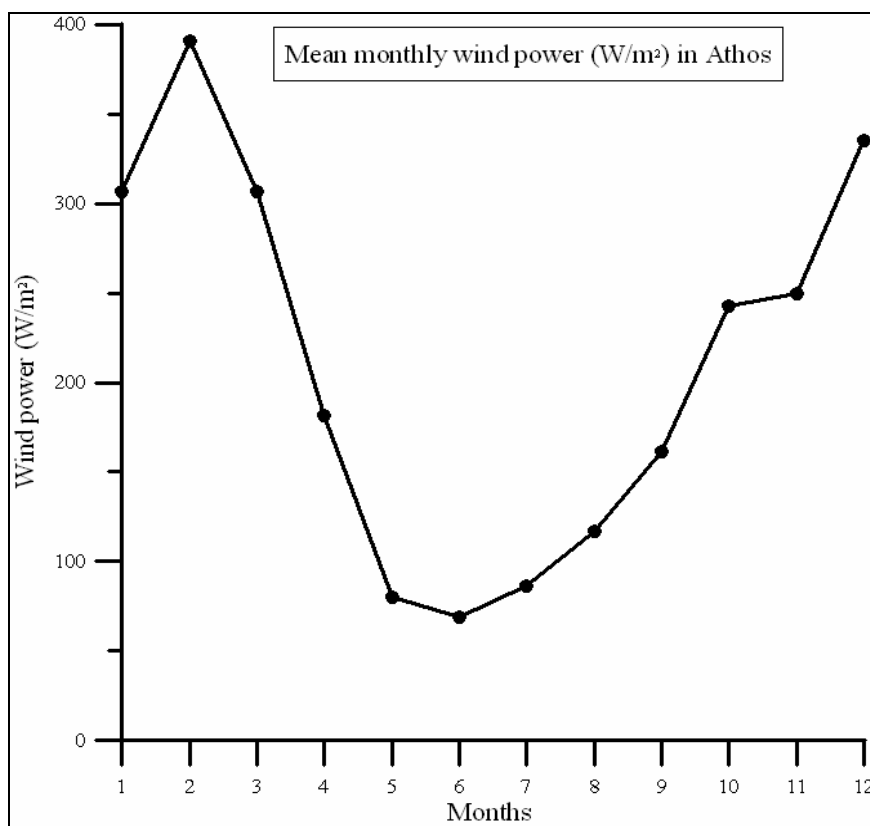
$$\hat{U}_{W,WAM} = 1.06U_{W,WAM} \quad (23)$$

Τα ανεμολογικά αποτελέσματα του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού συνίστανται σε χρονοσειρές 10 χρόνων (1995 έως 2004) της ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου. Τα αποτελέσματα του μοντέλου παράγονται ανά 3 ώρες. Στην παρούσα μελέτη δεν πραγματοποιήθηκε διόρθωση των αποτελεσμάτων του μοντέλου όπως αναφέρθηκε παραπάνω, έχοντας ως σκοπό να αποτυπωθούν καλύτερα οι στατιστικές διαφορές (αν υπάρχουν) κατά την σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τις επιτόπιες μετρήσεις.

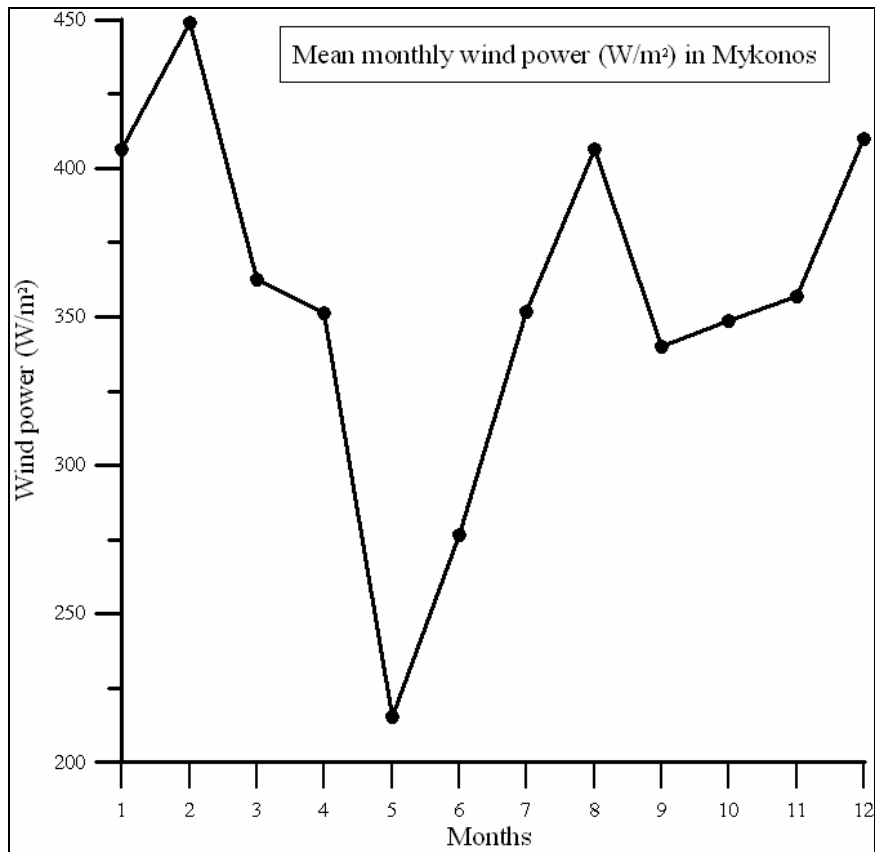
Στην συνέχεια για τον υπολογισμό του μέσου μηνιαίου και ετήσιου αιολικού δυναμικού, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία όπως και στα δεδομένα των επιτόπιων μετρήσεων. Τέλος, δημιουργήθηκαν διαγράμματα που απεικονίζουν τη μέση τιμή ανά μήνα της αιολικής ενέργειας του μοντέλου, αλλά και των επιτόπιων μετρήσεων, έτσι ώστε να γίνει η σύγκριση μεταξύ τους. Συγκεκριμένα για την σύγκριση επιλέχθηκαν οι περιοχές μελέτης Άθως, Μύκονος, Πύλος και Ζάκυνθος.

## 6. Εκτίμηση αιολικού δυναμικού στον Ελληνικό θαλάσσιο χώρο

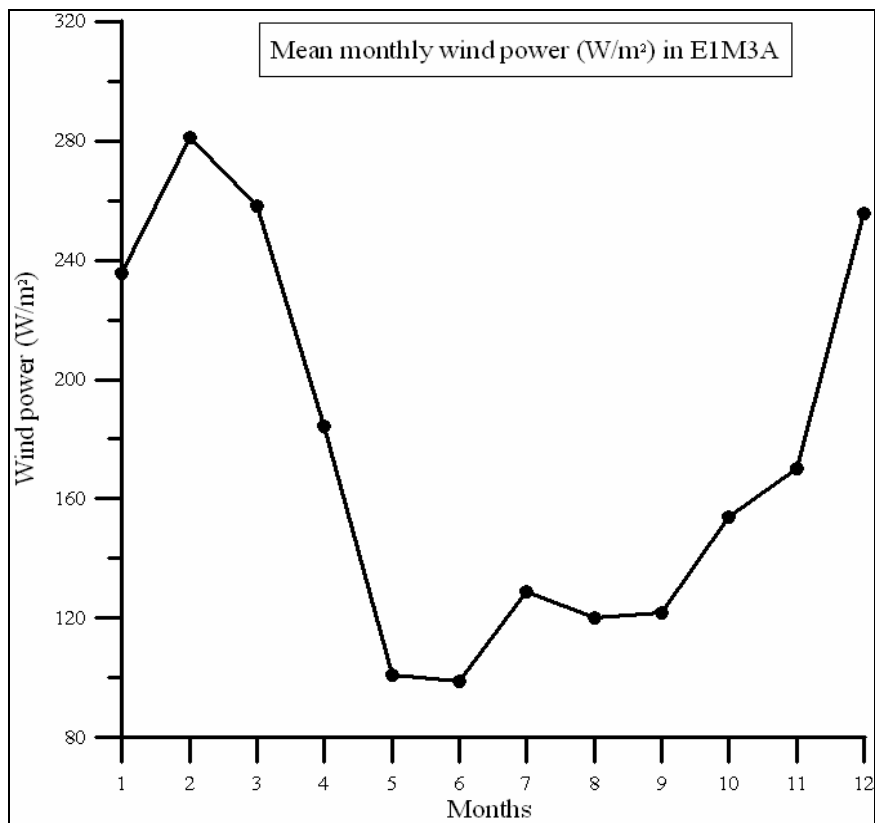
Από τα φιλτραρισμένα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, έγινε υπολογισμός του μέσου μηνιαίου και ετήσιου αιολικού δυναμικού. Για την αξιοποίηση των δεδομένων όλων των χρόνων, δημιουργήθηκαν διαγράμματα που απεικονίζουν τη μέση τιμή ανά μήνα της αιολικής ενέργειας, για κάθε μία από τις πέντε περιοχές μελέτης που βρίσκονται στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο [(Εικόνα 27), (Εικόνα 28), (Εικόνα 29), (Εικόνα 30), (Εικόνα 31)].



Εικόνα 27. Μέση μηνιαία διακύμανση αιολικής ενέργειας για την περίοδο 2000-2011 στον σταθμό Αθως.

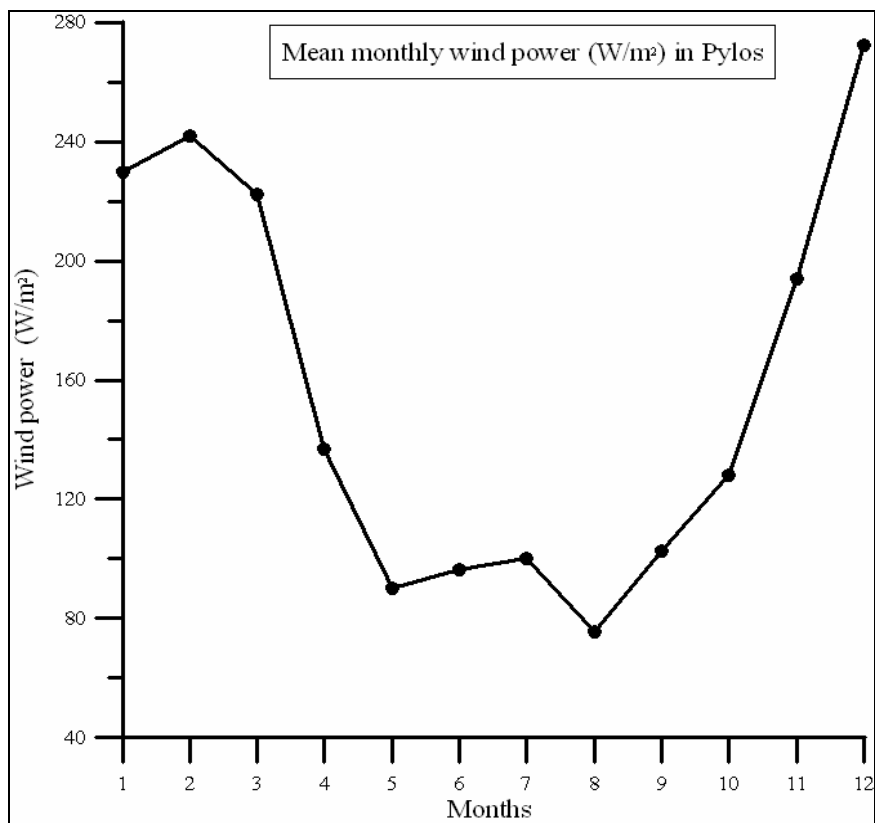


Εικόνα 28. Μέση μηνιαία διακόμανση αιολικής ενέργειας για την περίοδο 1999-2011 στον σταθμό Μύκονος.

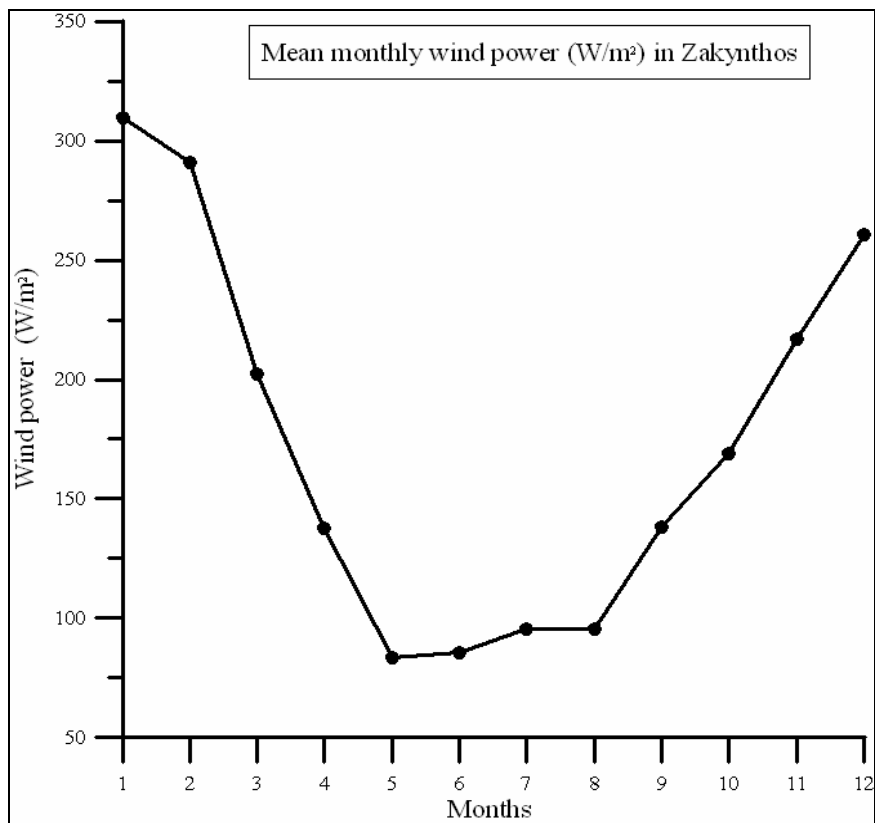


Εικόνα 29. Μέση μηνιαία διακόμανση αιολικής ενέργειας για την περίοδο 2007-2011 στον σταθμό E1M3A.





Εικόνα 30. Μέση μηνιαία διακύμανση αιολικής ενέργειας για την περίοδο 2007-2011 στον σταθμό Πύλος.

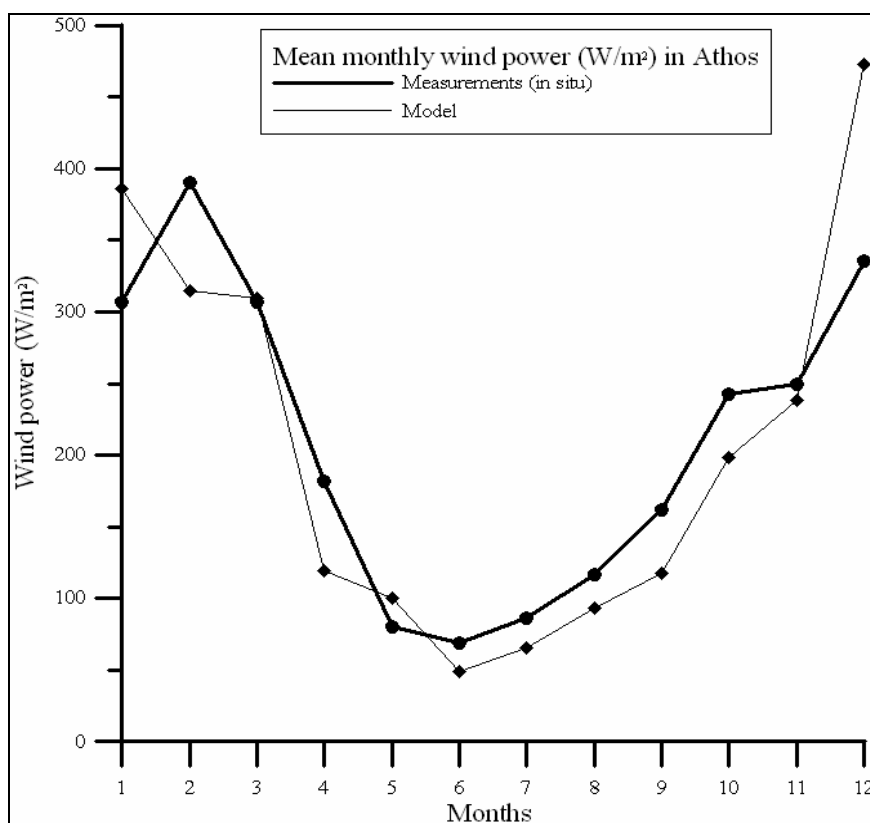


Εικόνα 31. Μέση μηνιαία διακύμανση αιολικής ενέργειας για την περίοδο 2007-2011 στον σταθμό Ζάκυνθος.

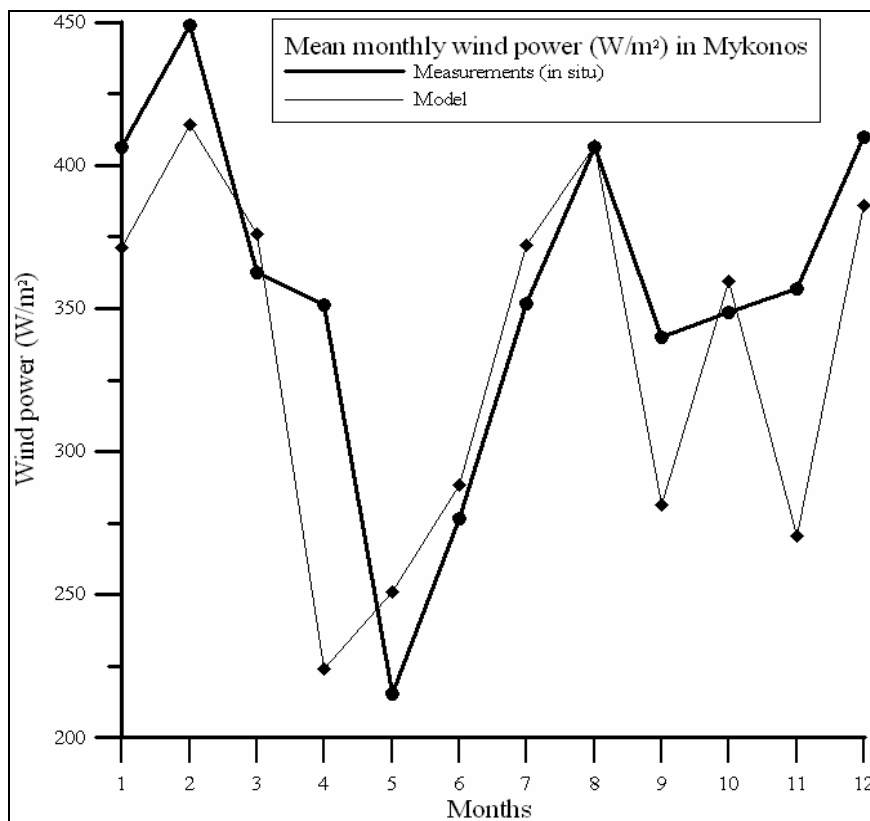
Από τις εικόνες 27 μέχρι και 31, παρατηρήθηκε ότι στο σύνολο των σταθμών, η διακύμανση του αιολικού δυναμικού ακολουθεί μια τυπική ετήσια συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, κατά τους χειμερινούς μήνες παρατηρούνται οι υψηλότερες τιμές του δυναμικού, ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες, εμφανίζονται οι χαμηλότερες τιμές. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στον σταθμό της Μυκόνου, το αιολικό δυναμικό εμφανίζει μία σημαντική αύξηση τους καλοκαιρινούς μήνες (ιδιαίτερα τον μήνα Αύγουστο), η οποία οφείλεται στην εμφάνιση των “ετήσιων” ανέμων (Μελτέμια) που πνέουν από Β-ΒΔ προς Ν-ΝΑ στο Αιγαίο πέλαγος την καλοκαιρινή περίοδο. Επιπρόσθετα, η Μύκονος αποτελεί την περιοχή μελέτης όπου παρατηρήθηκαν οι υψηλότερες τιμές αιολικής ενέργειας για την περίοδο 1999-2011.

### Σύγκριση αποτελεσμάτων ‘επιτόπιων μετρήσεων’ – ‘μοντέλου’

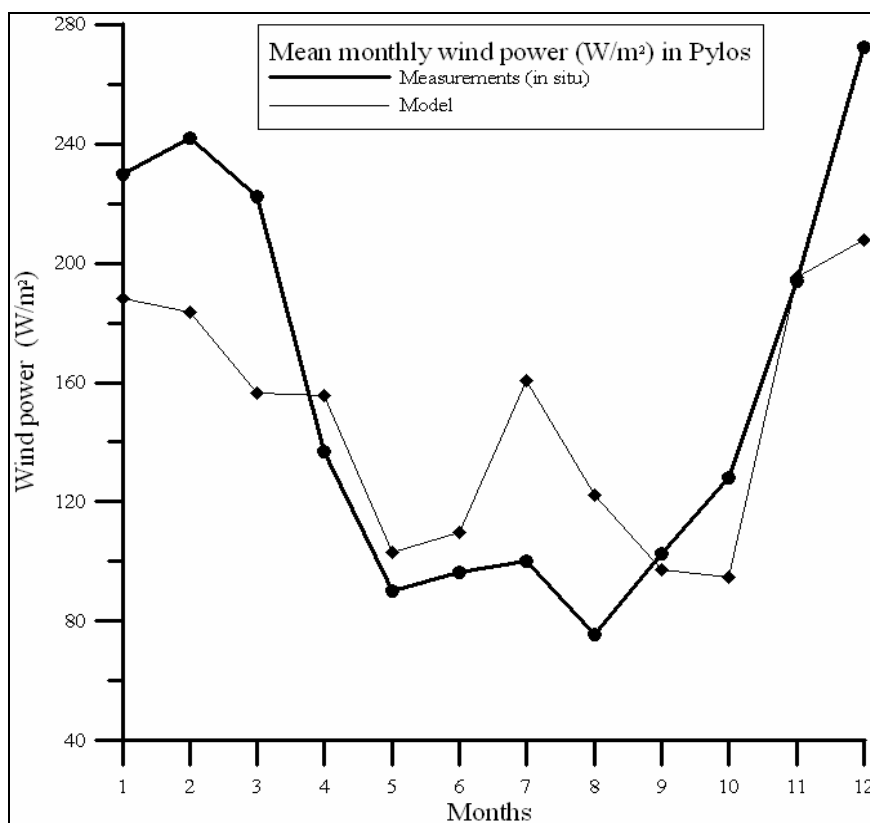
Προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσο τα αποτελέσματα του ατμοσφαιρικού μοντέλου προσεγγίζουν αυτά των επιτόπιων μετρήσεων, έγινε σύγκριση της μέσης μηνιαίας διακύμανσης αιολικής ενέργειας μεταξύ των επιτόπιων μετρήσεων και του μοντέλου.



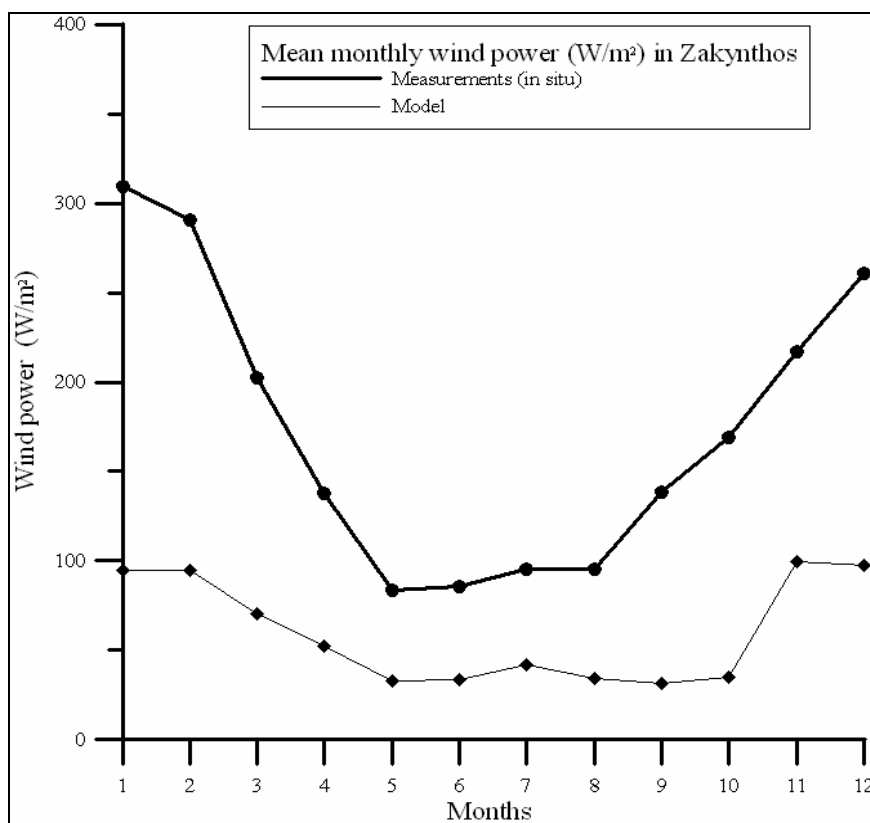
**Εικόνα 32.** Σύγκριση μέσης μηνιαίας διακύμανσης αιολικής ενέργειας μεταξύ επιτόπιων μετρήσεων (●) (2000-2011) και μοντέλου (♦) (1995-2004) για τον σταθμό Άθως.



Εικόνα 33. Σύγκριση μέσης μηνιαίας διακύμανσης αιολικής ενέργειας μεταξύ επιτόπιων μετρήσεων (●) (1999-2011) και μοντέλου (◆) (1995-2004) για τον σταθμό Μύκονος.



Εικόνα 34. Σύγκριση μέσης μηνιαίας διακύμανσης αιολικής ενέργειας μεταξύ επιτόπιων μετρήσεων (●) (2007-2011) και μοντέλου (◆) (1995-2004) για τον σταθμό Πύλος.



Εικόνα 35. Σύγκριση μέσης μηνιαίας διακύμανσης αιολικής ενέργειας μεταξύ επιτόπιων μετρήσεων (●) (2007-2011) και μοντέλου (◆) (1995-2004) για τον σταθμό Ζάκυνθος.

Η σύγκριση μας δείχνει ότι στο σύνολο των περιοχών μελέτης η διακύμανση του αιολικού δυναμικού του μοντέλου ακολουθεί και εδώ μια τυπική ετήσια συμπεριφορά. Συγκεκριμένα για τον σταθμό Άθως (Εικόνα 32), παρατηρήθηκε τον μήνα Ιανουάριο στα αποτελέσματα του μοντέλου σε σχέση με αυτά των επιτόπιων μετρήσεων, μια αύξηση των τιμών της τάξης των  $90 \text{ W/m}^2$ , ενώ τον Φεβρουάριο φαίνεται πως υπήρχε αντίστοιχη ελάττωση. Αξιοσημείωτη είναι η διαφορά που παρουσιάστηκε τον Δεκέμβριο, όπου τα αποτελέσματα που προέκυψαν με χρήση του μοντέλου παρουσίασαν αύξηση περίπου  $140 \text{ W/m}^2$ .

Στον σταθμό της Μυκόνου (Εικόνα 33), τον Ιανουάριο και Φεβρουάριο φαίνεται να υπάρχει μείωση κατά  $60 \text{ W/m}^2$  στα αποτελέσματα του μοντέλου. Σημαντική μείωση επίσης παρατηρήθηκε τον Απρίλιο στο μοντέλο τη τάξης των  $127 \text{ W/m}^2$ . Ακόμη τον Σεπτέμβριο και Δεκέμβριο συνεχίστηκε να επικρατεί μείωση περίπου  $60 \text{ W/m}^2$  και  $80 \text{ W/m}^2$  αντίστοιχα.

Στον σταθμό της Πύλου (Εικόνα 34), τους τρεις πρώτους μήνες του χρόνου το μοντέλο παρουσίασε χαμηλότερο δυναμικό από τις επιτόπιες μετρήσεις κατά  $100 \text{ W/m}^2$  (Ιανουάριο και Φεβρουάριο) και  $150 \text{ W/m}^2$  τον Μάρτιο. Στη συνέχεια

επικράτησε αύξηση περίπου  $60 \text{ W/m}^2$  τον Ιούλιο και  $50 \text{ W/m}^2$  τον Αύγουστο. Σε αντίθεση, ακολούθησε μείωση  $34 \text{ W/m}^2$  και  $65 \text{ W/m}^2$ , τον Οκτώβριο και Δεκέμβριο αντίστοιχα.

Τέλος, στον σταθμό της Ζακύνθου (Εικόνα 35), φάνηκε να επικρατεί ιδιαίτερα σημαντική μείωση του δυναμικού της αιολική ενέργειας του μοντέλου σε σχέση με αυτό των επιτόπιων μετρήσεων. Ειδικότερα, τους χειμερινούς μήνες παρατηρήθηκαν οι μεγαλύτερες μειώσεις που έφτασαν μέχρι και τα  $200 \text{ W/m}^2$  περίπου. Σε αντίθεση για τους μήνες Μάιο έως Αύγουστο οι τιμές μειώθηκαν περίπου κατά  $50 \text{ W/m}^2$ . Η μεγάλη αυτή διαφορά στην διακύμανση της μέσης μηνιαίας αιολικής ενέργειας που παρουσιάστηκε μεταξύ μοντέλου και επιτόπιων μετρήσεων, δεν μπορεί να αποδοθεί σε συγκεκριμένα αίτια. Επομένως, τα αποτελέσματα του μοντέλου για την περιοχή μελέτης της Ζακύνθου αποτελούν αντικείμενο για περαιτέρω διερεύνηση.

## **7. Προβλήματα που σχετίζονται με την λειτουργία αιολικών πάρκων στην Ελλάδα**

Η αιολική ενέργεια είναι μια από τις καθαρότερες και πιο φιλικές προς το περιβάλλον πηγές ενέργειας ([www.ewea.org](http://www.ewea.org)). Οι ανεμογεννήτριες δεν ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα με διοξείδιο του άνθρακα, του θείου ή υδρογονάνθρακες, ούτε θα προκαλέσουν προβλήματα για τις σημερινές και επόμενες γενιές όσον αφορά τη διάθεση ραδιενεργών αποβλήτων (Hau, 2006). Ακόμη, έχει μια μακροπρόθεσμη θετική επίδραση στο περιβάλλον, μειώνοντας την απειλή της κλιματικής αλλαγής που αποτελεί τη μεγαλύτερη απειλή για τη βιοποικιλότητα ([www.ewea.org](http://www.ewea.org)).

Σε αντίθεση με τις μεγάλες συμβατικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ανεμογεννητριών επηρεάζουν μόνο το άμεσο περιβάλλον τους (Hau, 2006). Σε τοπικό επίπεδο, η αιολική ενέργεια μπορεί επίσης να έχει θετικές επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα και προσφέρει μια ευκαιρία για να ασκηθεί οικολογική αποκατάσταση χερσαία και υπεράκτια, όπως δημιουργία νέας βλάστησης και βιοτόπων ζώων, βελτίωση αλιευτικών αποθεμάτων και άλλων θαλασσίων ειδών ([www.ewea.org](http://www.ewea.org)). Παρ' όλα αυτά, ακόμη και η λειτουργία των ανεμογεννητριών δεν γίνεται χωρίς επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Πιθανές τοπικές αρνητικές επιπτώσεις είναι πολύ περιορισμένες, χαμηλές σε ένταση και σε συγκεκριμένο χώρο. Οι πιθανές επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι οι ακόλουθες: ο θόρυβος, αισθητική/οπτική όχληση, η θανάτωση πτηνών σε περιορισμένο βαθμό, οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (στη συχνότητα ραδιοφώνου ή τηλεόρασης) και στα ραντάρ μεγάλης εμβέλειας (Jain, 2011). Οι αρνητικές αυτές επιδράσεις μπορούν να αποφευχθούν και να ελαχιστοποιηθούν με προσεκτικό σχεδιασμό και χωροθέτηση, μετριάζοντας ή αντισταθμίζοντας. Πράγματι, οι σχεδιαστές των αιολικών πάρκων απαιτείται να αναλαμβάνουν τη μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων, εκτιμώντας όλες τις πιθανές σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον πριν την έναρξη των κατασκευών.

Για τα υπεράκτια αιολικά συστήματα, πρέπει επίσης να εξεταστούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον και τη θαλάσσια ζωή (συμπεριλαμβανομένων των ευάλωτων ειδών). Επομένως, οι περιβαλλοντικές επιδράσεις στα πουλιά, τα ψάρια, τα θαλάσσια θηλαστικά, τα βενθικά φυτά και ζώα πρέπει να αντιμετωπιστούν όσον αφορά τα θαλάσσια αιολικά πάρκα. Προς το παρόν, οι δημοσιευμένες μελέτες σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υπεράκτιων

αιολικών συστημάτων είναι περιορισμένες, με εξαίρεση ορισμένες πρόσφατες μελέτες στη Γερμανία (Koller et al., 2006) και τη Δανία (Operate A/S, 2006). Στην εργασία της Δανίας, από εμπειριστατωμένη μελέτη δύο θαλάσσιων αιολικών πάρκων της Δανίας, προκύπτει το συμπέρασμα ότι υπήρχαν σχεδόν μηδενικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στα πουλιά, τα ψάρια και τα θηλαστικά (Manwell et al., 2009).

Στις επόμενες ενότητες (7.1 μέχρι και 7.4) δίνεται έμφαση στις αρνητικές επιπτώσεις που μπορεί να προκαλέσει η εγκατάσταση και λειτουργία των ανεμογεννητριών στα αιολικά πάρκα (χερσαία και θαλάσσια). Ενώ, στην τελευταία ενότητα (7.5) αποτυπώνονται στους πίνακες οι πιθανές περιβαλλοντικές επιδράσεις των θαλάσσιων αιολικών πάρκων.

### **7.1. Προβλήματα θορύβου των ανεμογεννητριών**

Ο θόρυβος είναι μια μορφή ρύπανσης που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες. Ωστόσο, η επίδραση του ήχου περιορίζεται σε μερικές εκατοντάδες μέτρα από τη βάση μιας ανεμογεννήτριας. Ο θόρυβος που παράγεται από την ανεμογεννήτρια προέρχεται από δύο βασικές πηγές:

- Αεροδυναμικός θόρυβος που προέρχεται από τη ροή του ανέμου γύρω από τα πτερύγια του ρότορα. Ένας μεγάλος αριθμός πολύπλοκων φαινομένων ροής παράγει αυτό το είδος θορύβου, ο οποίος αυξάνεται γενικά με την ταχύτητα ή με αναλογία την ταχυτήτων. Έχει ευρείας ζώνης χαρακτήρα και αποτελεί τυπικά τη μεγαλύτερη πηγή θορύβου των ανεμογεννητριών (Manwell et al., 2009).
- Μηχανικοί θόρυβοι που προέρχονται από διαφορετικά τμήματα της ανεμογεννήτριας, όπως το κιβώτιο ταχυτήτων, η ηλεκτρογεννήτρια, κλπ (Jain, 2011). Δεδομένου ότι ο εκπεμπόμενος θόρυβος συνδέεται με την εναλλαγή του μηχανικού και ηλεκτρικού εξοπλισμού, τείνει να είναι τονικός (κοινής συχνότητας) στο χαρακτήρα, αν και μπορεί να έχει ένα στοιχείο ευρείας ζώνης. Για παράδειγμα, τόνος μιας συχνότητας μπορεί να εκπέμπεται από την εναλλασσόμενες συχνότητες της ατράκτου και της ηλεκτρογεννήτριας, καθώς και απ' το συνδυασμό συχνοτήτων των ταχυτήτων. Επιπλέον, το κεντρικό σημείο του ρότορα (hub), ο ρότορας και ο πύργος μπορούν να δράσουν ως

ηχεία, μεταβιβάζοντας τον μηχανικό θόρυβο και εκπέμποντας τον (Manwell et al., 2009).

Ο θόρυβος που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες έχει μειωθεί καθώς η τεχνολογία έχει βελτιωθεί. Συγκεκριμένα, οι στρατηγικές για την μείωση του επιπέδου του αεροδυναμικού θορύβου περιλαμβάνουν: i) χρήση μικρότερου μήκους πτερυγίων, όταν εγκαθίστανται σε περιοχές ευαίσθητες στον θόρυβο και ii) βελτιώσεις στον σχεδιασμό των πτερυγίων και καθορισμό της ανεμογεννήτριας ρυθμίζοντας τον ρότορα σε χαμηλότερες περιστροφές ανά λεπτό. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες διαθέτουν κλίμακες, έχοντας τέτοιου είδους δυνατότητες (Jain, 2011). Επειδή ο μηχανικός θόρυβος, σε αντίθεση με τον αεροδυναμικό θόρυβο, μπορεί να αποφευχθεί ή σε μεγάλο βαθμό να αποσβένεται, πρέπει να θεωρηθεί ως ένδειξη ανεπαρκούς σχεδιασμού (Hau, 2006). Η πρώτη προτεραιότητα είναι να δοθεί προσοχή στην εκπομπή θορύβου του κιβώτιου ταχυτήτων. Πρακτικά δεν υπάρχουν αθόρυβα κιβώτια ταχυτήτων, επομένως, ο ήχος που διαδίδεται μέσω του αέρα, πρέπει να παρακρατηθεί με κατάλληλη ηχομόνωση της ατράκτου. Επίσης, για διορθωτικούς λόγους, το κιβώτιο ταχυτήτων πρέπει να είναι σταθερά συνδεδεμένο με την δομή της ατράκτου, η οποία με την σειρά της, πρέπει να είναι σταθερά συνδεδεμένη με τον πύργο (Hau, 2006).

Ο ήχος (θόρυβος) των ανεμογεννητριών γίνεται αντιληπτός σε απόσταση 200 m από την βάση της, το επίπεδο του οποίου είναι μικρότερο από τον θόρυβο περιβάλλοντος μιας μικρής επαρχιακής πόλης. Βάση τη νομοθεσία οι ανεμογεννήτριες δεν πρέπει να εγκαθίστανται σε απόσταση μικρότερη των 500 m από οικισμούς, όπου πλέον το επίπεδο θορύβου είναι ακόμη μικρότερο και ισοδυναμεί με αυτό ενός ήσυχου δωματίου, με αποτέλεσμα να μην αποτελούν πηγή ενόχλησης. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, στην Ελλάδα η εγκατάσταση και λειτουργία των αιολικών πάρκων δεν έχει προκαλέσει άνοδο της στάθμης θορύβου πάνω από το επιτρεπτό όριο (και σε κατοικημένες περιοχές), αλλά και έκθεση των ανθρώπων σ' αυτή (Μπινόπουλος & Χαβιαρόπουλος, 2006).

## ***7.2. Αισθητικά/οπτικά προβλήματα των ανεμογεννητριών***

Οι αισθητικές και οπτικές επιπτώσεις συγκαταλέγονται μεταξύ των πιο συχνά εκφραζόμενων ανησυχιών για την ανάπτυξη αιολικών πάρκων (Giovanello and



Karlan, 2008). Σε σύγκριση με άλλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την αιολική ενέργεια, η αισθητική/οπτική επίπτωση είναι η μικρότερη ποσοτικά (Manwell et al., 2009). Ο καθορισμός της έννοιας αρνητική οπτική επίδραση είναι άκρως υποκειμενικός, διότι εξαρτάται από τις αξίες, τις πεποιθήσεις και τις εμπειρίες των επιμέρους παρατηρητών. Οι απόψεις για την αισθητική των εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας, παρουσιάζουν διακυμάνσεις μεταξύ διαφόρων τμημάτων του πληθυσμού και από τη μία περιοχή στην άλλη (Giovanello and Karlan, 2008). Για παράδειγμα, οι αντιλήψεις των πολιτών μπορεί να αλλάξουν έχοντας επίγνωση της τεχνολογίας, της τοποθεσίας εγκατάστασης των ανεμογεννητριών, καθώς και πολλούς άλλους παράγοντες (Manwell et al., 2009). Αν και η εκτίμηση ενός φυσικού τοπίου είναι κάπως υποκειμενική, οι επαγγελματίες που εργάζονται στον τομέα αυτό εκπαιδεύονται να κάνουν κρίσεις για την οπτική επίπτωση, βάση των γνώσεων τους για τις ιδιότητες της οπτικής συγκρότησης και τον εντοπισμό στοιχείων, όπως η οπτική ευκρίνεια, η αρμονία, η ισορροπία, η εστίαση, η τάξη και η ιεράρχηση (Stanton, 1996).

Η εκτίμηση των οπτικών επιπτώσεων γίνεται βάσει τα οπτικών χαρακτηριστικών του περιβάλλοντος και του έργου. Το οπτικό περιβάλλον (context) καθορίζεται από τους ακόλουθους παράγοντες: Απόσταση των παρατηρητών από το έργο, διάρκεια θέας, οπτική γωνία, πανοραμική έναντι στενής θέας, γραφική ποιότητα θέας, σημείο εστίασης εντός της θέας, αριθμός παρατηρητών, προσδοκίες παρατηρητή, ορατότητα και καιρικές συνθήκες. Τα χαρακτηριστικά του έργου που έχουν οπτικές επιπτώσεις είναι τα εξής: Η κλίμακα του έργου σε σχέση με το περιβάλλοντα χώρο, ο αριθμός των ανεμογεννητριών εν' όψει και της οπτικής ακαταστασίας (clutter), η ορατότητα της υποδομής του έργου, ο θόρυβος και ο φωτισμός (Jain, 2011).

Μερικές τεχνικές μετριασμού που μπορούν να εφαρμοστούν στα έργα αιολικής ενέργειας είναι οι εξής (Jain, 2011):

- α. Κατάλληλη χωροθέτηση έτσι ώστε να μην ξεπερνούν τους ευαίσθητους γραφικούς πόρους.
- β. Μείωση του μεγέθους, μεταφορά ή προσαρμογή του σχεδίου διάταξης των ανεμογεννητριών για ελαχιστοποίηση των επιπτώσεων.
- γ. Ελαχιστοποίηση του φωτισμού, χρησιμοποιώντας μη ανακλαστικά υλικά, επιλογή κατάλληλων χρωμάτων, δέσμευση συντήρησης των ανεμογεννητριών έτσι ώστε να

λειτουργούν και να μην έχουν ορατά ελαττώματα όπως διαρροές λαδιού και δέσμευση για παροπλισμό των ανεμογεννητριών που δεν λειτουργούν.

δ. Σχεδίαση των υποδομών, όπως υποσταθμού και μετάδοσης με τρόπο που να κρύβεται από την θέα.

ε. Ελαχιστοποίηση της αφαίρεσης βλάστησης και του θορύβου.

### **7.3. Επιπτώσεις των ανεμογεννητριών στον πληθυσμό των πουλιών**

Οι πιθανές επιπτώσεις των αιολικών πάρκων περιλαμβάνουν θανάτωση των πουλιών από συγκρούσεις με ανεμογεννήτριες και μετεωρολογικούς πύργους. Ακόμη και με έργα ηλεκτρικής ενέργειας εν γένει, καθώς συγκρούσεις με τις γραμμές μεταφοράς μπορούν επίσης να προκύψουν (Giovanello and Kaplan, 2008). Σύμφωνα με μελέτες στις ευρωπαϊκές χώρες (Clausager & Nohr, 1996) και στις ΗΠΑ (Orloff & Flannery, 1992) οι επιπτώσεις στα πουλιά γενικά χωρίζονται στις ακόλουθες δύο κατηγορίες: α) άμεσες επιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένου του κινδύνου της σύγκρουσης και β) έμμεσες επιπτώσεις, συμπεριλαμβανομένων και άλλων διαταραχών από τις ανεμογεννήτριες όπως:

- διαταραχή της αναπαραγωγής των πουλιών,
- διαταραχή της αναζήτησης τροφής των πουλιών,
- διαταραχή/αντίκτυπο στην αποδημία και τις πτήσεις των πουλιών.

Τέτοιου είδους επιπτώσεις μπορεί να οδηγήσουν σε ολική ή μερική μετατόπιση των πουλιών από τους οικοτόπους τους και την υποβάθμιση ή την καταστροφή των οικοτόπων. Ο κίνδυνος της σύγκρουσης είναι η πιο προφανής άμεση επίπτωση και πολυάριθμες μελέτες έχουν επικεντρωθεί σε αυτή. Οι μελέτες αυτές περιλαμβάνουν την εκτίμηση του αριθμού των πουλιών που συγκρούονται με το ρότορα ή σχετικές κατασκευές και έχουν επικεντρωθεί στην ανάπτυξη μεθόδων για την ανάλυση της έκτασης των συγκρούσεων (Manwell et al., 2009).

Οι πληροφορίες που ακολουθούν είναι από την αφορά NRDC (National Research Council, 2007): 6% των θανάτων που αναφέρθηκαν είναι αρπακτικά πουλιά, άλλα είδη με υψηλότερο ποσοστό θανάτων είναι τα νυκτόβια αποδημητικά σπουργίτια. Τα είδη που αφθονούν γύρω από ανεμογεννήτριες, αλλά έχουν αναφερθεί σπάνιες περιπτώσεις θανάτων, συμπεριλαμβάνουν, κοράκια, αρπακτικά και γύπες

(Jain, 2011). Μελέτες που έχουν γίνει στην Αγγλία, την Γερμανία, τη Δανία και την Ολλανδία, υπολογίζοντας τον συνολικό αριθμό θανάτων πουλιών ετησίως, παρατήρησαν ότι μόνο 20 θάνατοι προέρχονται από τις ανεμογεννήτριες (εγκατεστημένη ισχύς 1000MW). Σε αντίθεση, 2.000 θάνατοι οφείλονται στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και τη σύγκρουση με οχήματα, ενώ ακόμη 1.500 οφείλονται στους κυνηγούς (Μπινόπουλος & Χαβιαρόπουλος, 2006).

Οι παρατηρήσεις σε διάφορες ανεμογεννήτριες έχουν δείξει ότι τα "τοπικά" πουλιά μαθαίνουν γρήγορα να αναγνωρίζουν τα εμπόδια και να πετούν γύρω από αυτά. Οι συγκριτικά αργές περιστροφές των πτερυγίων του ρότορα είναι εμφανώς αντιληπτές από αυτά. Είναι πιθανό, ωστόσο, ότι τα πτηνά χωρίς τοπική εμπειρία, δηλαδή αποδημητικά πουλιά, μπορεί να τραυματιστούν μέσω των ανεμογεννητριών. Όμως, τα κοπάδια των αποδημητικών πουλιών σπάνια πετούν σε ύψη κάτω των 200 m, με αποτέλεσμα και ο κίνδυνος αυτός, να είναι πολύ μικρός (Hau, 2006). Ωστόσο, κατά την διάρκεια σχεδιασμού και χωροθέτησης ενός αιολικού πάρκου, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ευαίσθητες οικολογικά και προστατευμένες περιοχές ώστε να προστατεύεται ο πληθυσμός των πουλιών (Μπινόπουλος & Χαβιαρόπουλος, 2006).

#### ***7.4. Πιθανά προβλήματα ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών***

Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές είναι μια ηλεκτρομαγνητική διαταραχή που διακόπτει, εμποδίζει ή υποβαθμίζει την αποτελεσματική απόδοση του ηλεκτρονικού ή ηλεκτρικού εξοπλισμού. Μέσω της ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής, οι ανεμογεννήτριες μπορεί να έχουν αρνητικές επιδράσεις σε μια σειρά σημάτων που είναι σημαντικά για τις ανθρώπινες δραστηριότητες όπως η τηλεόραση, το ραδιόφωνο, τα μικροκύματα, η κινητή τηλεφωνία και τα ραντάρ (National Academy of Sciences, 2007). Οι ανεμογεννήτριες είναι πιθανό να αποτελούν εμπόδιο για τα προσπίπτοντα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, που μπορεί να αντανακλώνται, διασκορπίζονται (scattered) ή διαθλώνται από την ανεμογεννήτρια. Όταν μια ανεμογεννήτρια τοποθετείται μεταξύ ενός ραδιοφώνου, τηλεόρασης ή ραντάρ πομπό και δέκτη, μπορεί μερικές φορές να αντανακλά τμήματα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά τέτοιο τρόπο ώστε το ανακλώμενο κύμα να παρεμβάλλεται στο αρχικό σήμα που φτάνει στον δέκτη. Αυτό μπορεί να προκαλέσει στο λαμβανόμενο σήμα σημαντική παραμόρφωση/διαστρέβλωση (Manwell et al., 2009).

Μερικές βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την έκταση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών που προκαλείται από τις ανεμογεννήτριες είναι τα παρακάτω: ο τύπος της ανεμογεννήτριας (δηλαδή, ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα ή κάθετου άξονα), οι διαστάσεις της ανεμογεννήτριας, η ταχύτητα περιστροφής, το υλικό κατασκευής του πτερύγιου, η γωνία και η γεωμετρία του πτερυγίου, καθώς και η γεωμετρία του πύργου. Στην πράξη, το υλικό κατασκευής των πτερυγίων και η ταχύτητα περιστροφής αποτελούν τις βασικές παραμέτρους. Για παράδειγμα, οι παλαιότερες ανεμογεννήτριες με τα περιστρεφόμενα μεταλλικά πτερύγια, έχουν προκαλέσει τηλεοπτικές παρεμβολές σε περιοχές κοντά στις ανεμογεννήτριες. Σήμερα, η ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή από τις ανεμογεννήτριες είναι λιγότερο πιθανή, διότι τα περισσότερα πτερύγια κατασκευάζονται πλέον από συνθετικά υλικά. Οι περισσότερες σύγχρονες μηχανές, ωστόσο, έχουν αντικεραυνική προστασία στις επιφάνειες των πτερυγίων, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε κάποια ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (Manwell et al., 2009).

Στην Ελλάδα, η αδειοδότηση για την εγκατάσταση και λειτουργία ενός αιολικού πάρκου σύμφωνα με τη νομοθεσία, προϋποθέτει την τήρηση ελάχιστων αποστάσεων (οριοθετημένων) από τηλεπικοινωνιακούς ή ραδιοτηλεοπτικούς σταθμούς. Επομένως με σωστό σχεδιασμό και χωροθέτηση μπορούν να προληφθούν τα πιθανά προβλήματα παρεμβολών (Μπινόπουλος & Χαβιαρόπουλος, 2006). Γενικά, τα προβλήματα μπορούν να λυθούν με σχετικά απλό εξοπλισμό. Η εμπειρία στις ΗΠΑ έχει δείξει σε ορισμένες περιπτώσεις, ότι αναπροσαρμογή των κεραιών (τηλεόρασης) ήταν αρκετή για να διορθώσει το πρόβλημα. Όπου αυτό δεν ήταν ικανοποιητικό, γινόταν εγκατάσταση ενός μικρού πομπού αναμετάδοσης (Hau, 2006). Όσον αφορά τις παρεμβολές στις τηλεπικοινωνίες, όχι μόνο δεν αποτελούν εμπόδιο, αλλά στην Ευρώπη οι πύργοι των ανεμογεννητριών χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση κεραιών κινητής τηλεφωνίας (Μπινόπουλος & Χαβιαρόπουλος, 2006).

## 7.5. Πιθανές περιβαλλοντικές επιδράσεις των θαλάσσιων αιολικών πάρκων

**Πίνακας 6.** Αλληλεπιδράσεις μεταξύ περιβάλλοντος και ΘΑΠ κατά τις προκαταρκτικές εργασίες, την κατασκευή και εγκατάσταση ([www.aquaret.com](http://www.aquaret.com)).

Φάση ανάπτυξης	Δραστηριότητα	Μηχανισμός επίδρασης	Αλληλεπιδράσεις με το φυσικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με το βιολογικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με την οικολογία (οικολογικοί χαρακτηρισμοί, φυσική κληρονομιά, ανθρωπογενής κληρονομιά, κλπ.)	Αλληλεπιδράσεις με το κοινωνικό-οικονομικό περιβάλλον
Προκαταρκτικές εργασίες	Έρευνα	Όχληση του πυθμένα λόγω της δειγματοληψίας	Δευτερεύουσες επιδράσεις μπορούν να προκύψουν από βασικές περιβαλλοντικές έρευνες παραδείγματος χάριν, εντοπισμένη απώλεια υποστρωμάτων, φυτών και ζώων στις εκβολές των ποταμών μέσω της διάτρησης και της δειγματοληψίας, όχληση των θηλαστικών από τις σεισμικές έρευνες και άλλες έρευνες με την χρήση σκαφών.			Μπορεί να απασχοληθούν τοπικοί ανάδοχοι και εμπειρογνώμονες για να διεξάγουν και να υποστηρίξουν βασικές έρευνες, π.χ. ως χειριστές σκαφών, σύμβουλοι και δύτες, κλπ.
		Ηχητική όχληση λόγω αυξημένης δραστηριότητας των σκαφών και έρευνας μέσω σόναρ / σεισμικής έρευνας	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία προβλεπόμενη βασική αλληλεπίδραση	Διατάραξη της συμπεριφοράς των θαλάσσιων θηλαστικών	Καμία προβλεπόμενη βασική αλληλεπίδραση
		Διαταραχή του πυθμένα και της υδάτινης στήλης κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας της βυθοσκόπησης	Μεγάλες περιοχές των εκβολών του ποταμού μπορούν να βυθοκορηθούν επιδρώντας στη μορφολογία του πυθμένα και αυξάνοντας την θολότητα των υδάτων.	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Προσωρινή διαταραχή άλλων χρηστών της θάλασσας και της ναυσιπλοΐας ως αποτέλεσμα της δραστηριότητας των σκαφών και των θαλάσσιων εργασιών	Μπορεί να επηρεαστούν τα προστατευόμενα μεταναστευτικά είδη ψαριών και τα προστατευόμενα αρπακτικά είδη πουλιών.
Κατασκευή και εγκατάσταση	Υποδομή κατασκευής και εγκατάστασης	Φυσική παρουσία σκαφών και σχετικών εξοπλισμών/ δομών	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Πιθανή όχληση για τα θαλάσσια θηλαστικά	Πιθανός αυξημένος κίνδυνος πλοήγησης για άλλους χρήστες της θάλασσας  Δημιουργία ζωνών αποκλεισμού για λοιπούς χρήστες της θάλασσας συμπεριλαμβανομένων και των ψαράδων
		Διατάραξη του πυθμένα και ηχορύπανση μέσω της συσσώρευσης	Εντοπισμένη επίδραση στην μορφολογία του πυθμένα – θα δημιουργηθούν εκχώσεις στον πυθμένα. Αυτές μπορεί στη συνέχεια να επεκταθούν σε μια ευρύτερη περιοχή.	Άμεση εντοπισμένη επίπτωση στους βιότοπους και στα είδη του πυθμένα	Ο υποβρύχιος θόρυβος μπορεί να επηρεάσει τα είδη των θαλάσσιων θηλαστικών για σημαντικές αποστάσεις	Τα άγνωστα σκάφη και οι υπέρ κατασκευές που συνδέονται με την επιτόπου κατασκευή και εγκατάσταση θα είναι ορατά εντός της τοπικής θαλασσογραφίας για εκτεταμένες χρονικές περιόδους
		Διατάραξη του πυθμένα και της υδάτινης στήλης λόγω της εγκατάστασης των θεμελίων	Τροποποίηση των υδρολογικών και ιζηματογενών μορφών  Τροποποίηση του ύψους των κυμάτων  Αλλαγές στην παρούσα συμπεριφορά και στο χαρακτήρα της παλίρροιας κατόπιν της εγκατάστασης	Οι εγκαταστάσεις μπορεί να λειτουργήσουν ως τεχνητοί σκόπελοι και διατάξεις συνάθροισης ψαριών  Παρέμβαση στα πρότυπα μετανάστευσης	Πιθανή όχληση για τα θαλάσσια θηλαστικά	Πιθανός αυξημένος κίνδυνος πλοήγησης για άλλους χρήστες της θάλασσας
		Διατάραξη του πυθμένα και άλλων χρηστών του θαλάσσιου χώρου λόγω της εγκατάστασης υποθαλάσσιων καλωδίων	Αιώρηση εκ νέου ιζημάτων και μεμονωμένων σωματιδίων στην υδάτινη στήλη	Άμεση εντοπισμένη επίπτωση στους βιότοπους και στα είδη του πυθμένα	Πιθανή όχληση για τα θαλάσσια θηλαστικά	Πιθανός αυξημένος κίνδυνος πλοήγησης για άλλους χρήστες της θάλασσας  Δημιουργία ζωνών αποκλεισμού για λοιπούς χρήστες της θάλασσας συμπεριλαμβανομένων και των ψαράδων

**Πίνακας 7.** Αλληλεπιδράσεις μεταξύ περιβάλλοντος και ΘΑΠ κατά την εκκίνηση λειτουργίας, λειτουργία, συντήρηση και τυχαίων συμβάντων του έργου (www.aquaret.com).

Φάση ανάπτυξης	Δραστηριότητα	Μηχανισμός επίδρασης	Αλληλεπιδράσεις με το φυσικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με το βιολογικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με την οικολογία (οικολογικοί χαρακτηρισμοί, φυσική κληρονομιά, ανθρωπογενής κληρονομιά, κλπ.)	Αλληλεπιδράσεις με το κοινωνικό-οικονομικό περιβάλλον	
Εκκίνηση λειτουργίας του έργου, λειτουργία και συντήρηση	Εγκατάσταση των ανεμογεννητριών	Φυσική παρουσία δομών επάνω από την επιφάνεια	Δημιουργία 'ομόρου' κατόπιν των εγκαταστάσεων	Σύγκρουση μεταξύ πτηνών (τόσο αποδημητικών όσο και ενδημητικών) και πτερυγίων των ανεμογεννητριών	Μπορούν να επηρεαστούν τα προστατευόμενα είδη πτηνών	Αλλαγές στον χαρακτήρα της τοπογραφίας και της θαλασσογραφίας  Οπτική παρέμβαση  Παρέμβαση στην πρόσβαση σε ψυχαγωγικές σχετικές με την ναυσιπλοΐα δραστηριότητες  Πιθανός αυξημένος κίνδυνος πλοήγησης για άλλους χρήστες της θάλασσας  Δημιουργία ζωνών αποκλεισμού σε λοιπούς χρήστες της θάλασσας συμπεριλαμβανομένων και των ψαράδων	
		Κίνηση των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Κίνδυνος σύγκρουσης με πτηνά	Μπορούν να επηρεαστούν τα προστατευόμενα είδη πτηνών	Παρεμβολή με εγκαταστάσεις ραντάρ, τηλεπικοινωνιών και τηλεοράσεων	
		Παραγωγή θορύβου από τις ανεμογεννήτριας	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Εντοπισμένη αποφυγή από μερικά είδη ψαριών	Πιθανή όχληση των θαλάσσιων θηλαστικών για σημαντικές αποστάσεις - μπορεί να παρατηρηθεί εντοπισμένη αποφυγή	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση (που να εξαρτάται από την απόσταση από την ακτή)	
	Απόσπαση της αιολικής ενέργειας και παραγωγή ισχύος	Μείωση των αερίων του θερμοκηπίου και των καυσαερίων από την καύση ορυκτών καυσίμων	Μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των αερίων του θερμοκηπίου που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων	Θα μειωθούν οι επιπτώσεις οικολογικού χαρακτήρα που προκύπτουν από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και την ατμοσφαιρική ρύπανση	Θα μειωθούν οι επιπτώσεις οικολογικού χαρακτήρα που προκύπτουν από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και την ατμοσφαιρική ρύπανση	Θα μειωθούν οι επιπτώσεις οικολογικού χαρακτήρα που προκύπτουν από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και την ατμοσφαιρική ρύπανση	Παραγωγή καθαρής ενέργειας που θα βοηθήσει να εκπληρωθούν εθνικοί/ διεθνείς στόχοι
		Μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας μέσω υποθαλάσσιων καλωδίων	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Πιθανή ηλεκτρική και μαγνητική παρέμβαση από τις κινήσεις διαφόρων ειδών ψαριών (τα διάφορα είδη καρχαριών και σαλαχιών είναι πιο ευαίσθητα σε αυτήν)	Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία (ΗΜΠ) μπορεί να επηρεάσουν τα θαλάσσια θηλαστικά που περνούν κοντά από την εγκατάσταση	Ηλεκτρική, μαγνητική παρεμβολή και επιπτώσεις από την θερμότητα, ως αποτέλεσμα των λειτουργικών γραμμών μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας	
		Αυξημένη δραστηριότητα σκαφών για συντήρηση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Πιθανή όχληση για τα θαλάσσια θηλαστικά	Κανονική πρόσθετη δραστηριότητα σκαφών εντός της τοπικής θαλασσογραφία
		Τοπικές επιχειρήσεις και ευκαιρίες απασχόλησης	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Πιθανές ευκαιρίες απασχόλησης για τους ντόπιους κατοίκους και οφέλη για την τοπική οικονομία
	Τυχαία συμβάντα	Περιστατικό που οδηγεί σε έγχυση χημικών	Χημική ρύπανση	Τοπικές/εκτεταμένες αλλαγές στην χημεία των υδάτων και των ιζημάτων	Τα είδη και οι βιότοποι μπορεί να καταστραφούν και να βλαφτούν από την χημική ρύπανση	Τα είδη και οι βιότοποι μπορεί να καταστραφούν και να βλαφτούν από την χημική ρύπανση	Η χημική ρύπανση μπορεί επηρεάσει άλλους χρήστες των εκβολών παραδείγματος χάριν ιχθυοκαλλιεργητές, τουρίστες και ναυτικούς κλπ.
Περιστατικό που οδηγεί σε έγχυση ελαίου/καυσίμου		Πετρελαϊκή ρύπανση	Παροδικές κηλίδες πετρελαίου στα ύδατα επιφάνειας και κίνδυνος για μακροπρόθεσμη ρύπανση του πυθμένα και των ακτογραμμών.	Τα είδη και οι βιότοποι μπορούν να καταστραφούν και να βλαφτούν από την πετρελαϊκή ρύπανση	Τα είδη και οι βιότοποι μπορούν να καταστραφούν και να βλαφτούν από την πετρελαϊκή ρύπανση	Η πετρελαϊκή ρύπανση μπορεί επηρεάσει άλλους χρήστες των εκβολών παραδείγματος χάριν ιχθυοκαλλιεργητές, τουρίστες και ναυτικούς κλπ.	
Απώλεια εξοπλισμού /		Διαταραχή του πυθμένα από βυθιζόμενα συντρίμια	Αλλαγές στην κατατομή του πυθμένα και τη σύνθεση των ιζημάτων	Εντοπισμένη διάσπαση στα είδη της κοίτης του ποταμού και τους βιότοπους.	Εντοπισμένη διάσπαση στα είδη της κοίτης του ποταμού και τους βιότοπους.	Πρόσθετος κίνδυνος για την ναυσιπλοΐα, διατάραξη των ιχθυοτόπων	

**Πίνακας 8.** Αλληλεπιδράσεις μεταξύ περιβάλλοντος και ΘΑΠ κατά τον παροπλισμό (www.aquaret.com).

Φάση ανάπτυξης	Δραστηριότητα	Μηχανισμός επίδρασης	Αλληλεπιδράσεις με το φυσικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με το βιολογικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με την οικολογία (οικολογικοί χαρακτηρισμοί, φυσική κληρονομιά, ανθρωπογενής κληρονομιά, κλπ.)	Αλληλεπιδράσεις με το κοινωνικό-οικονομικό περιβάλλον
Παροπλισμός	δομικών συστατικών	Ρύπανση των επιφανειακών υδάτων και των ακτογραμμών από επιπλέοντα συντρίμια	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Διάσπαση στους βιότοπους των ακτογραμμών λόγω πνιγμονής και καταστροφή των ειδών μέσω της λήψης τροφής/έμπλοκής		Κίνδυνος απελευθέρωσης πετρελαίου, καυσίμων και άλλων ρύπων Κίνδυνος απελευθέρωσης ουσιών (π.χ. υδραυλικά ρευστά)
	Συνολική απομάκρυνση της εγκατάστασης	Επαναφορά στις βασικές συνθήκες	Διασπορά συσσωρευμένων ιζημάτων γύρω από την εγκατάσταση Απώλεια και περιοχές 'ομόρφου' γύρω από την εγκατάσταση Απώλεια οποιωνδήποτε καταπραϊντικών επιδράσεων γύρω από την εγκατάσταση (τρέχουσα κίνηση και κυματική δράση)	Πιθανή διατάραξη των οικοσυστημάτων που έχουν καθιερωθεί και προσαρμοσθεί στις προ της εγκατάστασης υδρογραφικές συνθήκες Οι επιδράσεις ΗΜΠ στα είδη των ψαριών θα εξαλειφθούν	Τα προστατευόμενα είδη που αναζητούν την τροφή τους και μεταναστεύουν εντός της υδάτινης στήλης μπορεί να διαταραχθούν. Θα εξαλειφθούν οι επιδράσεις από την παραγωγή θορύβου στα θαλάσσια θηλαστικά Τα προστατευόμενα είδη πτηνών δεν επηρεάζονται πλέον από την παρουσία των κινητών μερών της ανεμογεννήτριας	Απομάκρυνση των κινδύνων πλοήγησης Απομάκρυνση των 'ζωνών αποκλεισμού'
	Αντικατάσταση των ανεμογεννητριών	Αυξημένη δραστηριότητα σκαφών	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση
		Τοπικές επιχειρήσεις και ευκαιρίες απασχόλησης	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση		Πιθανά οικονομικά οφέλη από την αξιοποίηση των τοπικών πόρων, των εταιριών υποστήριξης και των υπηρεσιών

## 8. Συμπεράσματα και Προτάσεις

Στην παρούσα εργασία, γίνεται και παρουσιάζεται, για πρώτη φορά, η εκτίμηση του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού των Ελληνικών θαλασσών, με βάση επιτόπιες μετρήσεις ανέμου, οι οποίες αποκτήθηκαν μέσω του δικτύου παρακολούθησης ΠΟΣΕΙΔΩΝ. Τα ανεμολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι υπό τη μορφή μετρήσεων μακροχρόνιων χρονοσειρών καλύπτοντας μια περίοδο που κυμαίνεται από 5 μέχρι 12 χρόνια (1999-2011). Τέλος, πραγματοποιήθηκε σύγκριση της μέσης μηνιαίας διακύμανσης αιολικής ενέργειας μεταξύ 'επιτόπιων μετρήσεων' και 'μοντέλου'.

Σήμερα είναι γενικά αποδεκτό ότι το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής θεωρείται εκμεταλλεύσιμο ενεργειακά, όταν η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου ξεπερνά την τιμή των 5 m/s (σε ύψος 10 m από το έδαφος), δηλαδή την ενέργεια των 80 W/m<sup>2</sup>. Γενικά, μερικά δείγματα από τη ποιοτική αξιολόγηση του μεγέθους της αιολικής ενέργειας είναι τα εξής: <100W/m<sup>2</sup> (χαμηλή), ≈400W/m<sup>2</sup> (καλή) και >700W/m<sup>2</sup> (υψηλή) (Manwell et al., 2009).

Συγκεκριμένα, η ετήσια διακύμανση του αιολικού δυναμικού βάση των επιτόπιων μετρήσεων στις περιοχές μελέτης βρέθηκε να είναι 69.24-390.64 W/m<sup>2</sup> για τον Άθω, 215.23-449.06 W/m<sup>2</sup> για τη Μύκονο, 98.92-281.02 W/m<sup>2</sup> για τον Ε1Μ3Α, 75.52-272.57 W/m<sup>2</sup> για την Πύλο και 83.45-309.74 W/m<sup>2</sup> για την Ζάκυνθο. Περαιτέρω, η μέση ετήσια αιολική ενέργεια είναι 210.67 W/m<sup>2</sup> (Άθως), 356.22 W/m<sup>2</sup> (Μύκονος), 175.79 W/m<sup>2</sup> (Ε1Μ3Α), 157.58 W/m<sup>2</sup> (Πύλος) και 173.82 W/m<sup>2</sup> (Ζάκυνθος).

Ενώ, η ετήσια διακύμανση του αιολικού δυναμικού βάση των αποτελεσμάτων του μοντέλου είναι 48.39-473.15 W/m<sup>2</sup> για τον Άθω, 224.02-414.43 W/m<sup>2</sup> για τη Μύκονο, 94.65-207.96 W/m<sup>2</sup> για την Πύλο και 31.66-99.25 W/m<sup>2</sup> για την Ζάκυνθο. Ακόμη, η μέση ετήσια αιολική ενέργεια είναι 205.29 W/m<sup>2</sup> (Άθως), 333.42 W/m<sup>2</sup> (Μύκονος), 147.85 W/m<sup>2</sup> (Πύλος) και 59.86 W/m<sup>2</sup> (Ζάκυνθος).

Από την σύγκριση που πραγματοποιήθηκε στα αποτελέσματα της μέσης ετήσιας αιολικής ενέργειας μεταξύ μοντέλου (1995-2004) και επιτόπιων μετρήσεων (1999-2011), φαίνεται ότι στις τρεις (Άθως, Μύκονος και Πύλος) από τις τέσσερις περιοχές μελέτης δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές. Σε αντίθεση, στον σταθμό της Ζακύνθου η μέση ετήσια αιολική ενέργεια του μοντέλου είναι μικρότερη



κατά  $113.96 \text{ W/m}^2$  από αυτή των επιτόπιων μετρήσεων, γεγονός που δεν μπορεί να εξηγηθεί αποτελώντας αντικείμενο για περαιτέρω διερεύνηση.

Συνοψίζοντας το κεφάλαιο 7, οι πιθανές επιπτώσεις στο περιβάλλον από τις ανεμογεννήτριες είναι άμεσα «ορατές» (Μπινόπουλος & Χαβιαρόπουλος, 2006) και σε συγκεκριμένο χώρο, επομένως με προσεκτικό σχεδιασμό και χωροθέτηση μπορούν να αποφευχθούν και να μετριαστούν κατάλληλα (Hau, 2006). Σε αντίθεση, οι επιπτώσεις στο περιβάλλον από τις συμβατικές παραγωγές ηλεκτρικής ενέργειας είναι μακροπρόθεσμες και δύσκολα ελαχιστοποιούνται. Από την στιγμή που είναι επιτακτική η ανάγκη για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει όσο το δυνατό μικρότερη επιβάρυνση στο περιβάλλον. Σε σύγκριση με τις άλλες ΑΠΕ, η αιολική ενέργεια από τεχνικοοικονομική πλευρά είναι σε πλεονεκτική θέση, λόγω του γεγονότος ότι είναι η πιο ώριμη μορφή ανανεώσιμης ενέργειας τις τρεις τελευταίες δεκαετίες. Επίσης, συμβάλει αποτελεσματικά στη μείωση της απειλής της κλιματικής αλλαγής προσφέροντας ταυτόχρονα σημαντικά περιβαλλοντικά και κοινωνικοοικονομικά οφέλη (Μπινόπουλος & Χαβιαρόπουλος, 2006).

Τελικά, στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των επιτόπιων μετρήσεων που παρουσιάστηκαν εδώ, φαίνεται να υπάρχει εκμεταλλεύσιμο υπεράκτιο αιολικό δυναμικό. Επομένως, θα μπορούσε η ανάπτυξη/εγκατάσταση ΘΑΠ να αποτελέσει μια βιώσιμη και τεχνολογικά εφικτή λύση για την ηλεκτροδότηση της χώρας από Α.Π.Ε.

## 9. Βιβλιογραφία

### Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- Ackermann, T. (2005). *Wind Power in Power Systems*. Wiley, 745 pp.
- Aubault, A., Cermelli, C. and Roddier, D. (2009). WINDFLOAT: A Floating Foundation For Offshore Wind Turbines Part III: Structural Analysis. Proceedings of the ASME 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2009-79232, Honolulu, Hawaii, USA.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. and Bossanyi, E., (2001). *WIND ENERGY HANDBOOK*. Wiley, 643 pp.
- Cermelli, C., Aubault, A., Dominique Roddier, D. and McCoy, T (2010). Qualification of a Semi-Submersible Floating Foundation for Multi-Megawatt Wind Turbines. Offshore Technology Conference held in Houston, OTC-20674-PP, Texas, USA.
- CEU, 1997. Energy for the future, renewable sources of energy – White Paper for a Community Strategy and Action Plan. COM (97) 559 final.
- Clausager, I. and Nohr, H. (1996). Impact of wind turbines on birds. European Union Wind Energy Conference, Goteborg, pp. 156–159.
- Esteban, MD., Diez JJ, López, JS and Negro, V. (2010). Why offshore wind energy? *Renewable energy An International Journal*, Elsevier, pp 1-7.
- EWEA, 2011. EU Energy Policy to 2050: Achieving 80-95% emissions reductions. Report by the European Wind Energy Association. European Wind Energy Accusation, 68 pp.
- Frandsen, S. 2009. *Offshore wind power*. ENERTECH, Athens, Greece.
- Freris, L. and Infield, D (2008). *Renewable Energy in Power Systems*. Wiley, 302 pp.
- Giovanello, A. and Kaplan, C.S. (2008). *Wind Energy Siting Handbook*. American Wind Energy Association (AWEA), 183 pp.
- Hau, E. (2006). *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics*” (2<sup>nd</sup> edition), Springer, 791 pp.
- Henderson, A. R., Morgan, C. S., Smith, B., Sørensen, H. C., Barthelmie, R. J., and Boesmans, B., 2003. “Offshore Wind Energy in Europe — A Review of the State-of-the-Art,” *Wind Energy*, Vol. 6, No. 1, pp. 35–52.
- Jain, P. (2011). *Wind Energy Engineering*, McGraw-Hill, 352 pp.

- Jonkman, JM (2007). Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine, National Renewable Energy Laboratory, Technical Report NREL/TP-500-41958, 233 pp.
- Kaltschmitt, M., Streicher, W. and Wiese, A (2007). Renewable Energy: Technology, and Environment Economics. Springer, 561 pp.
- Koller, J., Koppel, J. and Peters, W. (2006). Offshore Wind Energy Research on Environmental Impacts. Springer, Berlin.
- Lehmann, L. (2007). Wave Propagation in Infinite Domains With Applications to Structure Interaction. Springer.
- Manwell, JF, McGowan, JG and Rogers, AL (2009). Wind Energy Explained: Theory, Design and Application (2<sup>nd</sup> edition), Wiley, 705 pp.
- Musial, W. and Butterfield, S (2004). Future for Offshore Wind Energy in the United States, Energy Ocean Proceedings. National Renewable Energy Laboratory, NREL/CP-500-36313.
- National Research Council, 2007. Environmental Impacts of Wind Energy Projects, The National Academies Press, Washington.
- Nelson V. (2009). Wind Energy: Renewable Energy and the Environment. CRC, 308 pp.
- Operate A/S, (2006). Danish Offshore Wind: Key Environmental Issues. Report for DONG Energy, Vattenfall, Danish Energy Authority, and Danish Forest and Nature Agency.
- Orloff, S. and Flannery, A. (1992). Wind Turbine Effects on Avian Activity, Habitat Use, and Mortality in Altamont Pass and Solano County Wind Resource Areas: 1989–1991. Report No. P700-92-001, California Energy Commission, Sacramento.
- Roddier, D., Cermelli, C., Aubault, A. and Weinstein A (2010). WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines. Journal Of Renewable and Sustainable Energy 2, pp 1-34.
- Sathyajith, M. (2006). Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics. Springer, 245 pp.
- Skaare, B., Hanson, TD, Nielsen, FG, Yttervik R., Hansen, AH, Thomsen K., Larsen TJ (2007). Integrated Dynamic Analysis of Floating Offshore Wind Turbines.

- Skaare, B., Hanson, TD, Yttervik R. and Nielsen, FG (2010). Dynamic Response and Control of the Hywind Demo Floating Wind Turbine. Statoil ASA Trondheim Norway, <http://www.ewec2010proceedings.info/ewea2011/papers/43.pdf>.
- Soukissian T., Prospathopoulos, A., Hatzinaki, M., Kabouridou, M., 2008. "Assessment of the wind and wave climate of the Hellenic Seas using 10-year hindcast results". The Open Ocean Engineering Journal, Vol 1, pp 1-12.
- Stanton, C. (1996). The Landscape Impact and Visual Design of Windfarms. Landscape Publication No. LP/9603, School of Landscape Architecture, Heriot-Watt University, Edinburgh.
- Wagner, H-F and Mathur, J. (2009). Green Energy Technology: Introduction to Wind Energy Systems. Springer, 90 pp.
- Wagner, H-J and Mathur, J. (2009). Introduction to Wind Energy Systems: Basics, Technology and Operation, Springer, 90 pp.
- Wang, W. and Bai Y. (2010). Investigation on Installation of Offshore Wind Turbines. Journal Marine Science, DOI: 10.1007/s11804-010-9076-y, pp 1-6.

### **Ελληνική βιβλιογραφία**

- Καζαντζίδης Α., 2009. Σημειώσεις για Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Περιβαλλοντική Φυσική, Πανεπιστήμιο Πατρών.
- Κτενιαδάκης Μ., 1999. Εξοικονόμηση και Διαχείριση Ενέργειας. ΤΕΙ Ηρακλείου, Κρήτη.
- Κωλέτσης Ι., 2007. 'Το αιολικό δυναμικό σε περιοχές του Νομού Ιωαννίνων', 5ο Διεπιστημονικό Διαπανεπιστημιακό Συνέδριο του Ε.Μ.Π. και του ΜΕ.Κ.Δ.Ε. του Ε.Μ.Π. "Παιδεία, Έρευνα, Τεχνολογία. Από το Χθες στο Αύριο", Μέτσοβο, 27-30 Σεπτεμβρίου.
- Μαμάσης Ν., 2010. Σημειώσεις Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία Αιολική ενέργεια. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- Μπινόπουλος Ε. και Χαβιαρόπουλος Π. (2006). Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αιολικών πάρκων : "Μύθος και πραγματικότητα". Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ).

- Νίττης Κ. Α, Χρόνης Γ. Θ., 2003. Σημειώσεις Επιχειρησιακή δκεανογραφία. Τμήμα  
Επιστήμης της Θάλασσας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου.
- ΥΠΕΚΑ, 2010. Διαδικασία Προκαταρκτικής Χωροθέτησης Θαλάσσιων Αιολικών  
Πάρκων. Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, 6  
Ιουλίου.
- ΥΠΕΚΑ, 2010. Προκαταρκτική Χωροθέτηση Θαλάσσιων Αιολικών Πάρκων:  
Ανταπόκριση του ΥΠΕΚΑ στις Προτάσεις της Άτυπης Διαβούλευσης.  
Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, 23 Ιουλίου.
- Φλόκας Α., 1997. Μαθήματα Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας. Β' Έκδοση,  
Θεσσαλονίκη.

### **Ιστοσελίδες**

- <http://www.springerlink.com/>
- <http://www.ewea.org/>
- <http://www.ypeka.gr/>
- <http://www.cres.gr/>
- <http://www.aquaret.com/>
- <http://www.eletaen.gr/>
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_farm](http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_farm)