



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ

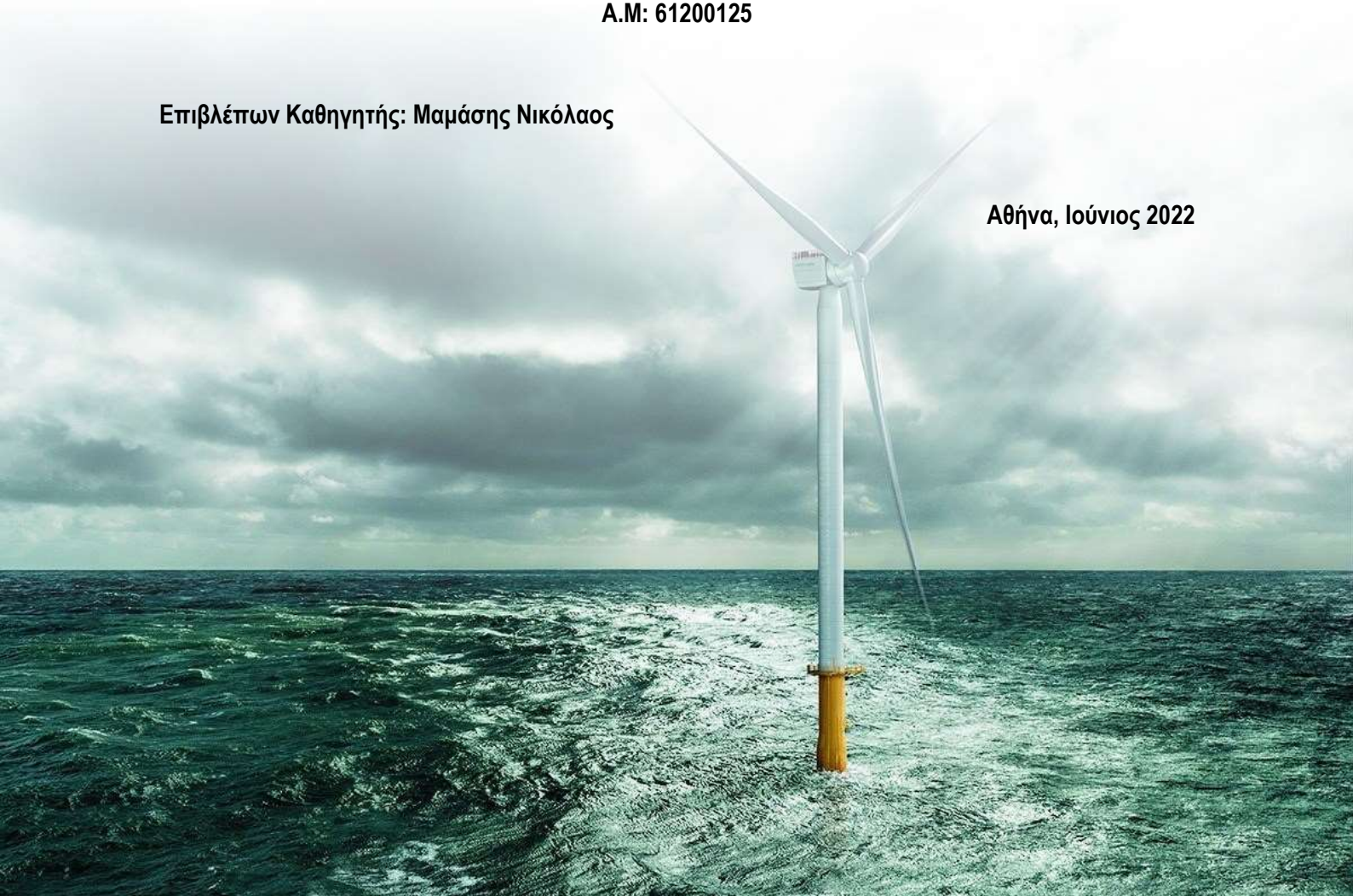
ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΥΠΕΡΑΚΤΙΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ

Τσακίρη Δέσποινα

A.M: 61200125

Επιβλέπων Καθηγητής: Μαμάσης Νικόλαος

Αθήνα, Ιούνιος 2022





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ

**Χωροθέτηση και θεμελίωση υπεράκτιων αιολικών πάρκων
στον ελληνικό χώρο**

Τσακίρη Δέσποινα
Επιβλέπων Καθηγητής: Μαμάσης Νικόλαος

Αθήνα, Ιούνιος 2022



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
INTERDEPARTMENTAL PROGRAMME OF POSTGRADUATE STUDIES
ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT

Placement and foundation systems of offshore wind farms
in Greek territory

Tsakiri Despoina

Supervisor: Mamasis Nikolaos

Αθήνα, Ιούνιος 2022

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η χωροθέτηση υπεράκτιων αιολικών πάρκων στον Ελληνικό χώρο. Αρχικά, παρουσιάζονται οι έννοιες οι οποίες σχετίζονται με την αιολική ενέργεια και τους φυσικούς νόμους που τη διέπουν καθώς και με ενεργειακά δεδομένα σε ευρωπαϊκό και εθνικό επίπεδο σχετικά με τις υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις. Στην συνέχεια πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση αφενός όσον αφορά γενικότερα την κατασκευή των ανεμογεννητριών και αφετέρου σχετικά με τις ιδιαιτερότητες στην κατασκευή των υπεράκτιων ανεμογεννητριών και ειδικότερα με τις θεμελιώσεις τους και τον τρόπο διασύνδεσής τους με το ηλεκτρικό δίκτυο. Για την χωροθέτηση υπεράκτιων αιολικών εγκαταστάσεων αρχικά πραγματοποιείται καταγραφή της ισχύουσας νομοθεσίας και των κριτηρίων αποκλεισμού όσον αφορά τις ελάχιστες και μέγιστες αποστάσεις. Έπειτα, πραγματοποιείται μια μελέτη περίπτωσης στο νοτιοανατολικό Αιγαίο με την εφαρμογή των κριτηρίων στο λογισμικό του ArcMap GIS και καθορίζονται οι περιοχές χωροθέτησης. Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα, οι δυσκολίες και η μελλοντική έρευνα που ενδεχομένως θα προκύψει.

Λέξεις κλειδιά: αιολική ενέργεια, υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις, θεμελιώσεις, χωροθέτηση

Abstract

The purpose of this thesis is the study and the placement of offshore wind farms in Greek territory. Initially, the general concept and fundamentals of wind energy are presented, as well as energy data and statistics on a European and national level regarding offshore wind farms. Following, there is a bibliographical review of the general construction of wind turbines and the construction specificities of offshore wind turbines especially about the foundation systems and their interconnection with the electricity network. Aiming for the placement of offshore wind farms, national legislations and the exclusion criteria regarding minimum and maximum distances are stated. By applying the exclusion criteria in the ArcMap GIS software, in the southeast Aegean area, the proper places are defined. Finally, the conclusions, difficulties and proposals for future studies are presented.

Key words: wind energy, offshore windfarms, foundation systems, placement design

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract.....	3
1. Εισαγωγή, σκοπός και διάρθρωση της εργασίας.....	6
2. Αιολική ενέργεια.....	7
2.1 Εισαγωγή στην αιολική ενέργεια.....	7
2.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα από τη χρήση της αιολικής ενέργειας.....	7
2.3 Αιολική ενέργεια στην Ευρώπη.....	9
2.4 Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα.....	11
2.5 Υπεράκτια αιολική ενέργεια.....	12
2.6 Αιολική Ενέργεια, Φυσικοί Νόμοι.....	14
2.6.1 Ταχύτητα του ανέμου.....	14
2.6.2 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος.....	17
2.6.3 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με τον χρόνο.....	18
2.6.4 Ονομαστική Ισχύς.....	18
2.6.5 Όριο Betz.....	18
2.6.6 Ενεργειακή απόδοση ανεμογεννήτριας.....	20
3. Υπεράκτια τεχνολογία ανεμογεννητριών.....	21
3.1 Τυπικός εξοπλισμός ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.....	21
3.2 Θεμελίωση.....	23
3.2.1 Θεμελίωση σταθερής έδρασης.....	23
3.2.2 Πλωτές θεμελιώσεις.....	29
3.3 Σύνδεση με το Εθνικό Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	35
4. Ελληνική νομοθεσία χωροθέτησης υπεράκτιων αιολικών πάρκων.....	37
4.1 Αποστάσεις ασφαλείας για τη χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων.....	37
4.2 Κριτήρια αποκλεισμού και αξιολόγησης.....	41
4.3 Αδειοδοτικό πλαίσιο.....	43
4.3.1 Άδεια Παραγωγής.....	43
4.3.2 Προσφορά Σύνδεσης.....	43
4.3.3 Άδεια Εγκατάστασης.....	44
4.3.4 Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων.....	44
4.3.5 Άδεια λειτουργίας.....	45

5.	Χωροθέτηση υπεράκτιου αιολικού πάρκου με τη χρήση GIS.....	46
5.1	Ελληνική και διεθνής εμπειρία.....	46
5.2	Πρώτη κεντρική προσπάθεια χωροθέτησης ΘΑΠ με βάση το ΕΠΑΘΑΠ 2010/12	47
5.3	Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών	48
5.4	Επιλογή θέσης χωροθέτησης με τη χρήση GIS.....	49
6.	Σύνοψη, Συμπεράσματα, Μελλοντική Έρευνα	57
	Βιβλιογραφία.....	59

1. Εισαγωγή, σκοπός και διάρθρωση της εργασίας

Εδώ και αρκετά χρόνια έχει παρατηρηθεί ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μια γενικότερη αποστροφή από τις παραδοσιακές πηγές (λιγνίτη κ.λ.π). Ειδικότερα η αιολική ενέργεια όντας μια από τις πιο σημαντικές και πολλά υποσχόμενες πηγές αποτελεί έναν αποδοτικό τρόπο παραγωγής ενέργειας και έχει γίνει η ταχύτερα αναπτυσσόμενη τεχνολογία ανανεώσιμης ενέργειας στον κόσμο. Σήμερα οι περισσότερες αιολικές εγκαταστάσεις βρίσκονται εγκατεστημένες στον χερσαίο χώρο που όμως σταδιακά φτάνει στο σημείο του κορεσμού. Έτσι τα τελευταία χρόνια υπάρχει ένα αυξανόμενο ενδιαφέρον για τις υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις οι οποίες έρχονται να λύσουν πολλά ζητήματα που αντιμετωπίζουν ακόμα και σήμερα οι χερσαίες εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι αφενός η γενικότερη διερεύνηση των τύπων των υπεράκτιων ανεμογεννητριών που σχετίζονται με τη θεμελίωση τους και αφετέρου η χωροθέτηση ενός τέτοιου πάρκου στον ελληνικό χώρο καθώς στο άμεσο μέλλον οι υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις θα αποτελέσουν αντικείμενο ενδιαφέροντος προς αξιοποίηση. Συνεπώς για την επίτευξη των στόχων η εργασία διαρθρώνεται ως εξής:

1. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε έννοιες που αφορούν γενικότερα την αιολική ενέργεια και καταγράφονται στατιστικά δεδομένα ενέργειας που αφορούν τόσο την Ελλάδα όσο και χώρες του εξωτερικού με στόχο την κατανόηση της γενικότερης κατάστασης και λειτουργίας του ενεργειακού ισοζυγίου. Στη συνέχεια αναλύονται κάποιες φυσικές έννοιες που σχετίζονται με την αιολική ενέργεια και εξηγούν τα μεγέθη τα οποία σχετίζονται με τη γενικότερη λειτουργία και κατασκευή των ανεμογεννητριών.
2. Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται τα τεχνικά μέρη μιας τυπικής ανεμογεννήτριας και πως αυτή εντάσσεται στο δίκτυο ενώ στη συνέχεια γίνεται διαφοροποίηση με της ανεμογεννήτριες στα υπεράκτια πάρκα και αναλύονται οι τύποι θεμελίωσης τους τα μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα καθώς και η σύνδεσή τους με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.
3. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μια ανασκόπηση της ελληνικής νομοθεσίας σχετικά με την χωροθέτηση, εγκατάσταση και αδειοδότηση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων και καθορίζονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την χωροθέτησή τους.
4. Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιείται χωροθέτηση αιολικών παρκών στον θαλάσσιο ελληνικό χώρο. Συγκεκριμένα με τη χρήση του ArcMap GIS γίνεται εύρεση πιθανών θέσεων χωροθέτησης υπεράκτιων αιολικών πάρκων στην Περιφερειακή Ενότητα της Ρόδου.
5. Στο έκτο κεφάλαιο πραγματοποιείται η σύνοψη της εργασίας, εξάγονται τα συμπεράσματα, παρουσιάζονται τα προβλήματα που προέκυψαν και σημειώνονται ενέργειες που αφορούν μελλοντικές έρευνες που ενδεχομένως θα μπορούσαν να γίνουν.

2. Αιολική ενέργεια

2.1 Εισαγωγή στην αιολική ενέργεια

Οι αυξανόμενες ανησυχίες για την υπερθέρμανση του πλανήτη, την περιβαλλοντική ρύπανση και την ενεργειακή ασφάλεια έχουν αυξήσει το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη ανανεώσιμων και φιλικών προς το περιβάλλον πηγών ενέργειας όπως η αιολική, η ηλιακή, η υδροηλεκτρική ενέργεια, η γεωθερμία, και η βιομάζα ως υποκατάστατα των ορυκτών καυσίμων (Tong,2010).

Η αιολική ενέργεια αντιπροσωπεύει μια κύρια πηγή ενέργειας, η εκμετάλλευση της οποίας πραγματοποιείται μέσω των αιολικών πάρκων, με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και έχει σημαντική θέση στην παγκόσμια αγορά ενέργειας. Ως κορυφαία ενεργειακή τεχνολογία, αναγνωρίζεται η τεχνική ωριμότητα και η ταχύτητα ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας, μαζί με το γεγονός ότι δεν υπάρχει πρακτικό ανώτατο όριο στο ποσοστό του ανέμου που μπορεί να ενσωματωθεί στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Με την περαιτέρω διαφοροποίηση του ενεργειακού εφοδιασμού, η αιολική ενέργεια μειώνει δραματικά την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα που υπόκεινται σε αστάθεια τιμών και εφοδιασμού, ενισχύοντας έτσι την παγκόσμια ενεργειακή ασφάλεια. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, έχει παρατηρηθεί τεράστια ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο (Tong,2010).

2.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα από τη χρήση της αιολικής ενέργειας

Ως η πιο πολλά υποσχόμενη πηγή ενέργειας, η αιολική ενέργεια πιστεύεται ότι διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην παγκόσμια παροχή ενέργειας στον 21ο αιώνα και αξιοποιείται με τη χρήση αιολικών πάρκων. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές πηγές ενέργειας, η αιολική ενέργεια πέρα από το γεγονός ότι είναι ανανεώσιμη έχει μια σειρά από οφέλη και πλεονεκτήματα (Ιστοσελίδες: Justenergy & Energygon):

- 1) Είναι οικονομικά αποδοτική. Ο άνεμος είναι μια από τις φθηνότερες πηγές ενέργειας που σήμερα κοστίζει 3–4 cents/kWh μετά την πίστωση φόρου παραγωγής. Επειδή η ηλεκτρική ενέργεια από τα αιολικά πάρκα πωλείται σε σταθερή τιμή για μεγάλο χρονικό διάστημα (π.χ. 20+ χρόνια) και τα καύσιμα της είναι δωρεάν, η αιολική ενέργεια μετριάζει την αβεβαιότητα τιμής σε αντίθεση κόστος των καυσίμων στις παραδοσιακές πηγές ενέργειας.
- 2) Δεδομένου ότι οι ίδιες οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν αυστηρά με την ισχύ του ανέμου, δεν υπάρχει ανάγκη για καύσιμα. Μόλις ολοκληρωθεί η εγκατάσταση του στροβίλου, δεν χρειάζεται να τροφοδοτηθεί με καύσιμο ή να συνδεθεί με ρεύμα για να συνεχίσει να λειτουργεί. Αυτό μειώνει επίσης το συνολικό κόστος για τη συνέχιση της λειτουργίας αιολικών πάρκων μεγάλης κλίμακας σε σύγκριση με άλλες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες ενδέχεται να απαιτούν ορισμένες ενεργειακές επενδύσεις. Αποτελεί μια καθαρή πηγή καυσίμου. Η αιολική ενέργεια δεν μολύνει τον αέρα όπως οι σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής που βασίζονται στην καύση ορυκτών καυσίμων, όπως ο άνθρακας ή το φυσικό αέριο, που εκπέμπουν σωματίδια, οξείδια του αζώτου και διοξείδιο του θείου προκαλώντας προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία και οικονομικές ζημιές. Οι ανεμογεννήτριες δεν παράγουν ατμοσφαιρικές εκπομπές που προκαλούν όξινη βροχή, αιθαλομίχλη ή αέρια θερμοκηπίου.
- 3) Οι πιο πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία έχουν μετατρέψει τα προκαταρκτικά σχέδια ανεμογεννητριών σε εξαιρετικά αποδοτικές μηχανές συγκομιδής ενέργειας. Οι τουρμπίνες διατίθενται σε διάφορα μεγέθη, αυξάνοντας την αγορά σε πολλούς διαφορετικούς τύπους επιχειρήσεων και από ιδιώτες για οικιακή χρήση και σε μεγαλύτερα οικόπεδα. Καθώς η τεχνολογία βελτιώνεται

δημιουργούνται μοντέλα που θα παράγουν ακόμη περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια, θα απαιτούν λιγότερη συντήρηση και θα λειτουργούν πιο αθόρυβα και με ασφάλεια.

- 4) Οι προμηθευτές ενέργειας μπορούν να κατασκευάσουν τις ανεμογεννήτριές τους σε προϋπάρχουσες γεωργικές εκτάσεις και να πληρώσουν τους ιδιοκτήτες των αγροκτημάτων για να χτίσουν στην ιδιοκτησία τους με τη μορφή συμβολαίων ή μισθώσεων. Αυτό είναι ένα μεγάλο όφελος για τους αγρότες που μπορούν να χρησιμοποιήσουν επιπλέον εισόδημα και το γεγονός ότι οι ανεμογεννήτριες καταλαμβάνουν πολύ λίγο χώρο στο έδαφος, επομένως δεν διαταράσσουν την παραγωγή της φάρμας τους.
- 5) Επιπλέον μέσω της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας μειώνεται η εξάρτησή από τα ορυκτά καύσιμα. Η ενέργεια που παράγεται από ορυκτά καύσιμα όχι μόνο συμβάλλει στην κλιματική αλλαγή, αλλά με την πάροδο του χρόνου εξαντλείται.

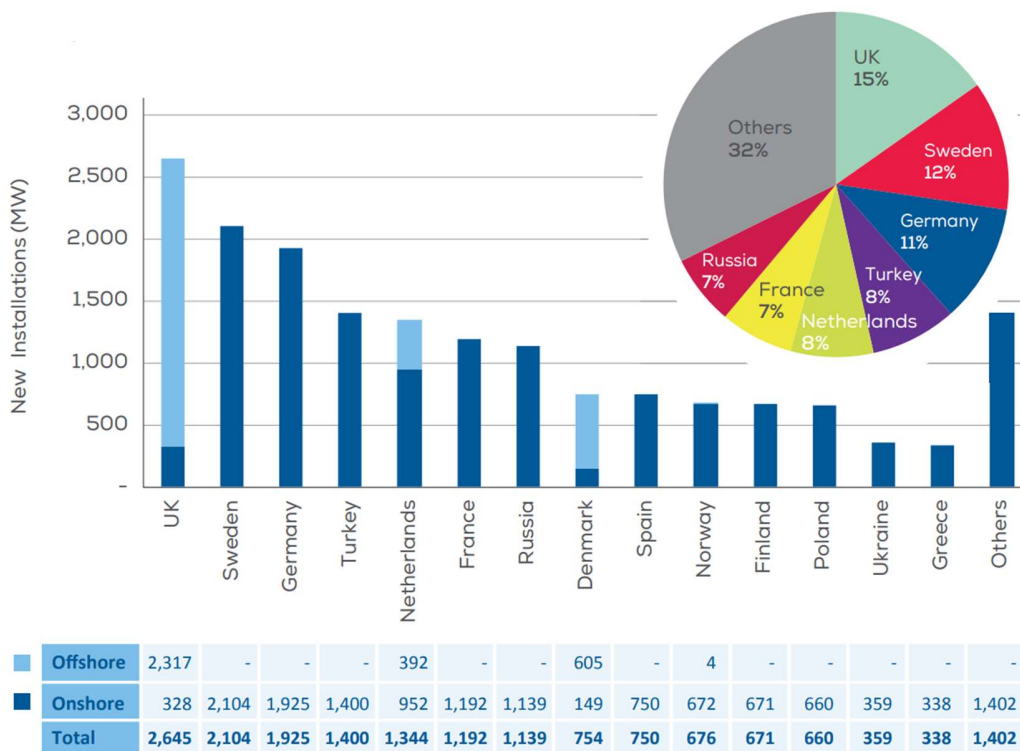
Παρά τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας υπάρχουν και κάποιοι παράγοντες που αποτελούν πρόκληση (Ιστοσελίδες: Justenergy & Energygov):

- 1) Η αιολική ενέργεια πρέπει να εξακολουθεί να ανταγωνίζεται τις συμβατικές πηγές παραγωγής. Παρόλο που το κόστος της αιολικής ενέργειας έχει μειωθεί δραματικά τις τελευταίες δεκαετίες, τα αιολικά έργα πρέπει να είναι σε θέση να ανταγωνίζονται οικονομικά τη φθηνότερη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας και ορισμένες τοποθεσίες μπορεί να μην έχουν αρκετά μεγάλες ταχύτητες ανέμου ώστε να είναι ανταγωνιστικά από πλευράς κόστους. Γενικά το πρόβλημα της αιολικής ενέργειας είναι η «ασυνέπεια» του ίδιου του ανέμου. Δεδομένου ότι η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να έχει διάφορες τιμές, είναι δύσκολο να προβλεφθεί η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να συλλέξει σε μια δεδομένη στιγμή. Αυτό σημαίνει ότι οι προμηθευτές και οι πόλεις πρέπει να διαθέτουν ενεργειακό απόθεμα ή εναλλακτικές πηγές ενέργειας και συστήματα αποθήκευσης.
- 2) Οι ενδεδειγμένες χερσαίες αιολικές τοποθεσίες βρίσκονται συχνά σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, μακριά από πόλεις όπου απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια. Πρέπει να κατασκευαστούν γραμμές μεταφοράς για να φέρουν την ηλεκτρική ενέργεια από το αιολικό πάρκο στην πόλη. Ωστόσο, η κατασκευή μόνο μερικών ήδη προτεινόμενων γραμμών μεταφοράς θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά το κόστος της επέκτασης της αιολικής ενέργειας.
- 3) Η ανάπτυξη αιολικών πόρων μπορεί να μην είναι η πιο κερδοφόρα χρήση της γης. Η κατάλληλη γη-περιοχή για εγκατάσταση ανεμογεννητριών πρέπει να ανταγωνίζεται εναλλακτικές χρήσεις της γης, η οποία μπορεί να έχει μεγαλύτερη αξία από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- 4) Οι τουρμπίνες ενδέχεται να προκαλέσουν θόρυβο και αισθητική ρύπανση γεγονός που αποτελεί υποκειμενικό παράγοντα. Αν και οι σταθμοί αιολικής ενέργειας έχουν σχετικά μικρό αντίκτυπο στο περιβάλλον σε σύγκριση με τους συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, υπάρχει ανησυχία για τον θόρυβο που παράγεται από τα πτερύγια του στροβίλου και τις οπτικές επιπτώσεις στο τοπίο. Βέβαια η ελάχιστη απόσταση, στις τοποθεσίες που κατασκευάζονται τα αιολικά πάρκα, από οικιστική περιοχή είναι αρκετά μεγάλη ώστε ο θόρυβος να μην είναι αισθητός.
- 5) Οι ανεμογεννήτριες μπορεί να επηρεάσουν την τοπική άγρια ζωή. Υπάρχει ενδεχόμενο τα μεταναστευτικά πτηνά να τραυματιστούν ή να σκοτωθούν εάν πέσουν στα πτερύγια των ανεμογεννητριών. Τα περισσότερα από αυτά τα προβλήματα έχουν επιλυθεί ή μειωθεί σημαντικά μέσω της ανάπτυξης τεχνολογίας ή με τη σωστή τοποθέτηση των αιολικών σταθμών. Η έρευνα συνεχίζεται για την ανάπτυξη και τη βελτίωση λύσεων για τη μείωση του αντίκτυπου των ανεμογεννητριών σε αυτά τα είδη. Όπως όλες οι πηγές ενέργειας, τα αιολικά έργα μπορούν να

αλλάξουν τον βιότοπο στον οποίο κατασκευάζονται, γεγονός που μπορεί να αλλάξει την καταλληλότητα αυτού του οικοτόπου για ορισμένα είδη.

2.3 Αιολική ενέργεια στην Ευρώπη

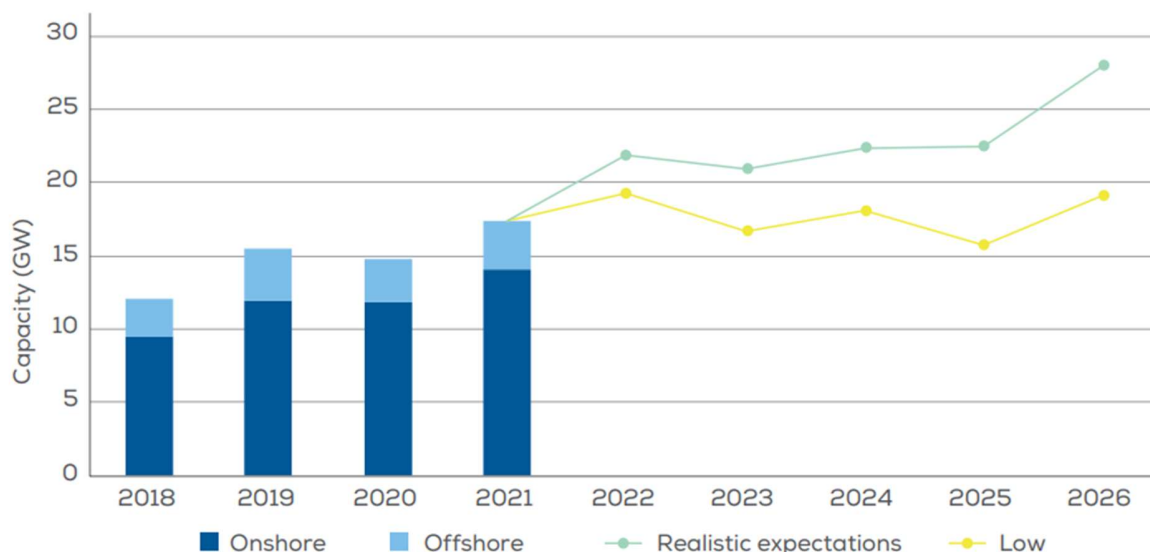
Η Ευρώπη εγκατέστησε 17 GW ισχύος αιολικής ενέργειας το 2021, ενώ οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης εγκατέστησαν 11 GW. Τα μεγέθη αυτά δεν επαρκούν ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το κλίμα και την ενέργεια για το 2030. Το 81% των νέων αιολικών εγκαταστάσεων στην Ευρώπη ήταν χερσαία αιολική ενέργεια. Η Σουηδία, η Γερμανία και η Τουρκία εκμεταλλεύτηκαν το μεγαλύτερο ποσοστό χερσαίου ανέμου. Το Ηνωμένο Βασίλειο είχε τις υψηλότερες συνολικά νέες αιολικές εγκαταστάσεις, επειδή αντιπροσώπευαν τις περισσότερες από τις νέες υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις. Σήμερα η Ευρώπη έχει 236 GW αιολικής ισχύος. Στην Εικόνα 2.1 φαίνονται η νέες χερσαίες και υπεράκτιες εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη το 2021 (Wind Energy in Europe, 2021).



Εικόνα 2.1 Νέες χερσαίες και υπεράκτιες εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη το 2021 (Πηγή: Wind Energy in Europe, 2021)

Κατά την περίοδο 2022-2026 αναμένεται ότι η Ευρώπη θα εγκαταστήσει 116 GW νέων αιολικών πάρκων δηλαδή 23 GW το χρόνο κατά μέσο όρο. Το 75% των νέων εγκαταστάσεων αιολικού δυναμικού θα είναι χερσαία αιολική ενέργεια. Επίσης αναμένεται ότι οι χώρες της Ε.Ε θα εγκαταστήσουν κατά μέσο όρο 18 GW νέων αιολικών πάρκων μεταξύ 2022-2026. Οι προαναφερθείσες προσδοκίες για το 2022-2026 προϋποθέτουν ότι οι κυβερνήσεις θα εκπληρώσουν τις σταθερές (και ακόμη σχετικά μέτριες) δεσμεύσεις που έχουν ήδη αναλάβει για να βελτιώσουν την αδειοδότηση νέων αιολικών πάρκων. Σε κάθε περίπτωση,

οι κυβερνήσεις πρέπει να απλοποιήσουν και να επιταχύνουν σημαντικά την αδειοδότηση αιολικών έργων για την Ευρώπη για την επίτευξη των στόχων της για το 2030. Αναμένεται από τη Γερμανία να εγκαταστήσει τη μεγαλύτερη αιολική ισχύ μεταξύ 2022-2026: 25 GW, το μεγαλύτερο μέρος της στην ξηρά. Το Ηνωμένο Βασίλειο θα ακολουθήσει με 15 GW με το μεγαλύτερο μέρος της να είναι υπεράκτια, λόγω του ισχυρού υπεράκτιου τομέα του. Η Γαλλία, η Ισπανία και η Σουηδία θα παραγάγουν τις επόμενες μεγαλύτερες τιμές. Στην Εικόνα 2.2 φαίνονται τα σενάρια για την εγκατάσταση αιολικού δυναμικού την περίοδο 2022-2026 στην Ευρώπη (Wind Energy in Europe, 2021).



Εικόνα 2.2 Σενάρια για το 2022-2026 εγκατεστημένης αιολικής ισχύος στην Ευρώπη (Πηγή: Wind Energy in Europe, 2021).

Αναλυτικότερα όσον αφορά τις νέες εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά αξιολογημένα στοιχεία της κάθε χώρας (Wind Energy in Europe, 2021).

Το Ηνωμένο Βασίλειο: είχε 2,6 GW εγκαταστάσεων, με τις υπεράκτιες εγκαταστάσεις να αποτελούν το 88%. Οι υπεράκτιες εγκαταστάσεις ήταν αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης των υπεράκτιων αιολικών πάρκων Moray East και Triton Knoll. Αν και οι χερσαίες εγκαταστάσεις στο Ηνωμένο Βασίλειο αυξάνονταν κάθε χρόνο, εξακολουθούν να είναι το δεύτερο χαμηλότερο ποσοστό από το 2005.

Η Σουηδία: σημείωσε έτος ρεκόρ για εγκαταστάσεις καθώς οι χερσαίες εγκαταστάσεις υπερδιπλασιάστηκαν από έτος σε έτος. Με 2,1 GW νέων χερσαίων εγκαταστάσεων, η Σουηδία συνέδεσε την μεγαλύτερη χερσαία αιολική δυναμικότητα στην Ευρώπη.

Η Γερμανία: ήταν η τρίτη μεγαλύτερη χώρα για αιολικές εγκαταστάσεις. Οι χερσαίες εγκαταστάσεις αυξήθηκαν σε 1,9 GW (από 1,4 GW το 2020) αντανακλώντας μια ελαφρά βελτίωση στην κατάσταση αδειοδότησης. Ο παροπλισμός των χερσαίων αιολικών πάρκων παρέμεινε σχετικά χαμηλός στα 0,2 GW καθώς οι υψηλές τιμές χονδρικής ηλεκτρικής ενέργειας αντιστάθμισαν το αυξημένο λειτουργικό κόστος των παλαιών ανεμογεννητριών. Δεν υπήρχαν υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις στη Γερμανία καθώς τα αιολικά πάρκα που παραχωρήθηκαν στις πρώτες δημοπρασίες το 2018 περιμένουν την ανάπτυξη της

δικτυακής υποδομής από τον Διαχειριστή του Συστήματος Μεταφοράς και αναμένεται να τεθούν σε λειτουργία μόνο το 2022/23.

Η Τουρκία: εγκατέστησε ρεκόρ αιολικής ισχύος 1,4 GW, ξεπερνώντας ελαφρά ένα προηγούμενο ρεκόρ το 2016.

Η Ολλανδία: εγκατέστησε 1,3 GW αιολικής ισχύος που αποτελείται από χερσαίες αιολικές εγκαταστάσεις (952 MW).

Η Γαλλία: εγκατέστησε 1,2 GW χερσαίας ισχύος, 10% χαμηλότερη από το 2020 (1,3 GW) και συνεχίζει μια ανησυχητική τάση μείωσης των εγκαταστάσεων από την κορύφωσή τους το 2017, όταν εγκαταστάθηκαν 1,7 GW

Η Ρωσία: ήταν η έβδομη μεγαλύτερη αγορά και η τρίτη μεγαλύτερη αγορά εκτός Ε.Ε στην Ευρώπη. Με 1,1 GW εγκαταστάσεων η Ρωσία σημείωσε αύξηση 60% σε σχέση με τα στοιχεία εγκατάστασης του 2020.

Η Δανία: εγκατέστησε 754 MW το 2021 με το μεγαλύτερο μέρος τους να προέρχεται από υπεράκτια αιολική ενέργεια. Το Kriegers Flak, το πρώτο υβριδικό υπεράκτιο αιολικό έργο στον κόσμο (που συνδέεται τόσο με τη Δανία όσο και με τη Γερμανία) συνεισέφερε 0,6 GW σε εγκαταστάσεις στη Δανία.

Η Ισπανία: εκτιμάται ότι έχει εγκαταστήσει 750 MW το 2021, μια πτώση 56% σε σύγκριση με το 2020. Αυτό οφείλεται κυρίως στην έλλειψη δημοπρασιών που πραγματοποιήθηκαν μεταξύ 2018 και 2020.

Οι εγκαταστάσεις στη Νορβηγία (0,7 GW) προήλθαν από το σύστημα πράσινων πιστοποιητικών που καταργήθηκε σταδιακά και από ορισμένες εταιρικές συμφωνίες αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η Φινλανδία (0,7 GW) σημείωσε έτος ρεκόρ για νέες εγκαταστάσεις, λόγω της έντονης απορρόφησης των ΜΠΣ και των έργων εμπορίου. Η Πολωνία (0,7 GW) είδε επίσης μια ισχυρή χρονιά, καθώς η χωρητικότητα που δημοπρατήθηκε το 2018 και το 2019 έρχεται τελικά στο διαδίκτυο.

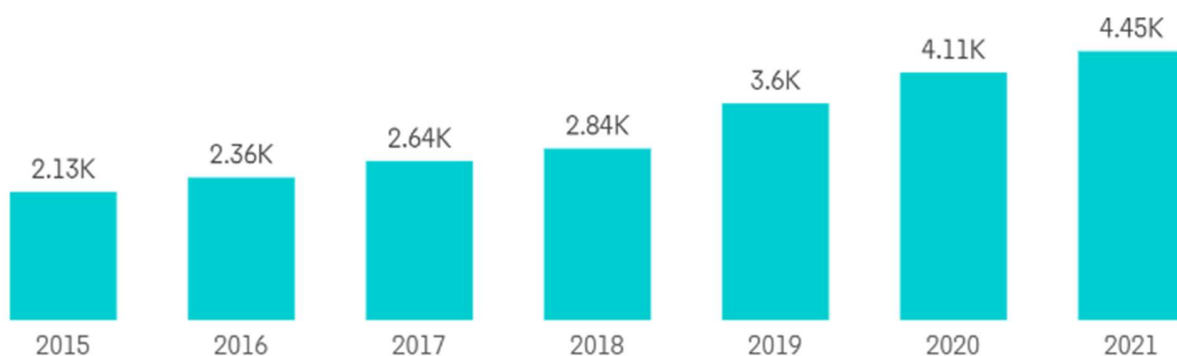
2.4 Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα

Το Μάρτιο του 2021 η Ελλάδα παρήγαγε και εισήγαγε 4,206 GWh ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με τον Ανεξάρτητο Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας. Όσον αφορά το ενεργειακό αυτό μείγμα το 32% παρήχθη από φυσικό αέριο, το 15% από λιγνίτη, το 7% από υδροηλεκτρική ενέργεια και το 33% από άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΕΛΙΑΜΕΠ, 2021).

Από το δεύτερο εξάμηνο του 2020 η Ελλάδα ξεπέρασε τα 4.000 MW εγκατεστημένης αιολικής ισχύος γεγονός που ανακοινώθηκε από την Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ). Η ελληνική αγορά αιολικής ενέργειας αναμένεται να σημειώσει ετήσιο ρυθμό ανάπτυξης (CAGR) άνω του 3% κατά την προβλεπόμενη περίοδο 2022 - 2027. Η έξαρση του COVID-19 οδήγησε σε καθυστερημένες διαδικασίες αδειοδότησης για νέα αιολικά έργα και σε ανεπαρκές ανθρώπινο δυναμικό για τα τρέχοντα αιολικά έργα. Αυτά είναι τα κύρια ζητήματα που επηρέασαν την ανάπτυξη του τομέα της αιολικής ενέργειας λόγω της πανδημίας COVID-19. Παράγοντες όπως η αυξανόμενη ζήτηση για εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας, οι αυξανόμενες επενδύσεις σε τρέχοντα και επερχόμενα έργα αιολικής ενέργειας αναμένεται να οδηγήσουν την αγορά κατά την προβλεπόμενη περίοδο. Ωστόσο, η αυξανόμενη έμφαση στην ηλιακή ενέργεια για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στη χώρα αναμένεται να περιορίσει την ελληνική αγορά αιολικής ενέργειας. Το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα της

Ελλάδας στοχεύει στην εγκατάσταση 7 GW αιολικής ενέργειας στη χώρα έως το 2030. Αυτό είναι πιθανό να δημιουργήσει πολλές ευκαιρίες για την ελληνική αγορά αιολικής ενέργειας σύντομα.

Το μείγμα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας της Ελλάδας κυριαρχείται από την αιολική ενέργεια. Η αιολική ενέργεια είναι η ταχύτερα αναπτυσσόμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας αντιπροσωπεύει μερίδιο περίπου 37,9% στο συνολικό μείγμα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας της χώρας. Σύμφωνα με τις στατιστικές της Ελληνικής Επιστημονικής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας 2022, η χερσαία αιολική ενέργεια έφτασε τα 4.451 MW εγκατεστημένης ισχύος το 2021. Η χερσαία αιολική ενέργεια σημείωσε αύξηση 8,2% από έτος σε έτος. Επί του παρόντος, η Ελλάδα έχει εγκαταστήσει 4 GW αιολικής ενέργειας, όλα στην ξηρά, καλύπτοντας το 12% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας το 2020. Οι δυνατότητες αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα είναι πολύ μεγαλύτερες, ιδιαίτερα για χερσαίο άνεμο. Τον Δεκέμβριο του 2020, η Terna Energy εξασφάλισε 585 εκατ. ευρώ για την ανάπτυξη 18 αιολικών έργων συνολικής ισχύος 360 MW στον δήμο Καρύστου. Τα έργα αυτά συνδέθηκαν με το Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας μέσω ενός υποθαλάσσιου καλωδίου μήκους 69 km. Επίσης, έχουν εγκριθεί άλλα πέντε αιολικά έργα συνολικής ισχύος 120,3 MW, αξίας 121,3 εκατ. ευρώ. Αυτά τα έργα είναι πιθανό να προκύψουν στις περιοχές της Ξάνθης και της Ροδόπης. Τον Μάρτιο του 2021, η Iberdrola υπέγραψε σύμβαση προμήθειας τουρμπίνας 102 MW για τα αιολικά της πάρκα Askio II, Askio III και Rokani. Το έργο Rokani, στην περιοχή της Βοιωτίας, εγκαθιστά τρεις ανεμογεννήτριες EnVentus V162-6,0 MW, τις πιο ισχυρές χερσαίες ανεμογεννήτριες στην αγορά που θα χρησιμοποιηθούν για πρώτη φορά στην Ελλάδα. Τον Δεκέμβριο του 2021, η EDP Renewables κατασκεύασε και εγκαινίασε μια μονάδα αιολικής ενέργειας 45 MW. Το εργοστάσιο βρίσκεται κοντά στην πόλη της Μαλεσίνας στην κεντρική Ελλάδα και αναμένεται να παράγει αρκετή ηλεκτρική ενέργεια για να τροφοδοτήσει πάνω από 28.000 νοικοκυριά. Ως εκ τούτου, τα παραπάνω σημεία δείχνουν ότι η αυξανόμενη χερσαία αιολική ενέργεια αναμένεται να κυριαρχήσει στην ελληνική αγορά αιολικής ενέργειας κατά την περίοδο πρόβλεψης. Στο Διάγραμμα 2.1 φαίνεται η εγκατεστημένη αιολική ισχύς σε MW στη χώρα για το διάστημα 2015 έως 2021 (Mordor Intelligence, n.d).



Διάγραμμα 2.1 Εγκατεστημένη αιολική ισχύς στην Ελλάδα (MW) από το 2015-2021 (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ, 2021)

2.5 Υπεράκτια αιολική ενέργεια

Το Vindeby (Εικόνα 2.3) ήταν το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο το οποίο κατασκευάστηκε το 1991 στη Δανία στο νησί Lolland (και η λειτουργία του τερματίστηκε το 2017 λόγω κόστους συντήρησης) σε

βάθος 2-5 m με 11 ανεμογεννήτριες και παρείχε ενέργεια σε περισσότερα από 2000 νοικοκυριά (ΕΛΙΑΜΕΠ, 2021). Μετά την κατασκευή του Vindeby η ανάπτυξη των νέων υπεράκτιων αιολικών πάρκων ήταν αργή. Τα επόμενα δέκα χρόνια, κατασκευάστηκαν μόνο μερικά ακόμη υπεράκτια αιολικά πάρκα –στη Δανία, τη Σουηδία, την Ολλανδία και το Ηνωμένο Βασίλειο–, με το μεγαλύτερο να είναι 40 MW. Τα πρώτα υπεράκτια αιολικά πάρκα ήταν σχετικά απλά: χερσαίες μηχανές που βασίζονται σε θεμέλια από σκυρόδεμα σε ρηχά νερά. Πρακτικά τα έργα αυτά απέδειξαν τη σκοπιμότητα της ιδέας της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, παρά το γεγονός ότι ήταν δυσκολότερη η εγκατάσταση και η πρόσβαση. Ορισμένα πρώιμα αιολικά πάρκα παρήγαγαν περισσότερη ενέργεια από την αναμενόμενη. Το γεγονός αυτό, μαζί με την αυξανόμενη πολιτική ανησυχία για την κλιματική αλλαγή, οδήγησε στη ζήτηση περισσότερων έργων υπεράκτιας αιολικής ενέργειας.



Εικόνα 2.3 Υπεράκτιο αιολικό πάρκο Vindeby (Πηγή: Alchetron, 2018)

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τους χερσαίους αιολικούς σταθμούς, ειδικά σε σχέση με το αιολικό δυναμικό:

- 1) Οι μέσες ταχύτητες του ανέμου στις υπεράκτιες περιοχές είναι υψηλότερες και η μεταβλητότητα της αιολικής ενέργειας είναι επίσης χαμηλότερη από την αιολική ενέργεια στην ξηρά.
- 2) Η οπτική και ακουστική επίδρασή τους είναι συνήθως χαμηλότερη από την ξηρά
- 3) Μπορούν να εγκατασταθούν μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες
- 4) Η ταχύτητα του υπεράκτιου ανέμου συνήθως αυξάνεται με την απόσταση από την ακτή, αυξάνοντας έτσι την παραγόμενη ενέργεια, καθώς εξαρτάται από τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου

Ωστόσο, το υψηλότερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης υπεράκτιων σταθμών αιολικής ενέργειας μακριά από την ακτή εξισορροπεί τα οφέλη της υψηλότερης παραγωγής ενέργειας. Πράγματι, το κόστος των υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι περίπου 50% πιο ακριβά σε σχέση με τις χερσαίες εγκαταστάσεις, αλλά το κόστος τους αναμένεται να μειωθεί έως και 35% έως το 2025. Το κόστος

ηλεκτρικής ενέργειας (Levelized cost of energy) το 2018 ήταν 20% χαμηλότερο από το 2010. Αυτές οι μειώσεις κόστους μπορεί να είναι αποτέλεσμα (Guillamón et al, 2019):

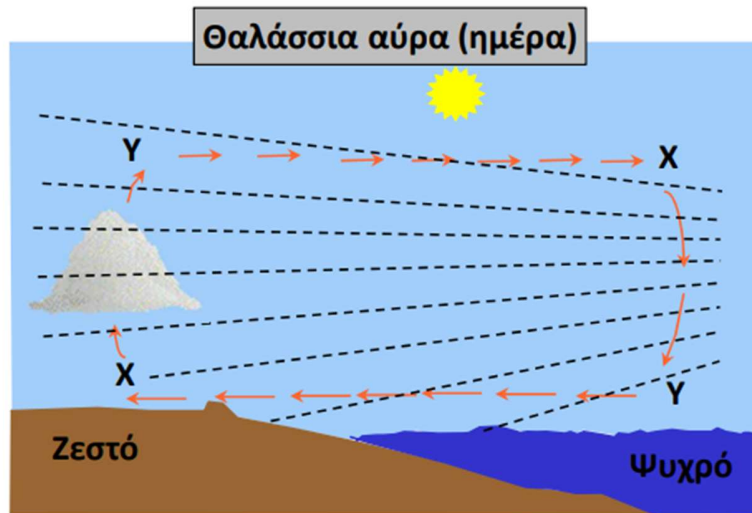
- Της εξέλιξης στην τεχνολογία και εγκατάσταση ανεμογεννητριών
- Των οικονομιών κλίμακας σε λειτουργία και συντήρηση
- Των βελτιωμένων παραγόντων χωρητικότητας λόγω μεγαλύτερων υψών πλήμνης, καλύτερων αιολικών πόρων και μεγαλύτερων διαμέτρων ρότορα

Στην Ελλάδα μέχρι στιγμής δεν υπάρχει εγκατάσταση υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Το Εθνικό Πρόγραμμα Ανάπτυξης Θαλάσσιων Αιολικών Πάρκων σύμφωνα με τον Ν.3851/2010 ήταν η πρώτη προσπάθεια χωροθέτησης θαλάσσιων αιολικών πάρκων στον ελληνικό χώρο που όμως δεν ευδοκίμησε και θα αναφερθεί αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο.

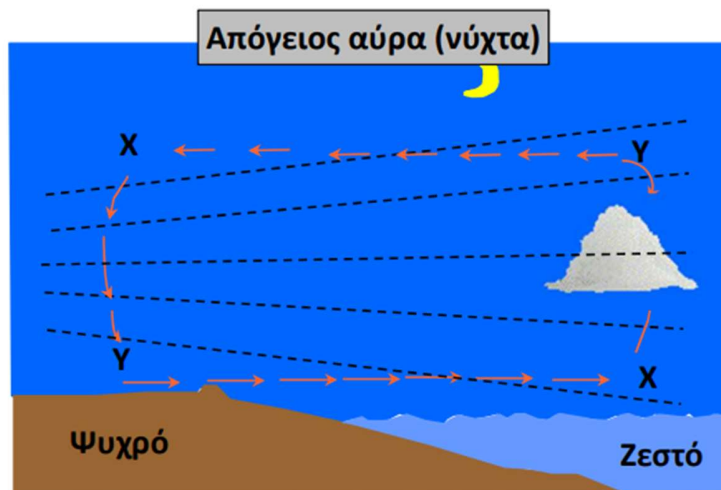
2.6 Αιολική Ενέργεια, Φυσικοί Νόμοι

2.6.1 Ταχύτητα του ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου έχει σημαντικό ρόλο στην παραγόμενη ενέργεια. Ο άνεμος αποτελεί ένα μεταβλητό στοιχείο καθώς η ταχύτητα η κατεύθυνση και η θερμοκρασία του μεταβάλλονται συνεχώς (Hau, 2006). Η ταχύτητα του αέρα καθορίζει τη δύναμη του ανέμου και σχετίζεται άμεσα με την ποσότητα ενέργειας του ανέμου, δηλαδή την κινητική του ενέργεια. Η πηγή αυτής της ενέργειας όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι η ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία από τον ήλιο θερμαίνει άμεσα την επιφάνεια της γης και είναι πιο ισχυρή στις τροπικές περιοχές και πιο αδύναμη στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη (Kalmikov, 2017). Οι περιοχές του Ισημερινού όπως είναι αναμενόμενο θερμαίνονται περισσότερο από τους πόλους. Επίσης, ως αποτέλεσμα της διαφορετικής απορρόφησης του ηλιακού φωτός από το έδαφος, τους βράχους, το νερό και τη βλάστηση, ο αέρας θερμαίνεται με διαφορετικό ρυθμό. Η θερμοχωρητικότητα της στεριάς είναι μικρότερη από της θάλασσας και συνεπώς κατά τη διάρκεια της ημέρας η στεριά ψύχεται και θερμαίνεται γρηγορότερα από τη θάλασσα. Έτσι οι πιο ψυχρές μάζες αέρα μετακινούνται από τη θάλασσα προς τη στεριά φαινόμενο που είναι γνωστό ως θαλάσσια αύρα (Εικόνα 2.4). Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει κατά τη διάρκεια της νύχτας που η θάλασσα είναι θερμότερη (Εικόνα 2.5). Το ίδιο συμβαίνει και μεταξύ των βουνών και των γειτονικών κοιλάδων και συνεπώς δημιουργούνται άνεμοι από τις κοιλάδες προς τις πλαγιές (Εικόνα 2.6 και 2.7). Συνεπώς συμπεραίνεται ότι η διαρκής κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα οφείλεται α) στην ηλιακή ακτινοβολία και τον τρόπο που φτάνει στη γη β) στο ανομοιογενές ανάγλυφο της γης και γ) στην περιστροφική κίνηση της γης. Στην Ευρώπη οι άνεμοι που επικρατούν είναι τον χειμώνα οι Νοτιοδυτικοί και το καλοκαίρι οι Βορειοδυτικοί και Δυτικοί άνεμοι καθώς επηρεάζεται από τα ανατολικά ρεύματα του Ατλαντικού ωκεανού, τα ρεύματα της Σαχάρας και τα ψυχρά βόρεια (Βραχίμης κ.α, 2010). Η ταχύτητα του ανέμου σε μια περιοχή μεταβάλλεται ανάλογα με το υψόμετρο και με τον χρόνο.



Εικόνα 2.4 Δημιουργία θαλάσσιας αύρας (Πηγή: Μαμάσης & Ευστρατιάδης, 2018)



Εικόνα 2.5 Δημιουργία απόγειου αύρας (Πηγή: Μαμάσης & Ευστρατιάδης, 2018)

Κυκλοφορία αέρα σε ορεινή κοιλάδα (ημέρα)



Εικόνα 2.6 Κυκλοφορία αέρα σε ορεινή κοιλάδα (ημέρα) (Πηγή: Μαμάσης & Ευστρατιάδης, 2018)

Κυκλοφορία αέρα σε ορεινή κοιλάδα (νύχτα)



Εικόνα 2.7 Κυκλοφορία αέρα σε ορεινή κοιλάδα (νύχτα) (Πηγή: Μαμάσης & Ευστρατιάδης, 2018)

Η κινητική ενέργεια μίας μάζας αέρα m που κινείται με ταχύτητα V , δίνεται από τη σχέση (Μαρνέλλος, n.d):

$$E = \frac{1}{2} mV^2 \text{ (J)} \quad (1)$$

Και η ισχύς δίνεται από τη σχέση (Μαρνέλλος, n.d):

$$P = \frac{1}{2} MV^2 \text{ (W)} \quad (2)$$

Όπου $M = \rho \times V \times A$ [kg/s] η μαζική παροχή του αέρα μέσω της επιφάνειας που σαρώνεται από τα πτερύγια του δρομέα

- ρ [kg/m³]: η πυκνότητα του αέρα (σε κανονικές συνθήκες – πίεση 1 atm και θερμοκρασία 25 C° – η πυκνότητα του αέρα είναι 1,225 Kg/m³)
- V [m/s]: η ταχύτητα του ανέμου και,

- $A [m^2]$: το εμβαδόν της επιφάνειας που σαρώνεται από τα πτερύγια του δρομέα

Συνεπώς, η εξίσωση που δίνει την ισχύ του ανέμου, που διέρχεται από μία επιφάνεια A , κάθετη στη διεύθυνση του, με ταχύτητα V , παίρνει τη μορφή:

$$P = \frac{1}{2} (\rho AV) V^2 = \frac{1}{2} \rho AV^3 \text{ (W)} \quad (3)$$

Συνεπώς από τις παραπάνω σχέσεις φαίνεται ότι η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη της τρίτης δύναμης της ταχύτητάς και ανάλογη της πυκνότητάς του. Όμως για την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου αξιολογείται η ειδική ισχύς του ανέμου της περιοχής δηλαδή η ισχύς του ανέμου που δυνητικά σαρώνεται ανά μονάδα επιφάνειας από τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας και προκύπτει από την εξίσωση της ισχύς του ανέμου (3) διαιρώντας τη με την επιφάνεια A (Μαρνέλλος, n.d) :

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho V^3 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (4)$$

2.6.2 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος

Η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου ανάλογα με το ύψος (δηλαδή της απόστασης από τη γη ή τη θάλασσα) αποτελεί μια σημαντική γνώση καθώς έτσι ανάλογα με την περιοχή που θα χωροθετηθεί ένα αιολικό πάρκο υπολογίζεται το ύψος των ανεμογεννητριών που θα χρησιμοποιηθεί. Η μεταβολή της ταχύτητας ανάλογα με την απόσταση του σημείου μέτρησης από τη στεριά ή τη θάλασσα είναι ανάλογη της αντίστασης των δύο σωμάτων, δηλαδή της τραχύτητας του εδάφους και της θάλασσας, στην κίνηση του ανέμου (Κανέλλας, 2016). Η ταχύτητα μεταβάλλεται συναρτήσει του υψομέτρου, σύμφωνα με τον λογαριθμικό νόμο:

$$\frac{V_2}{V_1} = \ln \frac{z_2}{z_0} / \ln \frac{z_1}{z_0} \quad (5)$$

όπου V_1, V_2 η ταχύτητα του ανέμου σε ύψη z_1 και z_2 αντίστοιχα, και z_0 παράμετρος τραχύτητας

Οι τυπικές τιμές παραμέτρου τραχύτητας z_0 για διάφορες φυσικές επιφάνειες (cm) είναι (Μαμάσης & Ευστρατιάδης, 2018):

- Πάγος: 0.001
- Ασφαλτοστρωμένη επιφάνεια: 0.002
- Υδάτινη επιφάνεια: 0.01-0.06
- Χλόη ύψους μέχρι 1 cm: 0.1
- Χλόη ύψους μέχρι 1-10 cm: 0.1-0.2
- Χλόη-σιτηρά ύψους 10-50 cm: 2-5
- Φυτοκάλυψη ύψους 1-2 m: 20
- Δένδρα ύψους 10-15 m: 40-70

Ο εκθετικός νόμος διανομής της ταχύτητας μέσα στο επιφανειακό στρώμα που λόγω απλότητας χρησιμοποιείται στα μετεωρολογικά προβλήματα είναι (Βραχίμης κ.α, 2010):

$$V(z) = V(z_0) \cdot \left(\frac{z}{z_0} \right)^a \quad (6)$$

Όπου α είναι η ένδειξη της μορφής της επιφάνειας του εδάφους και ενδεικτικές τιμές που βασίζονται σε πειραματικές προσεγγίσεις είναι:

$\alpha = 0.17$ για ανοιχτά πεδία (θάλασσες κ.λ.π)

$\alpha = 0.20$ για μικρές πόλεις με χαμηλές κατασκευές

$\alpha = 0.25$ για μεγάλες πόλεις με πολυώροφες κατασκευές

2.6.3 Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου με τον χρόνο

Στο επιφανειακό στρώμα στο οποίο βρίσκονται οι ανθρώπινες κατασκευές, μεταξύ αυτών και οι ανεμογεννήτριες, υπάρχουν δυνάμεις τριβής, λόγω μεγάλων αντικειμένων ή λόγω φαινομένων που οφείλονται στον στροβιλισμό που επιβραδύνουν την ταχύτητα του ανέμου. Ο στροβιλισμός προκαλεί απότομες και παροδικές μεταβολές στην επιφάνεια του ανέμου μικρής διάρκειας και επαναλαμβανόμενες σε τακτά χρονικά διαστήματα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ριπαίος άνεμος. Για το διαχωρισμό των μεταβολών της ταχύτητας του ανέμου από το στροβιλισμό από τις μεταβολές σε μακρομετεωρολογικά φαινόμενα, χρησιμοποιείται το μέγεθος της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου \bar{V} (Κανέλλας, 2016):

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} v(t) dt \quad (7)$$

όπου $v(t)$ η στιγμιαία ταχύτητα ανέμου και T το χρονικό διάστημα της μέτρησης.

2.6.4 Ονομαστική Ισχύς

Ονομαστική ισχύς είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδώσει ένα σύστημα και οι ανεμογεννήτριες αποτελούν μηχανές μεταβλητής ισχύος (Μαμάσης & Ευστρατιάδης, 2018). Παγκοσμίως δεν υπάρχει αναγνωρισμένη μέθοδος υπολογισμού της ονομαστικής ισχύος των ανεμογεννητριών καθώς η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται εξαρτάται από το τετράγωνο του μήκους των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας και την τρίτη δύναμη της ταχύτητας του ανέμου που φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$P_0 = C_P \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V_3 \quad (8)$$

Όπου C_P ο συντελεστής ισχύος (power coefficient) C_P του δρομέα

Συνεπώς μια ανεμογεννήτρια παράγει διαφορετική ισχύ σε διαφορετικές ταχύτητες ανέμου έχοντας σταθερό το μήκος των πτερυγίων. Για τις διάφορες ανεμογεννήτριες ορίζονται ονομαστικές ταχύτητες ανέμου οι τιμές των οποίων είναι 10-15 m/s αλλά δεν εξυπηρετούν τη σύγκριση για την ικανότητα παραγωγής ισχύος καθώς εξαρτάται από πολλά χαρακτηριστικά όπως η μεταβολή του συντελεστή απόδοσης με τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου, τη μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής με τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου, το είδος του κινητήρα κ.λ.π. Έτσι οι κατασκευαστές των ανεμογεννητριών αναφέρουν μόνο το μήκος των πτερυγίων και τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να παράγει ο ηλεκτροκινητήρας με ένα ζεύγος τιμών: μέγιστη ισχύς ηλεκτροκινητήρα/διάμετρος ρότορα (Μαρνέλλος, n.d.????).

2.6.5 Όριο Betz

Ο Albert Betz ήταν ένας Γερμανός φυσικός που υπολόγισε ότι καμία ανεμογεννήτρια δεν μπορούσε να μετατρέψει περισσότερο από το 59,3% της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική κατά

την περιστροφή του ρότορα. Αυτό είναι γνωστό ως όριο Betz και είναι ο θεωρητικός μέγιστος συντελεστής ισχύος C_p (όπως αναφέρθηκε προηγουμένως) για οποιαδήποτε ανεμογεννήτρια. Αναλυτικότερα:

Ο λόγος της θεωρητικά παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος (μέγιστη ισχύς ιδεατής ανεμογεννήτριας) προς την θεωρητική αιολική ισχύ καλείται συντελεστής ισχύος και δίνεται από τη σχέση (Μαμάσης & Ευστρατιάδης, 2018):

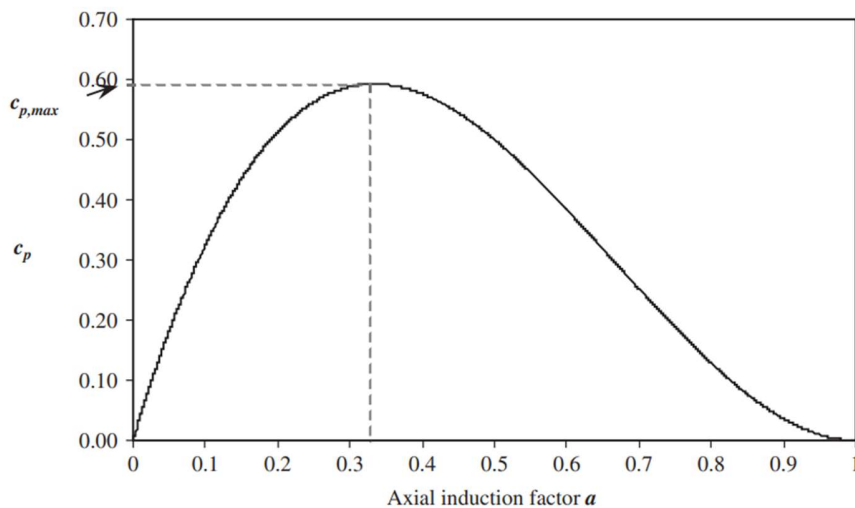
$$c = \frac{P}{P_0} = 4(a^{-2} - a^{-3}) \quad (9)$$

Ο συντελεστής ισχύος γίνεται μέγιστος όταν:

$$\frac{dc}{da} = 0 \Rightarrow -2a^{-3} + 3a^{-4} = 0 \Rightarrow a = \frac{3}{2} \quad (10)$$

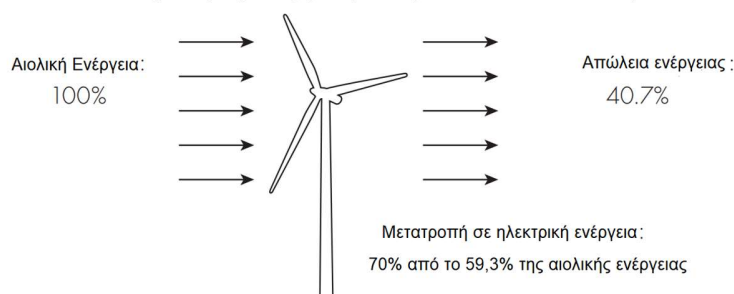
Αν αντικατασταθεί στη σχέση (1) ο μέγιστος συντελεστής ισχύος (2) (Εικόνα 2.8) (όριο Betz) προκύπτει:

$$C_{max} = 2 \left(\frac{2}{3} \right)^3 = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (11)$$



Εικόνα 2.8 Συντελεστής ισχύος ως συνάρτηση του συντελεστή a (Πηγή: *The university of western Ontario, n.d*)

Στην παρακάτω Εικόνα 2.9, η ανεμογεννήτρια μετατρέπει το 70% του ορίου Betz σε ηλεκτρική ενέργεια.

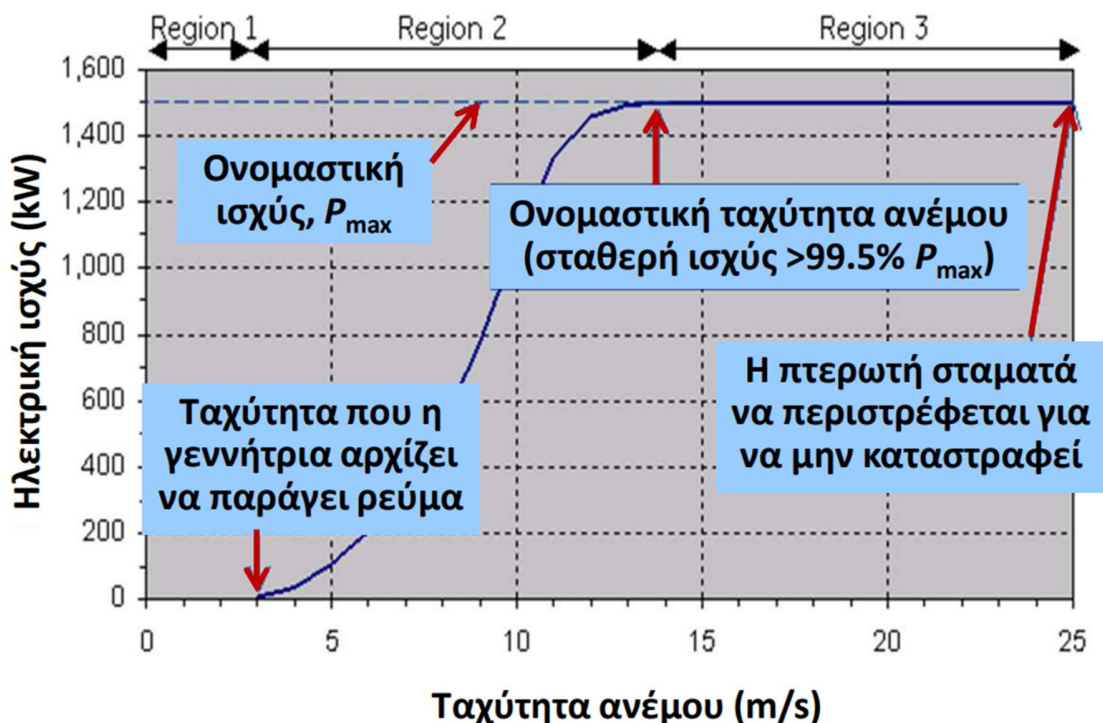


Εικόνα 2.9 Παράδειγμα μετατροπής αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική (The university of western Ontario, n.d)

Επομένως, το C_p αυτής της ανεμογεννήτριας θα ήταν $0,7 \times 0,59 = 0,41$. Αυτή η ανεμογεννήτρια μετατρέπει το 41% της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια και αποτελεί έναν αρκετά καλό συντελεστή ισχύος. Στην πραγματικότητα, οι ανεμογεννήτριες δεν μπορούν να φτάσουν το όριο Betz και οι κοινές αποδόσεις κυμαίνονται στο εύρος 35-45% (Afework et al, 2018). Αυτό εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου, το πλήθος και γωνία των πτερυγίων, και την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα (Μαμάσης & Ευστρατιάδης, 2018).

2.6.6 Ενεργειακή απόδοση ανεμογεννήτριας

Η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας εμφανίζει είτε την πραγματική ηλεκτρική ισχύ είτε το ποσοστό της ονομαστικής ισχύος της ανεμογεννήτριας ως συνάρτηση της μέσης ταχύτητας ανέμου. Οι καμπύλες ισχύος καθορίζονται συνήθως από τις επιτόπιες μετρήσεις στην περιοχή. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.10, η ανεμογεννήτρια αρχίζει να παράγει ισχύ με χαμηλή ταχύτητα ανέμου, η οποία είναι πρακτικά η ταχύτητα στην οποία η ανεμογεννήτρια αρχίζει να παράγει ρεύμα και ονομάζεται ταχύτητα έναρξης σχέση (Μαμάσης & Ευστρατιάδης, 2018). Η ισχύς αυξάνεται συνεχώς με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου μέχρι να φτάσει σε ένα σημείο κορεσμού, στο οποίο η ισχύς φτάνει τη μέγιστη τιμή της, που ορίζεται ως η ονομαστική ισχύς. Αντίστοιχα, η ταχύτητα σε αυτό το σημείο ορίζεται ως η ονομαστική ταχύτητα. Στην ονομαστική ταχύτητα, η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου δεν θα αυξήσει την ισχύ καθώς ενεργοποιείται ο «έλεγχος» ισχύος της ανεμογεννήτριας. Όταν η ταχύτητα του ανέμου γίνει αρκετά μεγάλη ώστε να καταστρέψει πιθανώς την πτερωτή, η ανεμογεννήτρια σταματάει αμέσως τη λειτουργία της για να αποφευχθεί η καταστροφή της πτερωτής της και η ταχύτητα αυτή ονομάζεται ταχύτητα παύσης (Μαμάσης & Ευστρατιάδης, 2018). Από τις δύο αυτές ταχύτητες, έναρξης και παύσης, καθορίζονται τα όρια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας (Tong, 2010).



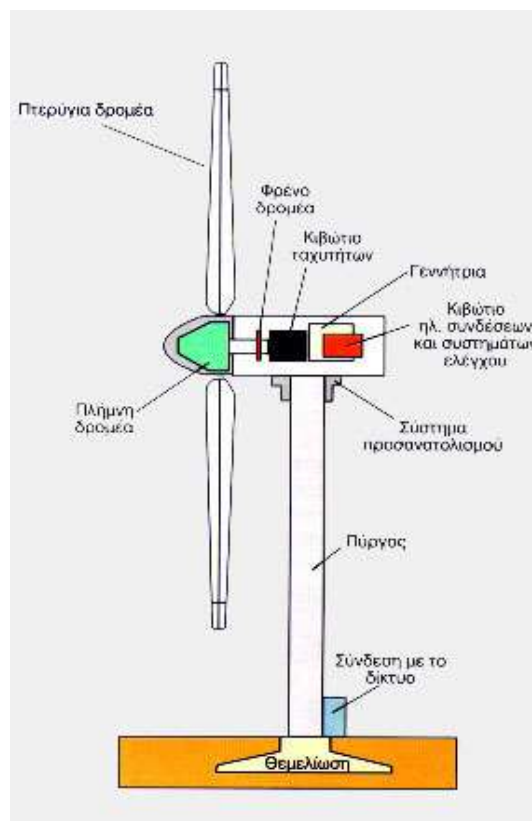
Εικόνα 2.10 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας (Πηγή: Μαμάσης & Ευστρατιάδης, 2018)

3. Υπεράκτια τεχνολογία ανεμογεννητριών

3.1 Τυπικός εξοπλισμός ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα

Όσον αφορά τη δομή μιας ανεμογεννήτριας κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούμε στα 10 κυριότερα μέρη της τα οποία φαίνονται στην Εικόνα 3.1 και αναλύονται παρακάτω:

1. Θεμελίωση
2. Πύργος
3. Πλήμνη δρομέα
4. Πτερύγια δρομέα
5. Φρένο δρομέα
6. Κιβώτιο ταχυτήτων
7. Γεννήτρια
8. Κιβώτιο ηλεκτρικών συνδέσεων και συστημάτων ελέγχου
9. Σύστημα προσανατολισμού
10. Σύνδεση με το δίκτυο



Εικόνα 3.1 Δομή ανεμογεννήτριας (Πηγή: Μαμάσης & Ευστρατιάδης, 2018)

Πύργος

Οι πύργοι των ανεμογεννητριών κατασκευάζονται σε διάφορα ύψη, με τον μέσο όρο να είναι περίπου 50 m και ο ψηλότερος να ξεπερνά τα 200 m. Συνήθως επικαλύπτονται με φινιρίσμα με βάση τον

ψευδάργυρο και στρώματα εποξειδικής και ουρεθάνης για να παρέχουν αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία. Το μέσο βάρος συνήθως υπερβαίνει τους 40 τόνους και ένας πύργος μπορεί συχνά να αντιπροσωπεύει περισσότερο από το 10% του συνολικού κόστους μιας ανεμογεννήτριας.

Δρομέας

Ο δρομέας αποτελείται από τα πτερύγια και την πλήμνη. Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών μπορούν να φτάσουν ταχύτητες άνω των 250 km/hg όταν βρίσκονται σε λειτουργία και επομένως απαιτούν στιβαρή κατασκευή. Τα πτερύγια αποτελούνται κυρίως από ξύλο, υαλοβάμβακα, ρητίνη και άνθρακα, αλλά μπορεί να αποτελούνται και από περισσότερα από 100 στρώματα υλικού μόλις ολοκληρωθεί και τα οποία είναι προσδεμένα πάνω στην πλήμνη είτε σταθερά είτε έτσι ώστε να περιστρέφονται γύρω από τον άξονά τους (Todd, 2019).

Φρένο

Το φρένο σταματάει τη λειτουργία του δρομέα σε περίπτωση επείγουσας ανάγκης ή συντήρησης και μπορεί να είναι μηχανικό, ηλεκτρικό ή υδραυλικό.

Κιβώτιο ταχυτήτων

Στις συμβατικές ανεμογεννήτριες, τα πτερύγια περιστρέφουν έναν άξονα που συνδέεται μέσω ενός κιβωτίου ταχυτήτων στη γεννήτρια. Το κιβώτιο ταχυτήτων μετατρέπει την ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων (15 έως 20 RPM για έναν στρόβιλο 1 MW) στις 1.800 (750-3600) RPM που χρειάζεται η γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρήση μαγνητικών κιβωτίων ταχυτήτων έχει διερευνηθεί ως τρόπος μείωσης του κόστους συντήρησης.

Γεννήτρια

Η γεννήτρια μπορεί να είναι σύγχρονη ή ασύγχρονη. Για ανεμογεννήτριες μεγάλου οριζόντιου άξονα, η γεννήτρια είναι τοποθετημένη στην άτρακτο στην κορυφή του πύργου, πίσω από την πλήμνη του δρομέα και συνδέεται με το κιβώτιο ταχυτήτων μέσω του άξονα χαμηλής ταχύτητας και μέσω αυτής γίνεται η μετατροπή της αιολικής ισχύς σε ηλεκτρική ενώ στη συνέχεια παρέχεται στο κοντινότερο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

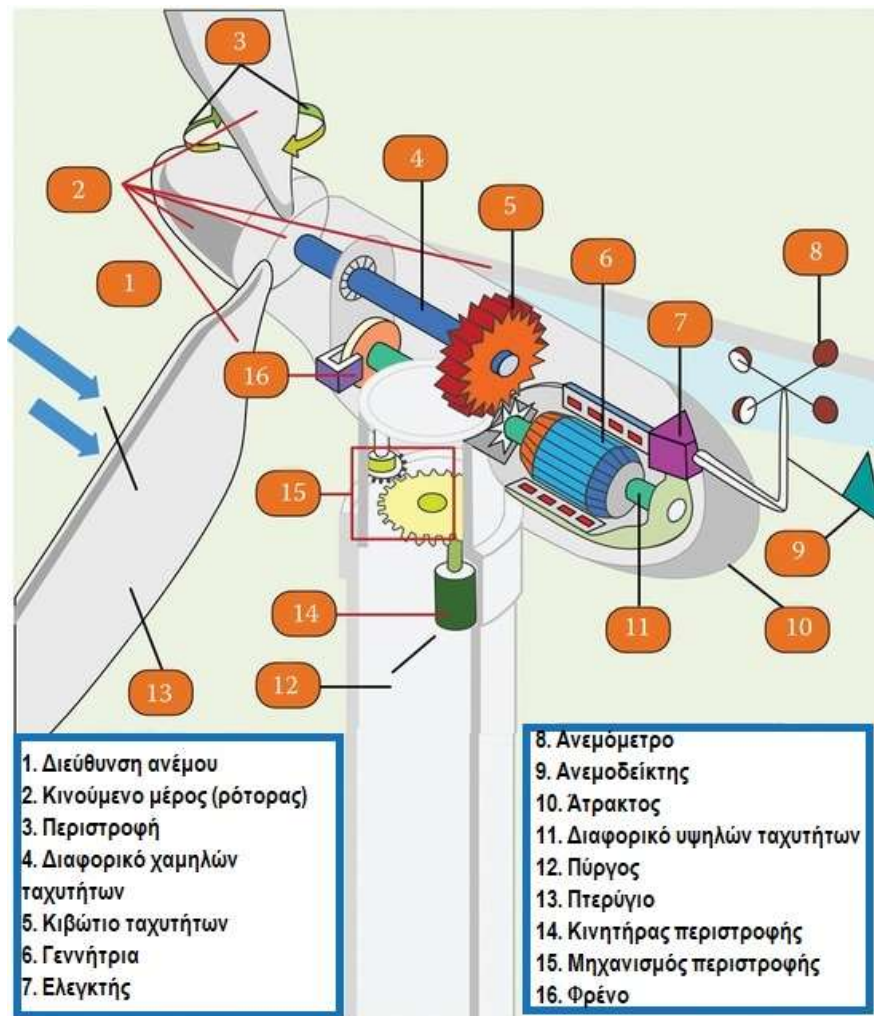
Σύστημα προσανατολισμού

Το σύστημα προσανατολισμού αποτελείται από έναν κινητήρα ο οποίος περιστρέφει την άτρακτο ώστε να παραμείνει ο δρομέας κάθετος στην κατεύθυνση του ανέμου για να είναι βέλτιστη η κατανάλωση αιολικής ενέργειας.

Σύνδεση με το δίκτυο

Το ηλεκτρικό ρεύμα από τη γεννήτρια δεν είναι άμεσα έτοιμο για αποστολή στο εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και έτσι τροφοδοτείται πρώτα σε μια σειρά ηλεκτρικών κυκλωμάτων που μετατρέπουν την τάση στο κατάλληλο επίπεδο έτσι ώστε να μπορεί να συνδεθεί με τη βέλτιστη απόδοση στο δίκτυο. Αυτή η ηλεκτρική ισχύς στη συνέχεια τροφοδοτείται μέσω καλωδίων πίσω στο εσωτερικό του πύργου όπου μεταφέρεται για να συνδεθεί στο δίκτυο. Από εκεί, η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται για χρήση από σπίτια και επιχειρήσεις (Gill, 2021).

Αναλυτικότερα τα μηχανικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας φαίνονται στην Εικόνα 3.2



Εικόνα 3.2 Μηχανικά μέρη ανεμογεννήτριας (Πηγή: Dehghanimadvar et al., 2019)

Η δομή των υπεράκτιων ανεμογεννητριών σε σχέση με τις χερσαίες, ως επί το πλείστο, δεν έχουν μεγάλες διαφορές. Οι κυριότερες διαφορές τους είναι στο μέγεθός τους, που σχετίζεται με την παραγόμενη ισχύ, την θεμελίωση, το ύψος του πύργου και τη μέθοδο συντήρησης.

3.2 Θεμελίωση

3.2.1 Θεμελίωση σταθερής έδρασης

Τα υπεράκτια αιολικά έργα (Εικόνα 3.3) χρησιμοποιούνται για την εκμετάλλευση του δυναμικού του ανέμου σε ανοιχτές θάλασσες, όπου ο άνεμος είναι ισχυρότερος από ότι στην ξηρά καθώς η επιφάνεια του νερού είναι ομαλότερη αυτής του εδάφους και συνεπώς ο συντελεστής εκμετάλλευσης (Capacity Factor) είναι υψηλότερος (Χατζηγηρηγορίου, 2016). Ωστόσο, η εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων είναι ένα πολύπλοκο έργο. Το μεγαλύτερο πρόβλημα έγκειται στην ανύψωση των ανεμογεννητριών και των υποσταθμών πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας και στην αγκύρωσή τους στον πυθμένα της θάλασσας (Ιστοσελίδα: Iberdola)



Εικόνα 3.3 Υπεράκτιες ανεμογεννήτριες (Πηγή: Keene,2021)

Η πλειονότητα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων βρίσκεται στην υφαλοκρηπίδα, περίπου 10 km από την ακτή σε βάθη νερού περίπου 10 m. Η υπεράκτια αιολική παραγωγή είναι πολύ πιο περίπλοκη από την ξηρά όσον αφορά τον σχεδιασμό του συστήματος ανεμογεννητριών και την κατασκευή του αιολικού πάρκου. Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες πρέπει να βρίσκονται πάνω από το επίπεδο των υψηλότερων κυμάτων και να έχουν ισχυρά θεμέλια στον βυθό της θάλασσας. Απαιτούνται υποβρύχια καλώδια και άλλα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για εργασίες κατασκευής και συντήρησης, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε πολύ υψηλότερο κόστος των υπεράκτιων αιολικών εγκαταστάσεων από τις χερσαίες. Έχει υπολογιστεί ότι το κόστος μιας τυπικής υπεράκτιας αιολικής μονάδας είναι διπλάσιο ή τριπλάσιο από αυτό μιας χερσαίας αιολικής μονάδας ανάλογα με την τοποθεσία. Η επιλογή τοποθεσίας για υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι πιο ευέλικτη όσον αφορά τους περιορισμούς της χωροθέτησης, σύμφωνα με την νομοθεσία, από ό,τι για τα χερσαία αιολικά πάρκα. Επιπλέον, οι υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις βρίσκονται συνήθως μακριά από πυκνοκατοικημένες περιοχές, με μειωμένο θόρυβο και οπτικές επιπτώσεις στους ανθρώπους (Vagiona & Kamilakis,2018, Ιστοσελίδα: Iberdola)

Οι υφιστάμενες εγκατεστημένες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες περιλαμβάνουν ως επί το πλείστο ανεμογεννήτριες με θεμελιώσεις σταθερής έδρασης (Εικόνα 3.4). Υπάρχουν διάφοροι τύποι θεμελίων, ανάλογα με το βάθος στο οποίο θα εγκατασταθεί η ανεμογεννήτρια.

Σε εγκαταστάσεις βαθών κάτω των 15 m, χρησιμοποιούνται οι θεμελιώσεις τύπου monopile. Πρόκειται για αρκετά απλές κατασκευές, που αποτελούνται από έναν χοντρό κύλινδρο από χάλυβα που είναι αγκυρωμένος απευθείας στον πυθμένα της θάλασσας. Είναι θαμμένοι κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας έως και 30 m για να στηρίξουν τον πύργο (Keene,2021, Φυτίλης, 2012).

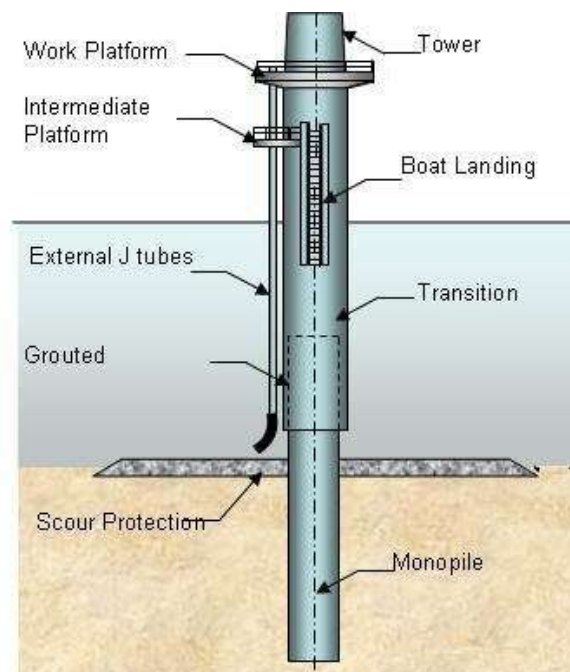
Πλεονεκτήματα θεμελίωσης monopile:

- Ιδανική σε εδάφη με άμμο και χαλίκι.

- Απλός σχεδιασμός που εγκαθίσταται γρήγορα.
- Προσαρμόζεται για ρηχές και βαθύτερες εγκαταστάσεις διαφόρων μεγεθών.
- Οικονομικές για τα βάθη στα οποία προορίζονται

Μειονεκτήματα θεμελίωσης monopile:

- Το κόστος και οι κίνδυνοι που συνδέονται με την κατασκευή, την εγκατάσταση και τη μεταφορά αυξάνονται για μεγαλύτερα monopiles που απαιτούνται σε εγκαταστάσεις σε βαθύτερα σημεία όπου τα υδροδυναμικά φορτία αποτελούν πρόβλημα.
- Ο άνεμος, το κύμα και τα σεισμικά φορτία μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τα θεμέλια monopile. Αυτό μπορεί να προκαλέσει ζημιά στην κατασκευή από πρόωρη διάβρωση εάν δεν ληφθεί υπόψη κατά την εγκατάσταση.
- Ο θόρυβος της εγκατάστασης μπορεί να αποπροσανατολίσει, να τραυματίσει ή να σκοτώσει τα θαλάσσια είδη που είναι ευαίσθητα σε τέτοιου είδους πιέσεις.



Εικόνα 3.4 Θεμελίωση τύπου monopile (Πηγή: Lombardi, 2010)

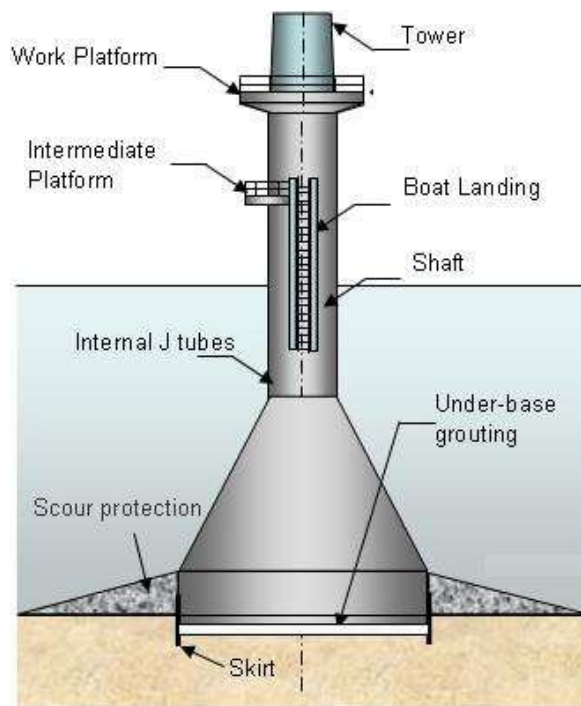
Στην περίπτωση υπεράκτιων αιολικών πάρκων που πρέπει οι ανεμογεννήτριες να ανεγερθούν 30 m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, μακριά από την επίδραση των κυμάτων, χρησιμοποιείται συνήθως το σύστημα θεμελίωσης gravity, το οποίο περιλαμβάνει τη χρήση μιας μεγάλης πλατφόρμας από σκυρόδεμα ή χάλυβα με διάμετρο περίπου 15 m και βάρος περίπου 1.000 τόνους. Το gravity base foundation χρησιμοποιείται για βάθη 30-60 m. Αποτελεί μια κατασκευή με βάση το σκυρόδεμα που μπορεί να κατασκευαστεί με ή χωρίς προστατευτικά τοιχεία από χάλυβα ή σκυρόδεμα. Το πλάτος της βάσης μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να ταιριάζει στις πραγματικές συνθήκες του εδάφους. Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει έναν κεντρικό άξονα από χάλυβα ή σκυρόδεμα για τη μετάβαση στον πύργο της ανεμογεννήτριας (Keene, 2021, Φυτίλης, 2012).

Πλεονεκτήματα gravity base foundation:

- Χρησιμοποιεί υλικά χαμηλού κόστους όπως σκυρόδεμα και χάλυβας.
- Τεχνολογία όμοια των βιομηχανιών πετρελαίου και φυσικού αερίου.
- Σε ορισμένα περιπτώσεις δεν χρειάζεται εγκατάσταση γερανού
- Τα συναρμολογημένα τμήματα μπορούν να μετακινηθούν από το λιμάνι πλωτά στη θέση τους, μειώνοντας το κόστος και τον κίνδυνο.

Μειονεκτήματα gravity base foundation:

- Συνήθως απαιτείται προετοιμασία όπως η βυθοκόρηση. Αυτό μπορεί να διαταράξει σημαντικό μέρος (έως και 7%) της τοποθεσίας του αιολικού πάρκου.
- Μία μεγαλύτερη εγκατάσταση μπορεί να αυξήσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 3.5 Θεμελίωση τύπου Gravity (Πηγή: Lombardi, 2010)

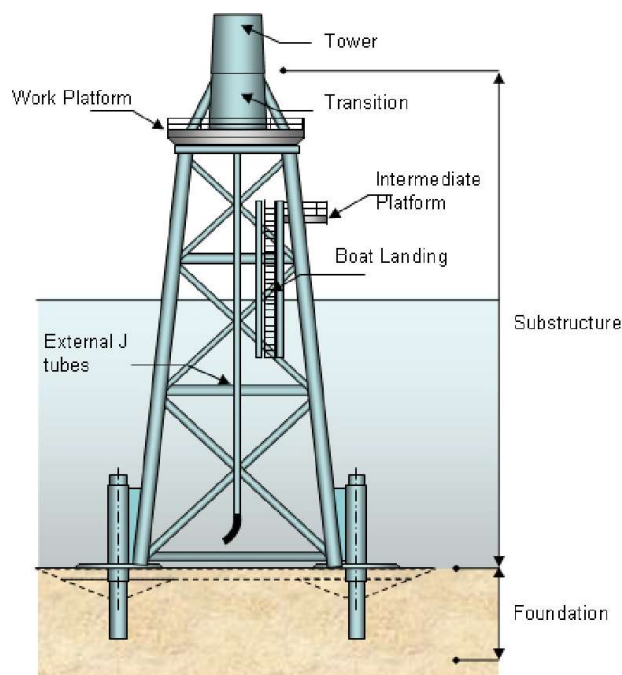
Σε βάθη άνω των 30 μέτρων απαιτούνται πιο πολύπλοκες κατασκευές θεμελίωσης και αγκύρωσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι εταιρείες εγκατάστασης χρησιμοποιούν θεμελίωση τύπου jacket, δηλαδή θεμέλια με δικτυωτό πλαίσιο που διαθέτουν τρία ή τέσσερα σημεία αγκύρωσης στον βυθό της θάλασσας, γεγονός που αυξάνει τα επίπεδα ασφάλειας κατά την αγκύρωση των πύργων. Το πάνω μέρος αυτού του τύπου θεμελίωσης διαθέτει ένα μεταβατικό κομμάτι που συνδέεται με τον άξονα της ανεμογεννήτριας, ενώ τα πόδια (τρία ή τέσσερα, σύμφωνα με τον μηχανικό σχεδιασμό) είναι αγκυρωμένα στον πυθμένα της θάλασσας με πασσάλους (Keene, 2021, Φυτίλης, 2012).

Πλεονεκτήματα θεμελίωσης τύπου jacket:

- Μπορεί να εγκατασταθεί χρησιμοποιώντας πασσάλους ή κιβώτια σε δύσκαμπτα σημεία ή σημεία πυκνής άμμου. Οι εγκαταστάσεις σε μαλακό έδαφος πραγματοποιούνται με μεγαλύτερους πασσάλους που αυξάνουν σημαντικά την αντίσταση στην τριβή.
- Η μεγάλη επιφάνεια του πλέγματος μπορεί να παρέχει μια θέση τεχνητού υφάλου, παρέχοντας ένα νέο βιότοπο για τα τοπικά είδη.
- Οικονομική επιλογή με απλές μεθόδους κατασκευής.
- Μπορεί να μετακινηθεί με φορηγίδα.

Μειονεκτήματα θεμελίωσης τύπου jacket:

- Οι εγκαταστάσεις θεμελίων jacket στη Βόρεια Θάλασσα αναφέρουν συνεχή προβλήματα στην ένωση των αρμών, έχοντας σαν αποτέλεσμα μεγάλες περιόδους διακοπής χρήσης λόγω της συντήρησης για τη διατήρηση της δομικής ακεραιότητας.
- Οι αλλαγές στο περιβάλλοντα χώρο μπορεί να είναι επιζήμιες για τα θαλάσσια οικοσυστήματα.
- Οι εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν οδηγούς πασσάλων μπορούν να δημιουργήσουν υποβρύχιο θόρυβο που μπορεί να τραυματίσει ή να σκοτώσει κάποιο θαλάσσιο ζώο.



Εικόνα 3.6 Θεμελίωση τύπου jacket (Πηγή: Lombardi,2010)

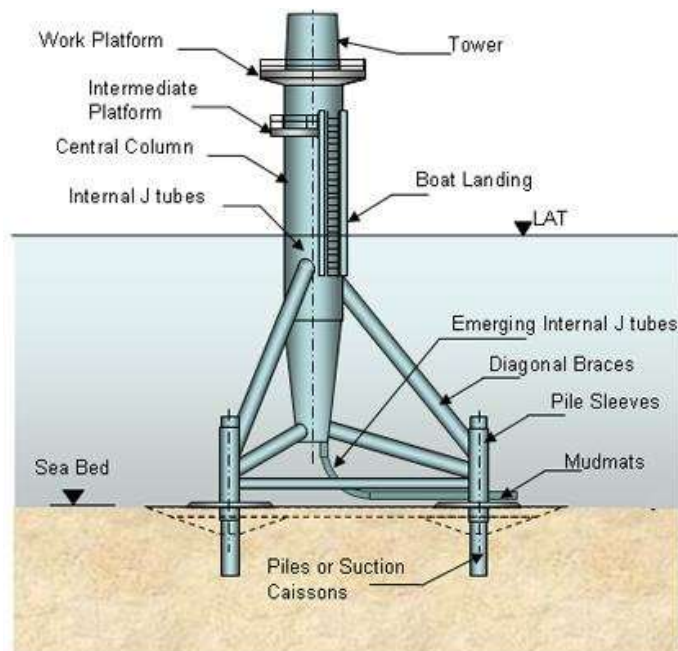
Σχεδιασμένα για χρήση έως 50 m, τα θεμέλια tripod έχουν τρίποδες βάσεις συνδεδεμένες με μια κυλινδρική στήλη στο κέντρο κάτω από το επίπεδο της θάλασσας, ενώ πάνω από τη θάλασσα μοιάζει με μοπορίλε. Αυτά διαφέρουν από τα θεμέλια triple όπου τρία μεμονωμένα πόδια πασσάλων συνδέονται με έναν κεντρικό πύργο στήριξης πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Το πλάτος της βάσης και το βάθος διείσδυσης των πασσάλων μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να ταιριάζουν στις πραγματικές συνθήκες περιβάλλοντος και εδάφους ((Keene,2021).

Πλεονεκτήματα θεμελίωσης τύπου tripod:

- Δεν χρειάζεται κάποια προηγμένη προετοιμασία πριν από την εγκατάσταση.
- Κατάλληλο για τοποθεσίες όπου υπάρχει πυκνή άμμος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε πιο μαλακά εδάφη.
- Αποτελεί οικονομική λύση για εγκαταστάσεις στα 45 m και άνω.
- Παρέχει επιπλέον σταθερότητα στην ανεμογεννήτρια.

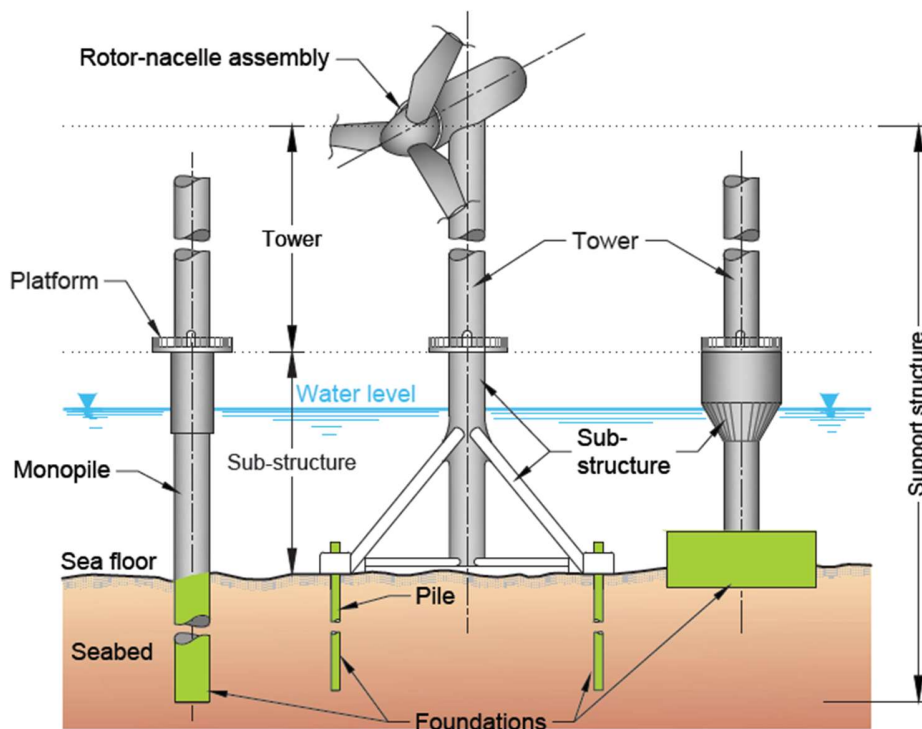
Μειονεκτήματα θεμελίωσης τύπου tripod:

- Μπορεί να χρειαστεί προστασία από την τριβή γύρω από τη βάση του τρίποδου σε τοποθεσίες όπου τα ρεύματα του πυθμένα είναι δυνατά.
- Το κόστος κατασκευής και συντήρησης τρίποδων μπορεί να είναι υψηλότερο από άλλους τύπους βάσης.



Εικόνα 3.7 Θεμελίωση τύπου tripod (Πηγή: Lombardi, 2010)

Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3.8) φαίνονται οι 3 βασικοί τύποι θεμελίωσης σταθερής έδρασης σε σχέση με τα τεχνικά μέρη της ανεμογεννήτριας, το επίπεδο της θάλασσας και τον πυθμένα.



Εικόνα 3.8 Οι 3 βασικοί τύποι θεμελίωσης σταθερής έδρασης σε σχέση με τον περιβάλλοντα χώρο (Πηγή: Foundations of Offshore Wind Turbines, 2020)

3.2.2 Πλωτές θεμελιώσεις

Για βάθη νερού μεγαλύτερα από 50 m, ο αιολικός πόρος είναι σημαντικός, αλλά οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες που οι θεμελιώσεις τους είναι σταθερής έδρασης δεν αποτελούν οικονομική λύση για εκμετάλλευση των πόρων. Πολλές παράκτιες χώρες όπως η Ιαπωνία, οι Ηνωμένες Πολιτείες και οι χώρες της Δυτικής Ευρώπης με ακτές στον Ατλαντικό έχουν περιορισμένα παράκτια χωρικά ύδατα με βάθους νερού κάτω των 50 m. Κατά συνέπεια, οι πλωτές υπεράκτιες ανεμογεννήτριες έχουν προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον τα τελευταία 10 χρόνια. Η πλωτή θεμελίωση αποτελείται από μια πλωτή πλατφόρμα και ένα σύστημα αγκύρωσης. Η πλατφόρμα έχει ένα μεταβατικό κομμάτι στην κορυφή του οποίου είναι εγκατεστημένος ο πύργος. Η πλωτή τεχνολογία έχει ήδη χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε μέρη όπως η Σκωτία και η Πορτογαλία, με περισσότερα ευρωπαϊκά έργα υπό ανάπτυξη. Η Εικόνα 3.9 απεικονίζει παραδείγματα τυπικών θεμελιώσεων για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται σε διαφορετικά βάθη νερού. Η έρευνα για τις πλωτές ανεμογεννήτριες ξεκίνησε στα μέσα της δεκαετίας του 1990, μετά από μια αρχική ιδέα που προτάθηκε από τον William E Heronemus στο Πανεπιστήμιο της Μασαχουσέτης Amherst στις αρχές της δεκαετίας του 1970. Οι πλωτές υπεράκτιες ανεμογεννήτριες με συστήματα πρόσδεσης και θεμέλια με άγκυρες έχουν προταθεί και δοκιμαστεί και επωφελούνται από την πρόοδο της τεχνολογίας στις πλωτές πλατφόρμες πετρελαίου και φυσικού αερίου. Οι τύποι πλωτών ανεμογεννητριών είναι:

- Tention Leg Platform
- Spar- Submersible

- Spar- Buoy



Εικόνα 3.9 Τεχνολογίες πλωτής θεμελίωσης (Πηγή: IRENA, 2016)

Η πρώτη δοκιμαστική πλωτή ανεμογεννήτρια τύπου Tension Leg Platform εγκαταστάθηκε από την Blue H Technologies στα ανοικτά των ιταλικών ακτών με ονομαστική ισχύ 80 kW το 2008. Το 2009, η πρώτη πλωτή ανεμογεννήτρια κλίμακας MW στον κόσμο, η Hywind, με χωρητικότητα 2,3 MW και βάση Spar, εγκαταστάθηκε από τη Statoil στη Βόρεια Θάλασσα κοντά στη Νορβηγία. Το 2011, η WindFloat εγκατέστησε μια ανεμογεννήτρια Vestas ισχύος 2 MW, 4 km υπεράκτια της Aguçadoura της Πορτογαλίας σε περίπου 45 m βάθος νερού. Η WindFloat έχει ημιβυθιζόμενη (Spar Submersive) βάση και είναι η δεύτερη πλωτή ανεμογεννήτρια κλίμακας MW. Μεταξύ όλων των πλωτών πλατφορμών, η ημιβυθιζόμενη πλατφόρμα λαμβάνει ιδιαίτερη προσοχή λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων της. Αυτός ο τύπος πλατφόρμας μπορεί να συναρμολογηθεί πλήρως στην ξηρά και να ρυμουλκηθεί, και να είναι έτοιμη προς χρήση, μέχρι τον τελικό προορισμό. Τα διαθέσιμα συστήματα πρόσδεσης είναι γνωστά και ανταγωνιστικά στο κόστος και εάν έχει σχεδιαστεί σωστά, ο χρόνος διακοπής λειτουργίας σε λειτουργικές θαλάσσιες καταστάσεις λόγω υπερβολικής κίνησης της πλατφόρμας είναι χαμηλός. Ένα κοινώς χρησιμοποιούμενο πρωτότυπο ημι-βυθιζόμενων πλατφορμών αποτελείται συνήθως από τρεις κυλινδρικές στήλες, συνδεδεμένες μεταξύ τους με ένα σύνολο στηριγμάτων ενώ τρεις πλάκες ανύψωσης είναι προσαρτημένες στη βάση της στήλης (Head et. al, 2016).

Πλεονεκτήματα πλωτής θεμελίωσης:

- Αυξάνει σημαντικά την εμβέλεια των αιολικών πάρκων, επιτρέποντας εγκαταστάσεις σε βάθη πάνω από 200 m.
- Εκμεταλλεύεται το 58% των υπεράκτιων αιολικών πόρων σε βαθιά νερά που βρίσκονται εκεί όπου τα κλασικά θεμέλια δεν μπορούν να φτάσουν.
- Οι ανεμογεννήτριες και οι βάσεις τους μπορούν να συναρμολογηθούν στο λιμάνι και στη συνέχεια να ρυμουλκηθούν στο εργοτάξιο για εγκατάσταση. Μπορεί επίσης να γίνει μεγαλύτερης διάρκειας συντήρηση στο λιμάνι, εάν χρειαστεί, ρυμουλκώνοντας την ανεμογεννήτρια πίσω στο λιμάνι.
- Οι πιο απομακρυσμένες εγκαταστάσεις στην ανοικτή θάλασσα (τουλάχιστον 10 km) ελαχιστοποιούν τον κίνδυνο για τα αποδημητικά πτηνά.
- Λιγότερο οπτικό αντίκτυπο στην ακτή

Μειονεκτήματα πλωτής θεμελίωσης:

- Η δυνατότητα τοποθέτησης των πλατφορμών στη θέση τους απαιτεί συνεχή επιθεώρηση και συντήρηση.
- Οι άγκυρες και τα καλώδια μπορούν να διαταράξουν τη θαλάσσια ζωή.

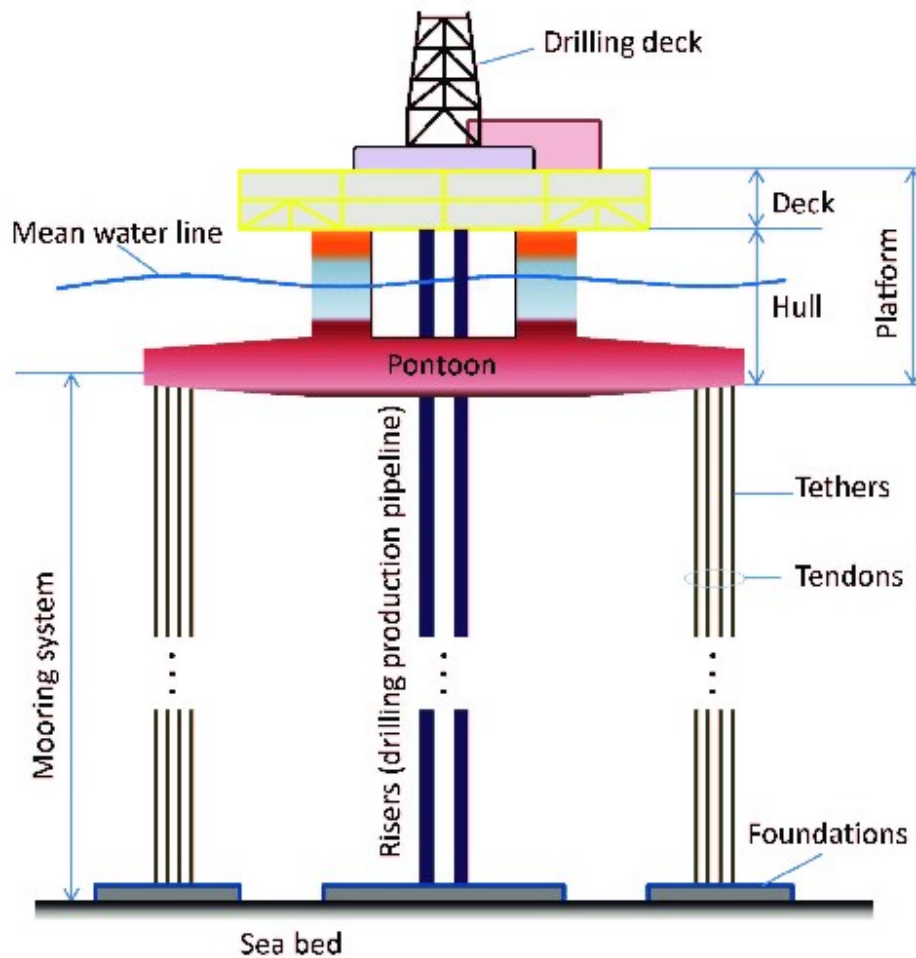
Tention Leg Platform

Η πλατφόρμα Tension Leg Platform (TLP) αποτελείται από μια ημι-βυθιζόμενη πλατφόρμα αγκυροβολημένη κατακόρυφα από κάθετους τένοντες που συνδέονται με τον πυθμένα της θάλασσας. Η άνωση, που οφείλεται στα διάφορα εξαρτήματα της πλατφόρμας, διατηρεί την τάση στο σύστημα πρόσδεσης ακόμη και σε συνθήκες έντονων καιρικών συνθηκών. Στην Εικόνα 3.10 απεικονίζεται η δομή του Tention Leg Platform (η Εικόνα αναφέρεται σε γεώτρηση όμως η πλατφόρμα της ακολουθεί την ίδια λογική και στην ανεμογεννήτρια) (Gomes, 2014). Τα πλεονεκτήματα της Tention Leg Platform είναι (Ιστοσελίδα: esru.strath.ac.uk/):

- Έχει μικρή μάζα και χρήση υλικών
- Μπορεί να συναρμολογηθεί στην ξηρά και να ρυμουλκηθεί στην τελική της θέση
- Διαθέτει λίγα κινούμενα μέρη (δεν απαιτείται έρμα)
- Έχει εξαιρετική σταθερότητα
- Έχει χαμηλότερα φορτία κόπωσης στον πύργο και τις λεπίδες από τις Spar Submersible κατασκευές και χαμηλότερα φορτία κόπωσης στη βάση του πύργου από τα Spar-Buoys

Τα μειονεκτήματα είναι:

- Έχει υψηλά φορτία στο σύστημα πρόσδεσης και αγκύρωσης
- Η διάρκεια ζωής των τενόντων είναι αβέβαιη
- Είναι δύσκολη διαδικασία εγκατάστασης, λόγω αστάθειας κατά τη ρυμούλκηση
- Συχνά απαιτεί εξειδικευμένα σκάφη εγκατάστασης
- Λιγότερο ανεπτυγμένη για εφαρμογές αιολικής ενέργειας



Εικόνα 3.10 Δομή Tention Leg Platoform (Πηγή: Reza & Sedighi, 2015)

Spar Submersible

Τα ημι-υποβρύχια (Spar Submersible) αποτελούνται συνήθως από πολλαπλές κολώνες και πλωτήρες. Οι κολώνες παρέχουν τη σταθερότητα, ενώ οι πλωτήρες παρέχουν την άνωση. Το κέντρο βάρους βρίσκεται πάνω από το κέντρο άνωσης και η σταθερότητα επιτυγχάνεται με τη δύναμη επαναφοράς των στήλων. Η πλωτή κατασκευή διατηρείται στη θέση της μέσω ενός συστήματος πρόσδεσης, που αποτελείται από αλυσίδες ή τένοντες και αγκυρώσεις. Οι πλωτήρες και οι στήλες γεμίζουν με νερό για να μεταβάλουν την πλευστότητα του συστήματος με σκοπό την καλύτερη ευστάθεια λόγω κυμάτων και ανέμου. Η ανεμογεννήτρια μπορεί να τοποθετηθεί στο κέντρο της πλωτής μονάδας ή στην κορυφή μιας στήλης. Στην τελευταία περίπτωση, απαιτείται πρόσθετο έρμα για να εξουδετερωθεί το βάρος της ανεμογεννήτριας (Du, 2021, Gomes, 2014). Παραμένουν εύκαμπτες στο οριζόντιο επίπεδο και άκαμπτες στο κατακόρυφο για να εξασφαλιστεί η άνετη λειτουργία και η απαιτούμενη συνδεσιμότητα μεταξύ των ανυψωτήρων και της πλατφόρμας. (Chandrasekaran,2021). Τα πλεονεκτήματα της Spar Submersible είναι (Du, 2021):

- Μεγαλύτερη ευστάθεια σε δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες

- Το κόστος του συστήματος αγκύρωσης είναι χαμηλότερο από τις πλατφόρμες Tension Leg.
- Η μεταφορά και η τοποθέτησή του είναι απλούστερη από τους άλλους δύο τύπους.
- Η ανεμογεννήτρια μπορεί να εγκατασταθεί στο ημι-υποβρύχιο στο λιμάνι και να ρυμουλκηθεί στην τοποθεσία της, αποφεύγοντας την δαπανηρή εγκατάσταση στην ανοικτή θάλασσα.

Τα μειονεκτήματα του Spar Submersible είναι (Ιστοσελίδα: esru.strath.ac.uk/):

- Οι μεγάλες κινήσεις που προκαλούνται από το κύμα που μπορεί να επηρεάσουν τον ρότορα, τον πύργο και τα περύγια
- Πολύπλοκη κατασκευαστικά δομή
- Απαιτεί μεγάλες ποσότητες χάλυβα
- Μπορεί να υπόκειται περισσότερο σε διάβρωση, καθώς μεγάλο μέρος της κατασκευής είναι πιο κοντά στην επιφάνεια του νερού
- Απαιτούνται μεγάλες εγκαταστάσεις για συναρμολόγηση στην ξηρά

Στην παρακάτω Εικόνα 3.11 φαίνεται η δομή της Spar Submersible.



Εικόνα 3.11 Δομή Spar Submersible (Πηγή: Du, 2021)

Spar Buoy

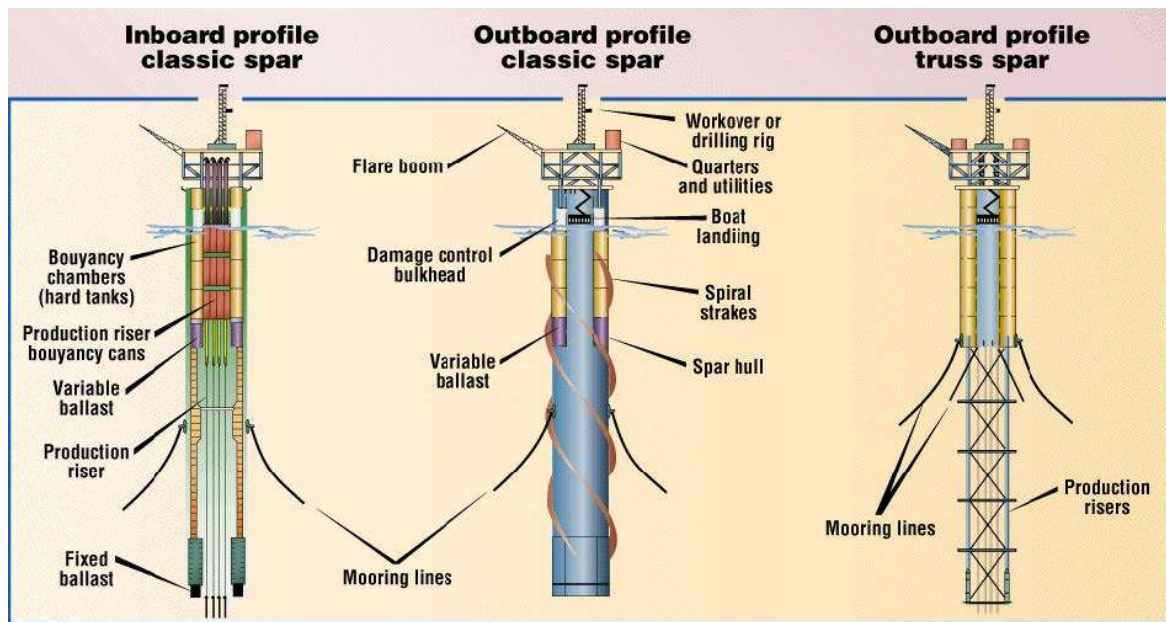
Η Spar Buoy αποτελείται από ένα μεγάλης διαμέτρου, κάθετο, κυλινδρικό στεγανό περίβλημα (hull) που υποστηρίζει την πλατφόρμα μέσω της άνωσης. Οι θάλαμοι που βρίσκονται κοντά στην κορυφή της πλατφόρμας δίνουν τη δυνατότητα ελέγχου της άνωσης της δομής διατηρώντας έτσι την πλατφόρμα σταθερή. Επιπλέον, οι σπειροειδείς λωρίδες που τοποθετούνται ελαχιστοποιούν την πλευρική κίνηση λόγω του στροβιλισμού, βελτιώνοντας την πλευρική ευστάθεια. Η Spar Buoy μπορεί να αγκυροβοληθεί στον πυθμένα της θάλασσας με κατακόρυφη πρόσδεση, όμως πιο συνηθισμένες είναι οι αλυσίδες σε καμπυλωτή μορφή ή οι τεντωμένες. Τα βασικά πλεονεκτήματα της Spar Buoy θεμελίωσης είναι (Ιστοσελίδα: esru.strath.ac.uk/):

- Είναι ένας απλός σχεδιασμός που μπορεί να κατασκευαστεί εύκολα χωρίς πολύπλοκα εξαρτήματα
- Έχει μικρό αριθμό τμημάτων για συγκόλληση
- Παρέχει μεγάλη σταθερότητα

Τα μειονεκτήματα της Spar Buoy θεμελίωσης είναι:

- Δεν είναι δυνατή η συναρμολόγηση της σε ρηχά νερά
- Περιορισμένη δυνατότητα ρυμούλκησης της κατασκευής πίσω στο λιμάνι για μεγάλες επισκευές
- Το φορτίο κόπωσης στον πύργο και τις λεπίδες μπορεί να είναι υψηλότερο από αυτό του Tension Leg Platform

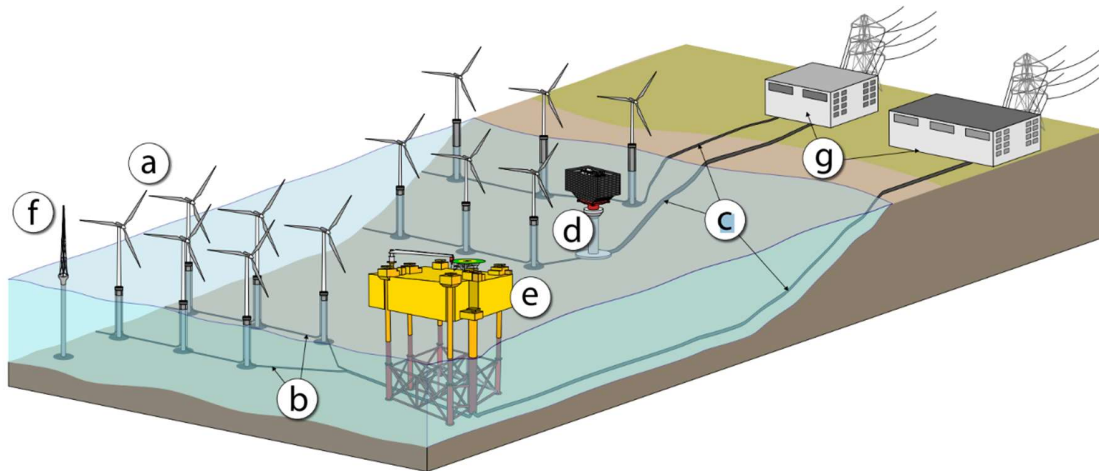
Στην παρακάτω Εικόνα 3.12 φαίνονται τρεις διαφορετικοί τύποι Spar Buoy (η εικόνα αναφέρεται σε γεώτρηση όμως η πλατφόρμα της ακολουθεί την ίδια λογική και στην ανεμογεννήτρια) (Gomes, 2014).



Εικόνα 3.12 Διαφορετικά είδη Spar Buoy (Πηγή: Gomes, 2014)

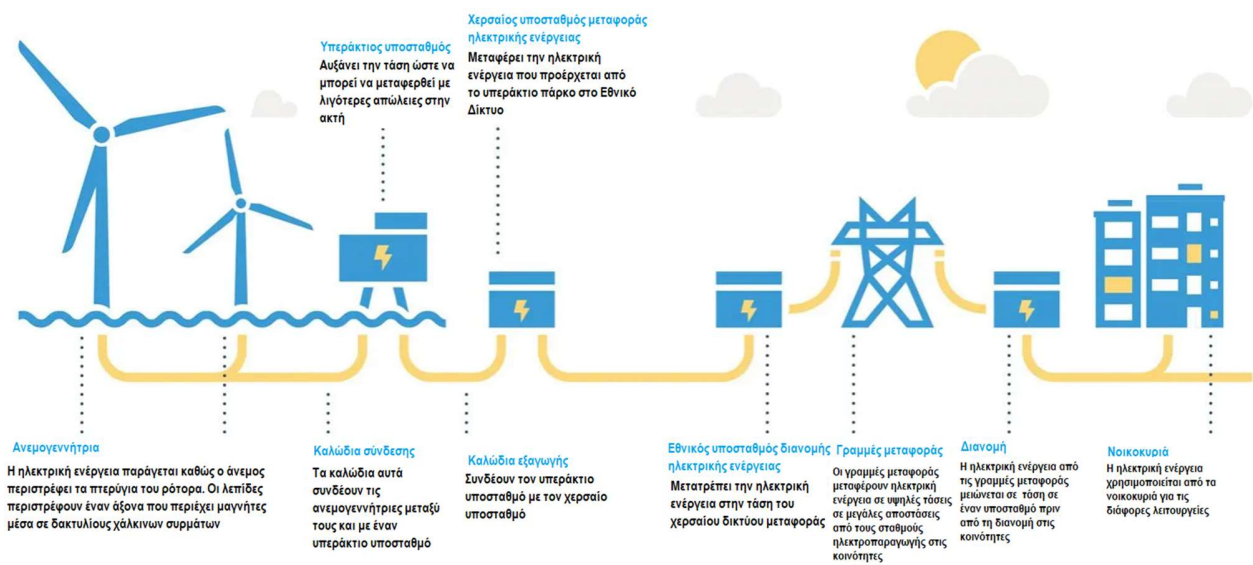
3.3 Σύνδεση με το Εθνικό Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η παραγωγή υπεράκτιας αιολικής ενέργειας αποτελεί το ένα σκέλος της αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να μεταφερθεί στην ξηρά και να συνδεθεί με το Εθνικό Δίκτυο, προτού φτάσει στα νοικοκυριά και τις επιχειρήσεις. Στην Εικόνα 3.13 φαίνονται τα βασικά μέρη ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Αποτελείται από (a) τις ανεμογεννήτριες, (b) τα καλώδια συλλογής, (c) τα καλώδια μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, (d) τον σταθμό μετατροπής εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές (e) τον σταθμό που αυξάνει την τάση της ενέργειας (f) τον μετεωρολογικό σταθμό (g) τον χερσαίο υποσταθμό (Rodrigues, et al., 2016).



Εικόνα 3.13 Βασικά μέρη υπεράκτιου αιολικού πάρκου (Πηγή: Rodrigues, et al., 2016)

Όταν οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες παράγουν ενέργεια αυτή μεταφέρεται μέσω υποβρύχιων καλωδίων και ενός υπεράκτιου υποσταθμού προς την ακτή. Ο υπεράκτιος υποσταθμός αυξάνει την τάση, ώστε να μπορεί να μεταφερθεί με λιγότερες απώλειες. Καλώδια εξαγωγής τα οποία βρίσκονται υπογείως μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια σε έναν χερσαίο υποσταθμό όπου μετατρέπεται στην κατάλληλη τάση και τροφοδοτείται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Στην Εικόνα 3.14 περιγράφεται σχηματικά η σύνδεση με το Δίκτυο



Εικόνα 3.14 Σύνδεση με το Δίκτυο (Πηγή: Orsted, n.d)

4. Ελληνική νομοθεσία χωροθέτησης υπεράκτιων αιολικών πάρκων

4.1 Αποστάσεις ασφαλείας για τη χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων

Σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία οι οδηγίες για τη χωροθέτηση τόσο των χερσαίων όσο και των υπεράκτιων αιολικών πάρκων δίνονται από το Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΕΠΧΣΑΑ-ΑΠΕ) και του Ν. 2464 Β/03.12.2008 «Έγκριση ειδικού πλαισίου χωροταξικού σχεδιασμού και αειφόρου ανάπτυξης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και της στρατηγικής μελέτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτού». Σύμφωνα με το ΕΠΧΣΑΑ-ΑΠΕ στο άρθρο 10 δίνονται τα ειδικά κριτήρια χωροθέτησης αιολικών μονάδων στο θαλάσσιο χώρο και στις ακατοίκητες νησίδες τα οποία είναι:

1. Επιτρέπεται η χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων σε όλες τις θαλάσσιες περιοχές της χώρας που διαθέτουν προϋποθέσεις αιολικής εκμεταλλευσιμότητας, εφόσον αυτές δεν εντάσσονται σε ιδιαίτερο θεσμικό καθεστώς ρητής απαγόρευσης της εγκατάστασης ή δεν αποτελούν ζώνη αποκλεισμού, όπως θεσμοθετημένα θαλάσσια ή υποθαλάσσια πάρκα ή βεβαιωμένες γραμμές επιβατικής ναυσιπλοΐας.
2. Ελάχιστες αποστάσεις για τη διασφάλιση της λειτουργικότητας και απόδοσης των αιολικών εγκαταστάσεων (Πίνακας 4.1):

Πίνακας 4.1 Αποστάσεις για τη διασφάλιση της λειτουργικότητας και απόδοσης των αιολικών εγκαταστάσεων

Α. Αποστάσεις για τη διασφάλιση της λειτουργικότητας και απόδοσης των αιολικών εγκαταστάσεων	
Α. Μέγιστη απόσταση από υφιστάμενη οδό χερσαίας προσπέλασης οποιασδήποτε κατηγορίας	Για εγκατεστημένη ισχύ / μονάδα κάτω των 10 MW _e : Σε Π.Α.Π. και Απτική: 20 χλμ. μήκους όδευσης Σε άλλες περιοχές (Π.Α.Κ.): 15 χλμ. ανεξάρτητα από την εγκατεστημένη ισχύ / μονάδα Σε νησιά: 10 χλμ. ανεξάρτητα από την εγκατεστημένη ισχύ / μονάδα.
Β. Μέγιστη απόσταση από το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας Υψηλής Τάσης (Υ.Τ.)	Όπως ορίζει ο Δ.Ε.Σ.Μ.Η.Ε. στους όρους σύνδεσης της εγκατάστασης (υψηλή τάση) και η ΔΕΗ (μέση και χαμηλή τάση)
Γ. Ελάχιστη απόσταση (Α) μεταξύ των ανεμογεννητριών.	2,5 φορές τη διάμετρο (d) της φτερωτής της ανεμογεννήτριας (A=2,5d)

Στον παρακάτω Πίνακα 4.2 σημειώνονται οι αποστάσεις από περιοχές περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος

Πίνακας 4.2 Αποστάσεις από περιοχές περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος

B. Αποστάσεις από περιοχές περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος	
Ασύμβατη χρήση	Ελάχιστη απόσταση εγκατάστασης από την ασύμβατη χρήση
Περιοχές απολύτου προστασίας της Φύσης και προστασίας της φύσης του άρθρου 19 παρ.1, 2 ν.1650/86 (Α'160)	Σύμφωνα με την εγκεκριμένη Ε.Π.Μ. ή το σχετικό π.δ. (του άρθρου 21 του ν. 1650/86) ή την σχετική Κ.Υ.Α. (ν. 3044/02)
Πυρήνες των Εθνικών Δρυμών, κηρυγμένα μνημεία της φύσης, αισθητικά δάση που δεν περιλαμβάνονται στις περιοχές απολύτου προστασίας της φύσης και προστασίας της φύσης των παρ. 1 και 2 του άρθρου 19 του ν. 1650/1986. Οι υγρότοποι RAMSAR Οι οικότοποι προτεραιότητας περιοχών της Επικράτειας που έχουν ενταχθεί στον κατάλογο των τόπων κοινοτικής σημασίας του δικτύου ΦΥΣΗ 2000 σύμφωνα με την απόφαση 2006/613/ΕΚ της Επιτροπής (ΕΕ L 259 της 21.9.2006, σ. 1).	Κρίνεται κατά περίπτωση στο πλαίσιο της ΕΠΟ
Ακτές κολύμβησης, που περιλαμβάνονται στο πρόγραμμα παρακολούθησης της ποιότητας των νερών κολύμβησης που συντονίζεται από το Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε.	1500μ. ²
Περιοχές ΖΕΠ ορνιθοπανίδας (SPA)	Κρίνεται κατά περίπτωση στο πλαίσιο της ΕΠΟ, μετά από ειδική ορνιθολογική μελέτη

Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να εξασφαλίζεται ελάχιστο επίπεδο θορύβου στα όρια των ανωτέρω οικιστικών δραστηριοτήτων μικρότερο των 45 db.

3. Απαγορεύεται η εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε απόσταση μικρότερη των 1500 μ. από τις ακτές που περιλαμβάνονται στο πρόγραμμα παρακολούθησης της ποιότητας των νερών κολύμβησης που συντονίζεται από το Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε.
4. Απαγορεύεται η εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε κλειστούς κόλπους με εύρος ανοίγματος <1.500 μ.
5. Ελάχιστη απόσταση εγκατάστασης από περιοχές και στοιχεία της πολιτιστικής κληρονομιάς (Πίνακας 4.3).

Πίνακας 4.3 Αποστάσεις από περιοχές και στοιχεία πολιτιστικής κληρονομιάς

Γ. Αποστάσεις από περιοχές και στοιχεία πολιτιστικής κληρονομιάς	
Ασύμβατη χρήση	Ελάχιστη απόσταση εγκατάστασης από την ασύμβατη χρήση
Εγγεγραμμένα στον Κατάλογο Παγκόσμιας Κληρονομιάς και τα άλλα μείζονος σημασίας μνημεία, αρχαιολογικοί χώροι και ιστορικοί τόποι της παρ. 5. εδάφιο ββ του άρθρου 50 του Ν. 3028/02	3.000 μ.
Ζώνη απόλυτου προστασίας (Ζώνη Α) λοιπών αρχαιολογικών χώρων	$A=7d$, όπου (d) η διάμετρος της φτερωτής της ανεμογεννήτριας, τουλάχιστον 500 μ.
Κηρυγμένα πολιτιστικά μνημεία και ιστορικοί τόποι	$A=7d$, όπου (d) η διάμετρος της φτερωτής της ανεμογεννήτριας, τουλάχιστον 500 μ.

6. Ελάχιστη απόσταση εγκατάστασης από οικισμούς (Πίνακας 4.4)

Πίνακας 4.4 Αποστάσεις από οικιστικές δραστηριότητες

Δ. Αποστάσεις από οικιστικές δραστηριότητες	
Ασύμβατη χρήση	Ελάχιστη απόσταση εγκατάστασης από την ασύμβατη χρήση
Πόλεις και οικισμοί με πληθυσμό >2000 κατοίκων ή οικισμοί με πληθυσμό < 2000 κατοίκων που χαρακτηρίζονται ως δυναμικοί, τουριστικοί ή αξιόλογοι κατά την έννοια του άρθρου 2 του π.δ. 24.4/3.5.1985	1.000 μ από το όριο του οικισμού ή του σχεδίου πόλης κατά περίπτωση
Παραδοσιακοί οικισμοί	1.500 μ. από το όριο του οικισμού
Λοιποί οικισμοί	500 μ. από το όριο του οικισμού
Οργανωμένη δόμηση Α΄ ή Β΄ κατοικίας (Π.Ε.Ρ.ΠΟ., Συνεταιρισμοί κλπ) ή και διαμορφωμένες περιοχές Β΄ κατοικίας, όπως αναγνωρίζονται στο πλαίσιο της Μ.Π.Ε. κάθε μεμονωμένης εγκατάστασης αιολικού πάρκου	1.000 μ. από τα όρια του σχεδίου ή της διαμορφωμένης περιοχής αντίστοιχα.
Ιερές Μονές	500 μ. από τα όρια της Μονής

Μεμονωμένη κατοικία (νομίμως υφιστάμενη)	Εξασφάλιση ελάχιστου επιπέδου θορύβου μικρότερου των 45 db.
--	---

7. Ελάχιστη απόσταση εγκατάστασης από παραγωγικές ζώνες ή δραστηριότητες του τριτογενή τομέα (Πίνακας 4.6).

Πίνακας 4.5 Αποστάσεις από ζώνες ή εγκαταστάσεις παραγωγικών δραστηριοτήτων

ΣΤ. Αποστάσεις από ζώνες ή εγκαταστάσεις παραγωγικών δραστηριοτήτων	
Ασύμβατη χρήση	Ελάχιστη απόσταση εγκατάστασης από την ασύμβατη χρήση
Αγροτική γη υψηλής παραγωγικότητας, ζώνες αναδασμού, αρδευόμενες εκτάσεις	Απόσταση ασφαλείας 1,5d
Ιχθυοκαλλιέργειες	Απόσταση ασφαλείας 1,5d
Μονάδες εσταυλισμένης κτηνοτροφίας:	Απόσταση ασφαλείας 1,5d
Λατομικές ζώνες και δραστηριότητες	Όπως ορίζεται στην κείμενη νομοθεσία.
Λειτουργούσες επιφανειακά μεταλλευτικές - εξορυκτικές ζώνες και δραστηριότητες	500 μ.
ΠΟΤΑ και άλλες Περιοχές Οργανωμένης Ανάπτυξης Παραγωγικών Δραστηριοτήτων του τριτογενούς τομέα, θεματικά πάρκα, τουριστικοί λιμένες και άλλες θεσμοθετημένες ή διαμορφωμένες τουριστικά περιοχές (όπως αναγνωρίζονται στο πλαίσιο της ΜΠΕ του αιολικού πάρκου για κάθε μεμονωμένη εγκατάσταση).	1.000 μ από τα όρια της ζώνης / περιοχής
Τουριστικά καταλύματα και ειδικές τουριστικές υποδομές,	

8. Το βάθος θεμελίωσης ή αγκύρωσης της βάσης της ανεμογεννήτριας, προσδιορίζεται από τις δυνατότητες της τρέχουσας τεχνολογίας και τις αντίστοιχες μελέτες στατικής και δυναμικής συμπεριφοράς.

9. Πρέπει να εξασφαλίζεται με την κατασκευή του αιολικού πάρκου η επαρκής διασύνδεση και η μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας είτε με το σύστημα της ηπειρωτικής χώρας είτε με το δίκτυο των μη διασυνδεδεμένων νησιών.

10. Μέγιστη απόσταση χειραΐας όδευσης από υποσταθμό διασύνδεσης: 20 χλμ.

11. Εφαρμόζονται οι κανόνες του τοπίου που ισχύουν για τις Π.Α.Π., όπως αυτοί προσδιορίζονται ειδικότερα στο Παράρτημα IV της παρούσας απόφασης.

Στον Πίνακα 4.5 σημειώνονται οι αποστάσεις από τα δίκτυα τεχνικών υποδομών και ειδικών χρήσεων.

Πίνακας 4.6 Αποστάσεις από δίκτυα τεχνικής υποδομής και ειδικές χρήσεις

Ε. Αποστάσεις από δίκτυα τεχνικής υποδομής και ειδικές χρήσεις	
Ασύμβατη χρήση	Ελάχιστη απόσταση εγκατάστασης από την ασύμβατη χρήση
Κύριοι οδικοί άξονες, οδικό δίκτυο αρμοδιότητας των Ο.Τ.Α. και σιδηροδρομικές γραμμές.	Απόσταση ασφαλείας 1,5d από τα όρια της ζώνης απαλλοτρίωσης της οδού ή του σιδηροδρομικού δικτύου αντίστοιχα.
Γραμμές υψηλής τάσεως	Απόσταση ασφαλείας 1,5d από τα όρια από τα όρια διέλευσης των γραμμών Υ.Τ.
Υποδομές τηλεπικοινωνιών (κεραίες), RADAR	Κατά περίπτωση μετά από γνωμοδότηση του αρμόδιου φορέα.
Εγκαταστάσεις ή δραστηριότητες της αεροπλοΐας	Κατά περίπτωση μετά από γνωμοδότηση του αρμόδιου φορέα.

4.2 Κριτήρια αποκλεισμού και αξιολόγησης

Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα για την χωροθέτηση υπεράκτιων (και χερσαίων) αιολικών πάρκων αποτελεί η εύρεση της κατάλληλης θέσης χωροθέτησης. Για την εύρεση της κατάλληλης θέσης χωροθέτησης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου τα κριτήρια τα οποία εξετάζονται μπορεί να είναι τεχνικά-οικονομικά, περιβαλλοντικά, κοινωνικά.

Για την εύρεση και επιλογή της κατάλληλης θέσης τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται είναι αρχικά τα κριτήρια αποκλεισμού, τα οποία διαχωρίζουν τις περιοχές που είναι ασύμβατες με την εγκατάσταση ενός πάρκου. Τα κριτήρια αυτά είναι: η ταχύτητα ανέμου, οι τιμές βαθυμετρίας, προστατευόμενες περιοχές, οι ακτοπλοϊκές γραμμές και η απόσταση από την ακτογραμμή. Στη συνέχεια τα κριτήρια τα οποία χρησιμοποιούνται για να αξιολογήσουν τις περιοχές οι οποίες έχουν προκύψει σύμφωνα με τα κριτήρια αποκλεισμού ονομάζονται κριτήρια αξιολόγησης και στοχεύουν στην εύρεση της καταλληλότερης θέσης εγκατάστασης του αιολικού πάρκου. Τέτοια κριτήρια μπορεί να αποτελούν η ταχύτητα του ανέμου, η απόσταση από λιμάνι, η απόσταση από την ακτογραμμή ή από το δίκτυο ηλεκτρισμού, οι απόσταση από αλιευτικές περιοχές και κυρίως κριτήρια τα οποία δύναται να μειώσουν το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας του αιολικού πάρκου και να μεγιστοποιήσουν την απόδοσή του (Τσιρόπουλος, 2018).

Ταχύτητα του ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου αποτελεί ένα οικονομικό κριτήριο. Η ποσότητα ισχύος που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια είναι ανάλογη με τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό σημαίνει ότι η αύξηση της μέσης ταχύτητας ανέμου από 6 m/s σε 7 m/s έχει ως αποτέλεσμα 60% περισσότερη ισχύ από την ίδια ανεμογεννήτρια και αύξηση της ετήσιας παραγωγής ενέργειας κατά 36%. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι μελετητές χρησιμοποιούν ως κατώτατη τιμή της μέσης ταχύτητας του ανέμου τα 6 m/s (Vagiona and Karanikolas, 2012) ενώ σε άλλες βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις χρησιμοποιούνται και τα 3 m/s ως

αποδεκτή τιμή (Mehtmet and Yerci, 2015). Γενικότερα οι απόψεις διαφέρουν όσον αφορά τις αποδεκτές τιμές και τις τιμές που χρησιμοποιούνται από τους διάφορους ερευνητές.

Βαθυμετρία

Όσον αφορά τη βαθυμετρία υπάρχουν αρκετές βιβλιογραφικές πηγές στις οποίες οι τιμές των βαθών διαφέρουν. Η βαθυμετρία αποτελεί ένα οικονομικό και τεχνικό κριτήριο καθώς ανάλογα με το βάθος στο οποίο χωροθετείται ένα αιολικό πάρκο επιλέγεται και ο κατάλληλος τύπος θεμελίωσης και συνεπώς σε άλλες περιπτώσεις το κόστος εγκατάστασης αυξάνεται είτε μειώνεται ανάλογα με τον τύπο της θεμελίωσης και τα υποθαλάσσια καλώδια σύνδεσης. Από την άλλη πλευρά σε πολύ μικρά βάθη η θεμελίωση μπορεί να επηρεάσει τα οικοσυστήματα. Οι τιμές που επιλέγονται στην παρούσα εργασία ως αποδεκτές είναι το ελάχιστο βάθος να ανέρχεται στα 30 m (Vagiona and Karanikolas, 2012) ενώ το μέγιστο στα 500 m σύμφωνα με τους Sourianos et al. (2017) .

Προστατευόμενες περιοχές

Αν και, σύμφωνα με την ισχύουσα ελληνική νομοθεσία, επιτρέπεται η εγκατάσταση αιολικών πάρκων σε περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί προστατευόμενες περιοχές του δικτύου Natura 2000, σε αρκετές περιπτώσεις, οι πολέμιοι επενδυτικών προτάσεων για αιολικά πάρκα έχουν βασίζονται τις αντιρρήσεις τους στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που είναι πιθανό να προκαλέσουν οι ανεμογεννήτριες (Vagiona and Karanikolas, 2012). Οι προστατευόμενες περιοχές αποτελούν τόσο κριτήριο αποκλεισμού όσο και κριτήριο αξιολόγησης στη συνέχεια. Στις προστατευόμενες περιοχές πέρα από τις χαρακτηρισμένες περιοχές Natura 2000 και τα καταφύγια άγριας ζωής, εντάσσονται και οι διαδρομές των αποδημητικών πτηνών κατά τους χειμερινούς μήνες. Όμως πλέον με την ύπαρξη υπηρεσιών υψηλής τεχνολογίας με συστήματα τεχνητής νοημοσύνης, ανιχνεύεται η κίνηση των πτηνών και διακόπτεται η λειτουργία των ανεμογεννητριών προκειμένου να μην προκληθεί κάποιο ατύχημα. Συνεπώς στην προκειμένη εργασία δεν θα ληφθεί ως κριτήριο αποκλεισμού η διαδρομή των αποδημητικών πτηνών. Όσον αφορά την απόσταση από τις προστατευόμενες περιοχές η τιμές κυμαίνονται σε εύρος 1-5 km απόστασης (Τσιρόπουλος, 2018).

Ακτοπλοϊκές γραμμές

Σύμφωνα με βιβλιογραφική μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τον Τσιρόπουλο (2018), οι ακτοπλοϊκές γραμμές αποτελούν ένα πολύ σημαντικό κριτήριο αποκλεισμού με στόχο να διασφαλίζεται η ασφαλής ναυσιπλοΐα και να αποφεύγονται τα ατυχήματα. Έτσι ως ελάχιστη απόσταση από τις γραμμές ναυσιπλοΐας στην παρούσα εργασία λαμβάνεται η ζώνη του 1 km σύμφωνα με τους Kim et al. (2016).

Απόσταση από την ακτογραμμή

Η απόσταση από την ακτογραμμή σχετίζεται με τη διασύνδεση του αιολικού πάρκου με τον χερσαίο υποσταθμό, δηλαδή με το μήκος των καλωδίων που απαιτούνται για τη σύνδεση και συνεπώς αποτελεί ένα τεχνικό-οικονομικό κριτήριο. Τα υποθαλάσσια καλώδια σε μια εγκατάσταση, σε κάποιες περιπτώσεις, μπορεί να αποβούν ένα από τα ακριβότερα τμήματα. Σύμφωνα με την ελληνική βιβλιογραφία η απόσταση από την ακτογραμμή που λαμβάνεται ως κατώτατο όριο εγγύτητας σύμφωνα με τους Stefanakou and Nikitakos (2016) είναι τα 6 nmi (≈ 11 km) ενώ ο Sourianos et al. (2017) έχουν σαν

κατώτατη τιμή τα 3 km. Η απόσταση από την ακτή πέρα από τεχνικό – οικονομικό κριτήριο που αποτελεί, είναι επίσης και κοινωνικό κριτήριο καθώς σε κοντινή απόσταση από την ακτή ένα αιολικό πάρκο μπορεί να προκαλεί οπτική όχληση.

4.3 Αδειοδοτικό πλαίσιο

Για την αδειοδότηση αιολικών πάρκων η διαδικασία που ακολουθείται διέπεται κυρίως από τον Ν. 3851/2010 «Επιτάχυνση της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής» ο οποίος τροποποίησε τον Ν. 3468/2006 ενώ ο Ν.4001/2011 «Για τη λειτουργία Ενεργειακών Αγορών Ηλεκτρισμού και Φυσικού Αερίου, για Έρευνα, Παραγωγή και δίκτυα μεταφοράς Υδρογονανθράκων και άλλες ρυθμίσεις» επέφερε επιπρόσθετες ρυθμίσεις. 7 Μάϊου το 2020 ψηφίστηκε ο Ν. 4685/20 «Εκσυγχρονισμός περιβαλλοντικής νομοθεσίας, ενσωμάτωση στην ελληνική νομοθεσία των Οδηγιών 2018/844 και 2019/692 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου και λοιπές διατάξεις» που αφορά τον εκσυγχρονισμό της περιβαλλοντικής νομοθεσίας, την ενσωμάτωση στην ελληνική νομοθεσία των Οδηγιών 2018/844 και 2019/692 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου και λοιπές διατάξεις ενώ περιλαμβάνει κεφάλαιο που αφορά την απλοποίηση της διαδικασίας αδειοδότησης που αποτελούσε τροχοπέδη για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων.

Τα στάδια αδειοδότησης των αιολικών έργων είναι:

- 1) Άδεια παραγωγής
- 2) Προσφορά σύνδεσης
- 3) Άδεια εγκατάστασης
- 4) Έγκριση Περιβαλλοντικών όρων (Ε.Π.Ο)
- 5) Άδεια λειτουργίας

4.3.1 Άδεια Παραγωγής

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας ισχύος μεγαλύτερης των 150 kW σύμφωνα με τον Ν.3468/06 απαιτείται η άδεια παραγωγής η οποία χορηγείται από τον Υπουργό Ανάπτυξης μετά από γνωμοδότηση της ΡΑΕ βάση συγκεκριμένων κριτηρίων σύμφωνα με το Άρθρο 2 παρ. 1 του Ν.3851/2010. Ταυτόχρονα με την υποβολή της αίτησης για άδεια παραγωγής υποβάλλεται και η Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ) ώστε να χορηγηθεί η Απόφαση Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ).

Με την υπ αριθμ. 54/2012 απόφαση της ΡΑΕ « Οδηγός Αξιολόγησης Αιτήσεων για χορήγηση άδειας παραγωγής σε υπεράκτιους αιολικούς σταθμούς ως προς το κριτήριο της ενεργειακής αποδοτικότητας-οικονομικής βιωσιμότητας» η άδεια παραγωγής χορηγείται με βάση την ενεργειακή αποδοτικότητα και οικονομική βιωσιμότητα του έργου και οι μετρήσεις του αιολικού δυναμικού εκτελούνται από πιστοποιημένους φορείς σύμφωνα με το DIN-EN ISO/17025/2000 πρότυπο (Κανέλλας, 2016).

4.3.2 Προσφορά Σύνδεσης

Για το Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας ο αρμόδιος διαχειριστής είναι ο ΑΔΜΗΕ και έτσι αφού έχει εκδοθεί η άδεια παραγωγής ο κάτοχος υποβάλλει την αίτηση στον ΑΔΜΗΕ και χορηγείται σε 4 μήνες η Προσφορά Σύνδεσης. Στα υπεράκτια αιολικά πάρκα η προσφορά σύνδεσης έχει ισχύ τέσσερα έτη και ανανεώνεται από τον διαχειριστή. Η αίτηση αυτή περιλαμβάνει (Κανέλλας, 2016):

- 1) Περιγραφή της επιδιωκόμενης σύνδεσης
- 2) Ημερομηνία σύνδεσης και λειτουργίας του μελλοντικού έργου

- 3) Αντίγραφο αποδεικτικού καταβολής στον τραπεζικό λογαριασμό του ΑΔΜΗΕ του προβλεπόμενου τιμήματος για την εκπόνηση των βασικών μελετών σύνδεσης
- 4) Απαιτούμενη αξιοπιστία της σύνδεσης με βάση σχετικά πρότυπα ασφάλειας και αξιοπιστίας Συστήματος.
- 5) Χάρτης κλίμακας 1:50.000 με τη θέση εγκατάστασης και τις συντεταγμένες του Υ/Σ σύνδεσης
- 6) Χάρτης ΓΥΣ με σημειωμένες τις γεωγραφικές συντεταγμένες του γηπέδου του Υ/Σ σύνδεσης
- 7) Σχέδιο σε χαρτί ή σε ψηφιακή μορφή του χώρου 1:200 ή 1:500 των προτεινόμενων εγκαταστάσεων, με υπόδειξη της θέσης του υποσταθμού, της θέσης του σημείου σύνδεσης, των μετασχηματιστών, των κτιρίων ελέγχου και κάθε άλλου αναγκαίου στοιχείου
- 8) Ηλεκτρικό μονογραμμικό διάγραμμα της προτεινόμενης εγκατάστασης που να δείχνει λεπτομερώς τον σημαντικό εξοπλισμό της εγκατάστασης

Στη συνέχεια σύμφωνα με τα δεδομένα της αίτησης ο ΑΔΜΗΕ μελετάει και αποφασίζει τον βέλτιστο και αποδοτικότερο τρόπο σύνδεσης εξετάζοντας εάν οι συνθήκες που υφίστανται στα σημεία σύνδεσης των εγκαταστάσεων είναι επαρκείς. Για να πραγματοποιηθεί αυτό ο αιτών υποβάλλει ένα αντίτιμο που προσδιορίζεται σύμφωνα με το ισχύον τιμολόγιο σύνδεσης. Στην αίτηση για την προσφορά σύνδεσης περιλαμβάνονται:

- Περιγραφή του τρόπου της σύνδεσης
- Γενική περιγραφή του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στη σύνδεση
- Εκτίμηση των δαπανών για την υλοποίηση των έργων επέκτασης της προτεινόμενης σύνδεσης
- Την προθεσμία αποδοχής της προσφοράς σύνδεσης
- Το χρόνο ισχύος της προσφοράς σύνδεσης
- Ενδεικτική εκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου υλοποίησης της σύνδεσης

4.3.3 Άδεια Εγκατάστασης

Για την Άδεια Εγκατάστασης σύμφωνα με τον Ν.3468/2006, ο ενδιαφερόμενος πρέπει να έχει στην κατοχή του την Άδεια Παραγωγής και την ΕΠΟ. Η άδεια εγκατάστασης χορηγείται μετά από αίτηση στην περιφέρεια στην οποία γίνεται η εγκατάσταση του νέου σταθμού. Τα δικαιολογητικά της αίτησης είναι τα παρακάτω:

- Η ΕΠΟ
- Η (δεσμευτική) Προσφορά Σύνδεσης του σταθμού στο Σύστημα ή σε Δίκτυο
- Σε περίπτωση εγκατάστασης θαλάσσιου αιολικού πάρκου η έγκριση επέμβασης είτε η παραχώρηση του δικαιώματος χρήσης του θαλάσσιου χώρου
- Μια σειρά από παραστατικά πληρωμής τελών, κρατήσεων και φόρων

Η Άδεια Εγκατάστασης (για έργα στις υποκατηγορίες Α2 Β3 Β4) εκδίδεται από τον Γενικό Γραμματέα της Περιφέρειας με προθεσμία δεκαπέντε εργάσιμων ημερών και για έργα στην υποκατηγορία Α1 εκδίδεται από τον Υπουργό Ανάπτυξης μέσα σε προθεσμία 30 ημερών. Η Άδεια Εγκατάστασης έχει ισχύ δύο έτη και μπορεί να παραταθεί για δύο ακόμα έτη μετά από αίτηση με περιορισμούς.

4.3.4 Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων

Για την Αίτηση Περιβαλλοντικών Όρων αφού έχει εκδοθεί η άδεια παραγωγής υποβάλλεται αίτηση στην εκάστοτε Περιφέρεια. Η αρμόδια αρχή μελετάει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του έργου και εξετάζει τη πρόληψη και αποκατάστασης και αποφασίζει για την χορήγηση ή μη της ΕΠΟ σε διάστημα

τεσσάρων μηνών από τη στιγμή που υποβάλλεται ο πλήρης φάκελος. Η ΕΠΟ έχει ισχύ δέκα ετών και ανανεώνεται ύστερα από αίτηση του έχοντος άδειας παραγωγής έξι μήνες πριν τη λήξη για ίσο χρόνο.

Για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα σύμφωνα με τον Ν. 2971/2001 που τροποποιήθηκε από τον 3468/2006 επιτρέπεται η παραχώρηση θαλάσσιου χώρου όμως ο ενδιαφερόμενος συμπληρώνει αίτηση στην αρμόδια Κτηματική Υπηρεσία που κοινοποιεί στον Υπουργό Ανάπτυξης. Τα έγγραφα της ΕΠΟ είναι διαφορετικά αναλόγως με την κατηγορία του έργου.

4.3.5 Άδεια λειτουργίας

Μετά την άδεια εγκατάστασης ο ενδιαφερόμενος υποβάλει στον αρμόδιο διαχειριστή την αίτηση για προσωρινή σύνδεση του σταθμού για δοκιμαστική περίοδο λειτουργίας 15 ημερών. Στο διάστημα αυτό γίνονται έλεγχοι και δοκιμές από τον διαχειριστή του έργου και τον επενδυτή. Με το πέρας των ημερών και εάν δεν υπάρξει κάποιο πρόβλημα δίνεται η βεβαίωση που πιστοποιεί ότι έχει πραγματοποιηθεί με επιτυχία η περίοδος δοκιμαστικής λειτουργίας (Κανέλλας, 2016).

Στην συνέχεια μετά από αίτηση η Άδεια Λειτουργίας δίνεται με απόφαση της αρχής που χορήγησε και την Άδεια Εγκατάστασης και πραγματοποιείται έλεγχος με επιτόπια έρευνα από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Ύστερα από τον έλεγχο, σε διάστημα δεκαπέντε ημερών δίνεται η άδεια λειτουργίας του σταθμού. Ο κάτοχος της άδειας υποχρεούται στην συνέχεια τους δύο πρώτους μήνες κάθε νέου έτους να ενημερώνει το Υπουργείο Ανάπτυξης και τη ΡΑΕ για δεδομένα του προηγούμενου έτους που αφορούν:

- Την ετήσια παραγωγή ενέργειας και τη μέγιστη ισχύ παραγωγής του σταθμού που καταγράφηκε κατά το διάστημα αυτό.
- Το ετήσιο ποσοστό μη διαθεσιμότητας του σταθμού και τους λόγους στους οποίους οφείλεται.
- Τυχόν προβλήματα λειτουργίας του σταθμού που οφείλονται στο σύστημα ή το δίκτυο.

5. Χωροθέτηση υπερράκτιου αιολικού πάρκου με τη χρήση GIS

5.1 Ελληνική και διεθνής εμπειρία

Σήμερα στην Ευρώπη η εγκατάσταση υπερράκτιων αιολικών πάρκων σταθερής έδρασης (θεμελιώσεις στον πυθμένα της θάλασσας) έχει ευδοκιμήσει σημαντικά. Σύμφωνα με την στρατηγική για τις θαλάσσιες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που ανακοίνωσε η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, μέχρι το 2030 προβλέπεται αύξηση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος από 12 GW που είναι σήμερα σε 60 GW και μέχρι το 2050 σε 600 GW. Υπολογίζεται ότι μέχρι το 2040 η θαλάσσια αιολική ενέργεια θα είναι η σημαντικότερη πηγή παραγωγής ηλεκτρισμού στην Ευρώπη.

Τα θαλάσσια αιολικά πάρκα σταθερής έδρασης έχουν νόημα όταν αναφερόμαστε σε μικρά βάθη έως περίπου 40 m - 50 m, κάτι που στην Ελλάδα δεν θα ευδοκιμούσε καθώς οι ελληνικές θάλασσες χαρακτηρίζονται από μεγάλα βάθη. Έτσι για τον ελλαδικό χώρο αρκετά υποσχόμενη είναι η τεχνολογία των πλωτών ανεμογεννητριών που έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια και έχει εφαρμοστεί παγκοσμίως. Στην Ευρώπη υπάρχουν δύο πλωτά πάρκα με ανεμογεννήτριες: στην Σκωτία το έργο Hywind με 5 ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 30 MW και Kincardine με 5 ανεμογεννήτριες Vestas συνολικής ισχύος 50 MW και στην Πορτογαλία το έργο Windfloat Atlantic Phase 1 με 3 ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 25,2 MW ενώ υπάρχουν και άλλα έργα τα οποία βρίσκονται υπό ανάπτυξη και τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1 Υπό ανάπτυξη έργα πλωτών αιολικών εγκαταστάσεων (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ, 2021)

	ΘΑΠ	Ισχύς MW	Τεχνολογία πλωτής κατασκευής	Σύνδεση
Ηνωμένο Βασίλειο	Hywind	30	Spar	2017
Πορτογαλία	Windfloat Atlantic Phase 1	25,20	Semi-Sub	2020
Γαλλία	EolMed	24	Barge	2021-22
	Provence Grand Large	28,50	TLP (Tention Leg Platform)	2021
	EFGL	30	Semi- Sub	2022
	Eoliennes Flottantes de Groix	28,50	TLP	2022
Νορβηγία	Hywind Tampen	88	Spar Buoy	2022

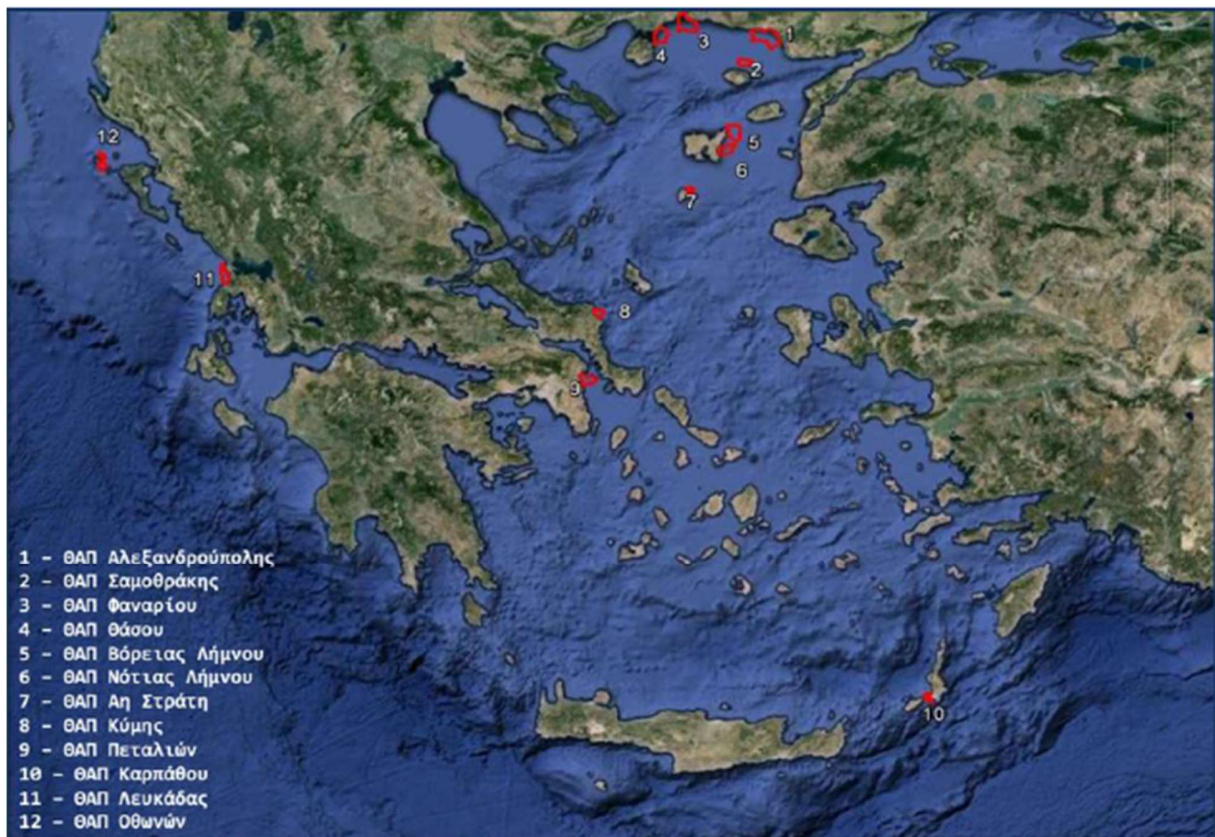
Καθώς οι πλωτές κατασκευές μπορούν να εγκατασταθούν σε θέσεις με μεγάλα βάθη διευρύνουν κατά πολύ το αιολικό δυναμικό που μπορεί να αξιοποιηθεί. Επίσης αποτελεί ιδανική επιλογή για τον Ελληνικό χώρο καθώς επιτρέπει την μαζική εγκατάσταση μεγάλων αιολικών πάρκων σε μεγάλα βάθη.

5.2 Πρώτη κεντρική προσπάθεια χωροθέτησης ΘΑΠ με βάση το ΕΠΑΘΑΠ 2010/12

Το Εθνικό Πρόγραμμα Ανάπτυξης Θαλάσσιων Αιολικών Πάρκων σύμφωνα με τον Ν.3851/2010 ήταν η πρώτη προσπάθεια χωροθέτησης θαλάσσιων αιολικών πάρκων στον ελληνικό χώρο. Το πρόγραμμα αυτό καθόρισε την ακριβή θέση των θαλάσσιων αιολικών πάρκων, τη θαλάσσια έκταση που καταλαμβάνουν και τη μέγιστη εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς τους. Στο πλαίσιο της μελέτης για την «Εκπόνηση Στρατηγικής Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων του Εθνικού Προγράμματος Ανάπτυξης Θαλάσσιων Αιολικών Πάρκων» που υλοποίησαν η ΚΑΠΕ, το ΕΛΚΕΘΕ και η ENVECO αναγνωρίστηκαν οι δυνητικές θέσεις εγκατάστασης υπεράκτιων αιολικών πάρκων σταθερής έδρασης, δηλαδή όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας, θεμελιώσεις που αφορούν βάθη έως 50m, και συνεπώς δεν εκμεταλλεύθηκαν με βέλτιστο τρόπο το αιολικό δυναμικό των ελληνικών θαλασσών. Επιπλέον σύμφωνα με αυτή τη μελέτη υπολογίστηκε ότι η μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς αιολικών πάρκων σταθερής έδρασης στον ελληνικό χώρο θα ανερχόταν σε 3.600 MW (μέγιστο σενάριο). Έτσι προσπάθεια χωροθέτησης υπεράκτιων αιολικών εγκαταστάσεων βάση του ΕΠΑΘΑΠ 2010/12 δεν πραγματοποιήθηκε με επιτυχία. Στον πίνακα 5.2 και την Εικόνα 5.1 που φαίνονται παρακάτω παρουσιάζονται οι ενδεικτικές θέσεις χωροθέτησης υπεράκτιων πάρκων σύμφωνα με το ΕΠΑΘΑΠ 2010/2012 (ΕΛΕΤΑΕΝ,2021).

Πίνακας 5.2 Ενδεικτικές θέσεις χωροθέτησης ΘΑΠ (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ,2021)

α/α	Όνομα ΘΑΠ	Τυπικό σενάριο χωροθέτησης Α/Γ		Μέγιστο σενάριο χωροθέτησης Α/Γ	
		Α/Γ	MW	Α/Γ	MW
1	Αλεξανδρούπολης	78	546	136	952
2	Σαμοθράκης	31	217	55	385
3	Φαναρίου	59	413	110	770
4	Θάσου	38	266	66	462
5	Βόρειας Λήμνου	32	224	58	406
6	Νότιας Λήμνου	10	70	18	126
7	Αη Στράτη	8	56	11	77
8	Κύμης	14	98	23	161
9	Πεταλιών	2	14	2	14
10	Καρπάθου	5	35	7	49
11	Λευκάδας	9	63	13	91
12	Οθωνών	20	140	27	189



Εικόνα 5.5.1 Περιοχές εγκατάστασης ΘΑΠ με βάση το ΕΠΑΘΑΠ 2010/12 (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ,2021)

5.3 Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών

Όπως και ο τομέας της γεωγραφίας, ο όρος Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS) είναι δύσκολο να οριστεί και αντιπροσωπεύει την ενοποίηση πολλών θεματικών τομέων. Συνεπώς, δεν υπάρχει ένας απόλυτος ορισμός του GIS. Ένας ευρέως αποδεκτός ορισμός του GIS είναι αυτός που παρέχεται από το Εθνικό Κέντρο Γεωγραφικών Πληροφοριών και Ανάλυσης: GIS είναι ένα σύστημα μηχανημάτων, λογισμικού και διαδικασιών για τη διευκόλυνση της διαχείρισης, της ανάλυσης, της μοντελοποίησης, της αναπαράστασης και της εμφάνισης γεωγραφικών δεδομένων για την επίλυση σύνθετων ζητημάτων σχετικά με τον προγραμματισμό και τη διαχείριση των πόρων. Τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών έχουν αναδειχθεί την τελευταία δεκαετία ως ουσιαστικό εργαλείο για τον αστικό σχεδιασμό και τη διαχείριση των πόρων. Η ικανότητά τους να αποθηκεύουν, να ανακτούν, να αναλύουν, να μοντελοποιούν και να χαρτογραφούν μεγάλες περιοχές με τεράστιους όγκους χωρικών δεδομένων έχει οδηγήσει σε έναν εκπληκτικό πολλαπλασιασμό των εφαρμογών. Τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών χρησιμοποιούνται πλέον για σχεδιασμό χρήσεων γης, διαχείριση υπηρεσιών κοινής ωφέλειας, μοντελοποίηση οικοσυστημάτων, αξιολόγηση και σχεδιασμό τοπίου, σχεδιασμό μεταφορών και υποδομής, ανάλυση αγοράς, ανάλυση οπτικών επιπτώσεων, διαχείριση εγκαταστάσεων, φορολογική εκτίμηση, ανάλυση ακινήτων και πολλές άλλες εφαρμογές. Οι λειτουργίες του GIS περιλαμβάνουν: εισαγωγή δεδομένων, εμφάνιση δεδομένων, διαχείριση δεδομένων, ανάκτηση και ανάλυση πληροφοριών.

Με αυτόν τον τρόπο, δίνεται η δυνατότητα ανάλυσης των θεματικών και χωρικών χαρακτηριστικών μιας περιοχής για την καλύτερη γνώση της περιοχής αυτής (Escobar et al, n.d).

Εφαρμογές GIS

Χαρτογράφηση τοποθεσιών: το GIS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη χαρτογράφηση τοποθεσιών. Επιτρέπει τη δημιουργία χαρτών μέσω αυτοματοποιημένης χαρτογράφησης, συλλογής δεδομένων και εργαλείων ανάλυσης τοπογραφίας.

Χαρτογράφηση ποσοτήτων: για την εύρεση τοποθεσιών που πληρούν τα κριτήριά που έχουν τεθεί έτσι ώστε να αναλαμβάνονται δράσεις ή για να τον συσχετισμό των τόπων. Αυτό παρέχει ένα επιπλέον επίπεδο πληροφοριών πέρα από την απλή χαρτογράφηση των τοποθεσιών των χαρακτηριστικών.

Πυκνότητα χαρτογράφησης: σε περιοχές με πολλά χαρακτηριστικά μπορεί να είναι δύσκολο να γίνει διάκριση των περιοχών με μεγαλύτερη συγκέντρωση από άλλες. Ένας χάρτης πυκνότητας επιτρέπει την μέτρηση των χαρακτηριστικών χρησιμοποιώντας μια ενιαία μονάδα, όπως τετραγωνικά μέτρα, στρέμματα ή τετραγωνικά μίλια, ώστε να φαίνεται καθαρά η κατανομή.

Εύρεση αποστάσεων: το GIS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογίσει μία απόσταση από ένα χαρακτηριστικό.

Χαρτογράφηση και παρακολούθηση αλλαγών: Το GIS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη χαρτογράφηση της αλλαγών σε μια περιοχή για την πρόβλεψη μελλοντικών συνθηκών, την απόφαση για μια πορεία δράσης ή την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μιας δράσης ή πολιτικής.

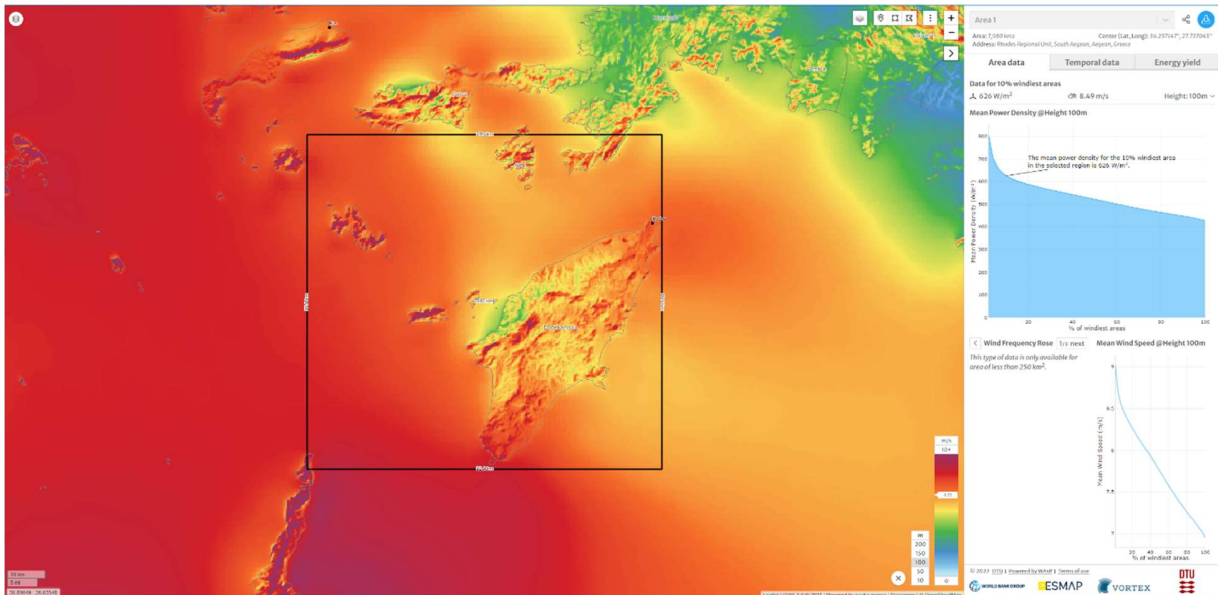
5.4 Επιλογή θέσης χωροθέτησης με τη χρήση GIS

Για την εύρεση κατάλληλων θέσεων χωροθέτησης αιολικών πάρκων η μέθοδος καθορίζεται από τον μελετητή καθώς δεν υπάρχει προκαθορισμένος και αυστηρός τρόπος για να επιτευχθεί. Στην παρούσα εργασία η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη χωροθέτηση αιολικής εγκατάστασης είναι μέσω των κριτηρίων αποκλεισμού και τη χρήση GIS και η περιοχή χωροθέτησης ορίστηκε ως το Νότιο Αιγαίο και πιο συγκεκριμένα η Περιφερειακή Ενότητα Ρόδου. Ειδικότερα, χρησιμοποιήθηκαν οι ελάχιστες αποστάσεις των κριτηρίων αποκλεισμού, που καθορίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο οι οποίες βασίζονται στην εθνική και τη διεθνή εμπειρία χωροθέτησης και του ΕΠΧΣΑΑ για τις ΑΠΕ. Στην συνέχεια με τη χρήση ψηφιοποιημένων μορφών των κριτηρίων αυτών καθορίστηκαν οι πιθανές θέσεις χωροθέτησης.

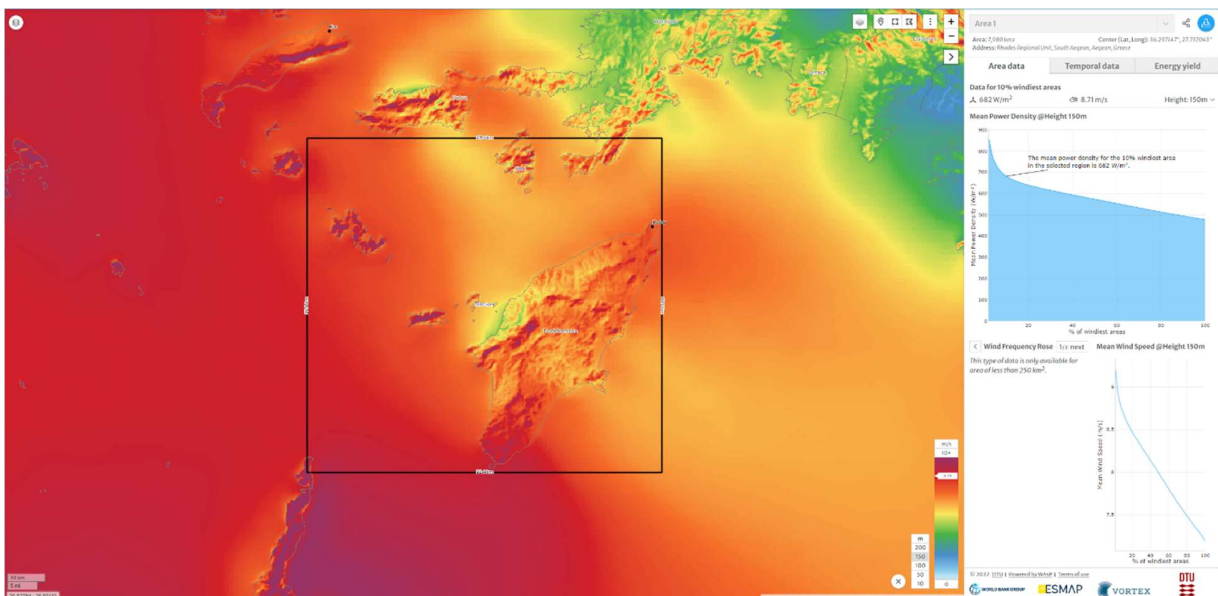
Ταχύτητα του ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου αποτελεί το σημαντικότερο κριτήριο καθώς σχετίζεται με την παραγωγή ενέργειας του αιολικού πάρκου. Στην παρούσα εργασία για την εύρεση της ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή μελέτης αξιοποιήθηκαν δεδομένα από το Global Wind Atlas και οι ενδείξεις αφορούν υψόμετρα $h=100$ m και $h=150$ m δηλαδή όσο περίπου το ελάχιστο ύψος μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας το οποίο υπολογίζεται έως το μέσο του ρότορα. Στην περιοχή μελέτης όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2 η μέση ταχύτητα του ανέμου για $h=100$ m ανέρχεται σε 8.49 m/s για όλη την περιοχή μελέτης και στην Εικόνα 5.3 για $h=150$ m η μέση ταχύτητα ανέμου ανέρχεται σε 8.71 m/s ενώ το ελάχιστο που ορίστηκε στην παρούσα

εργασία είναι τα 6 m/s. Η ταχύτητα αυτή μπορεί να διαφέρει στις επιμέρους περιοχές όμως εφόσον η ταχύτητα ξεπερνά τα 6 m/s αποτελεί μια αποδεκτή και αποδοτική τιμή.



Εικόνα 5.2 Μέση ταχύτητα ανέμου στην περιοχή μελέτης σε υψόμετρο $h = 100\text{ m}$ (Πηγή: Global Wind Atlas)

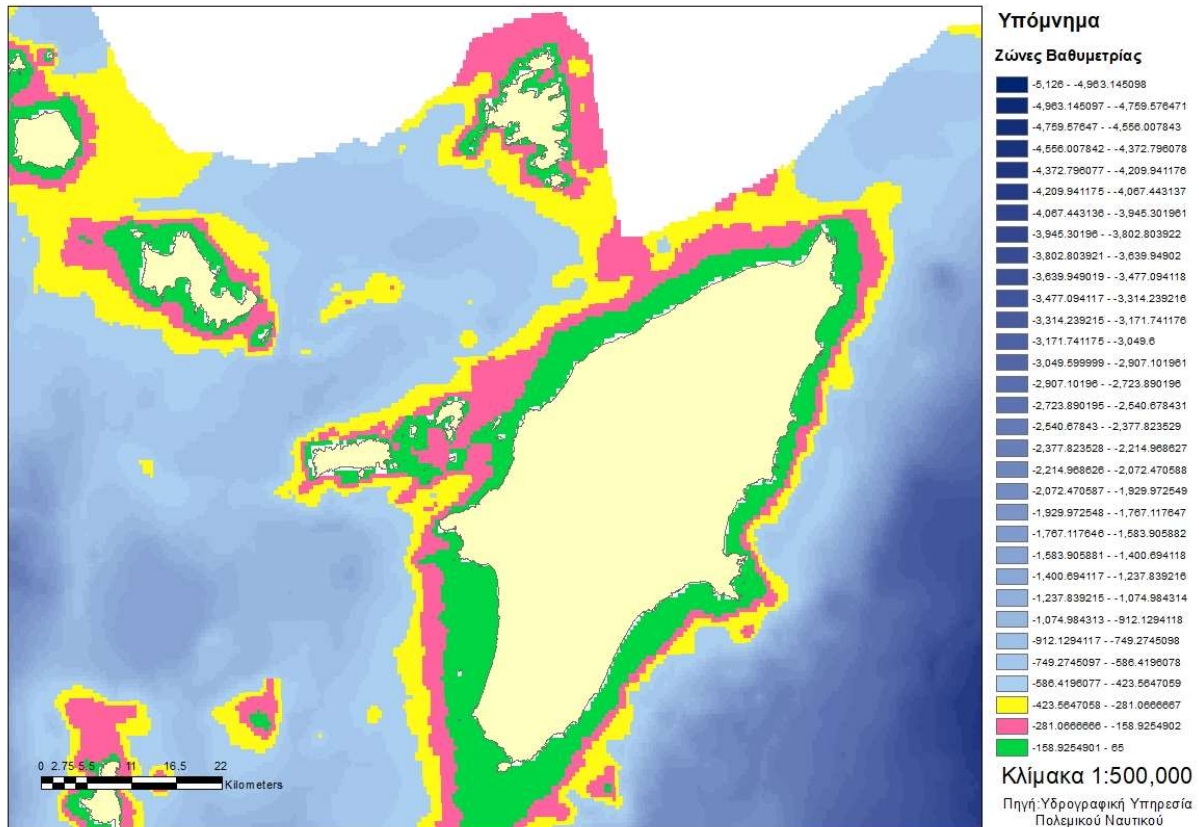


Εικόνα 5.3 Μέση ταχύτητα ανέμου στην περιοχή μελέτης σε υψόμετρο $h = 150\text{ m}$ (Πηγή: Global Wind Atlas)

5.4.1 Βαθυμετρία

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο η βαθυμετρία αποτελεί ένα κριτήριο τεχνικό-οικονομικό καθώς σχετίζεται με τον τύπο της θεμελίωσης. Το ελάχιστο βάθος που έχει καθοριστεί στη συγκεκριμένη εργασία είναι τα 30m (Vagiona and Karanikolas, 2012) ενώ το μέγιστο ανέρχεται σε 500m (Sourianos et al., 2017.) Οι ελληνικές θάλασσες χαρακτηρίζονται από μεγάλα βάθη τα οποία ως επί το

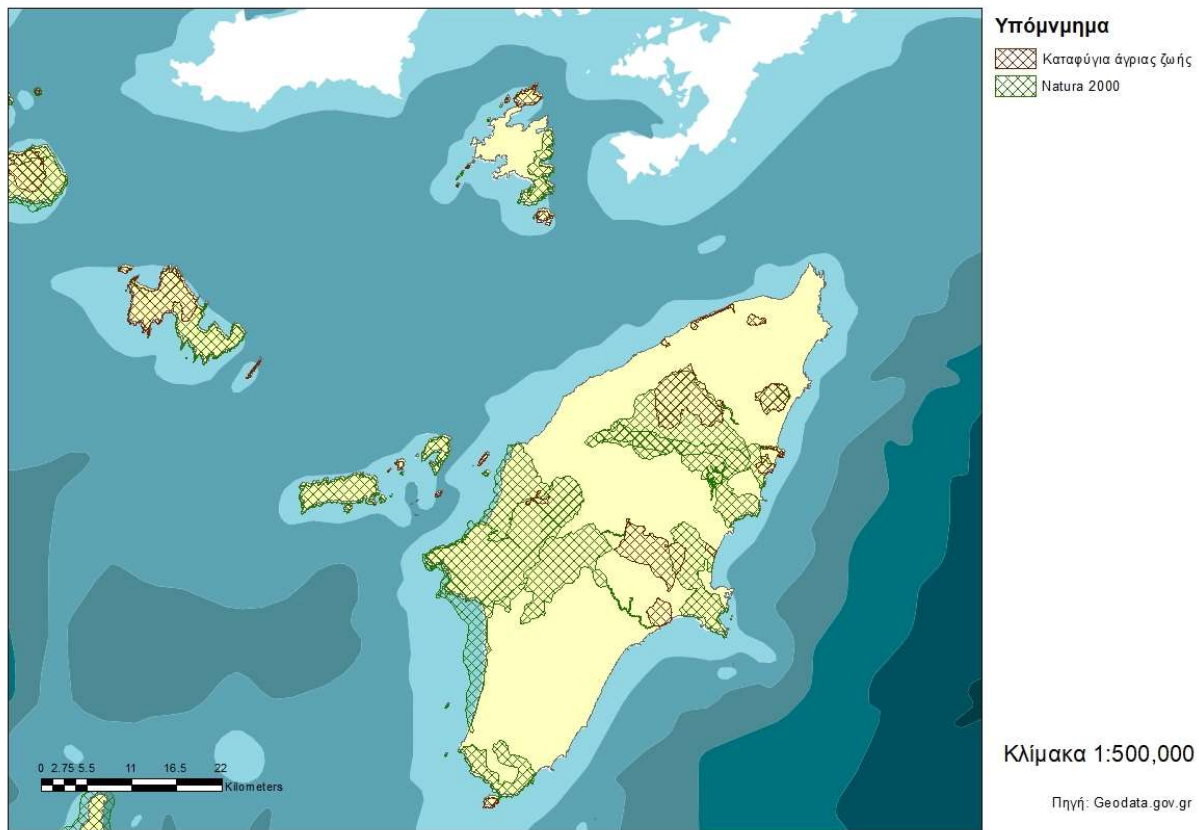
πλείστο είναι μεγαλύτερα των 50 m, πλην ελάχιστων εξαιρέσεων και συνεπώς οι θεμελιώσεις οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στην Ελλάδα είναι οι πλωτές. Παρακάτω φαίνεται ο βαθυμετρικός χάρτης της περιοχής μελέτης (Εικόνα 5.4). Με έντονα χρώματα φαίνονται οι περιοχές στις οποίες τα βάθη ανέρχονται σε έως 423 μέτρα (λόγω ταξινόμησης) και συνεπώς ενδείκνυνται για τη χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων.



Εικόνα 5.4 Βαθυμετρικός Χάρτης (Ιδία επεξεργασία)

5.4.2 Απόσταση από προστατευόμενες περιοχές

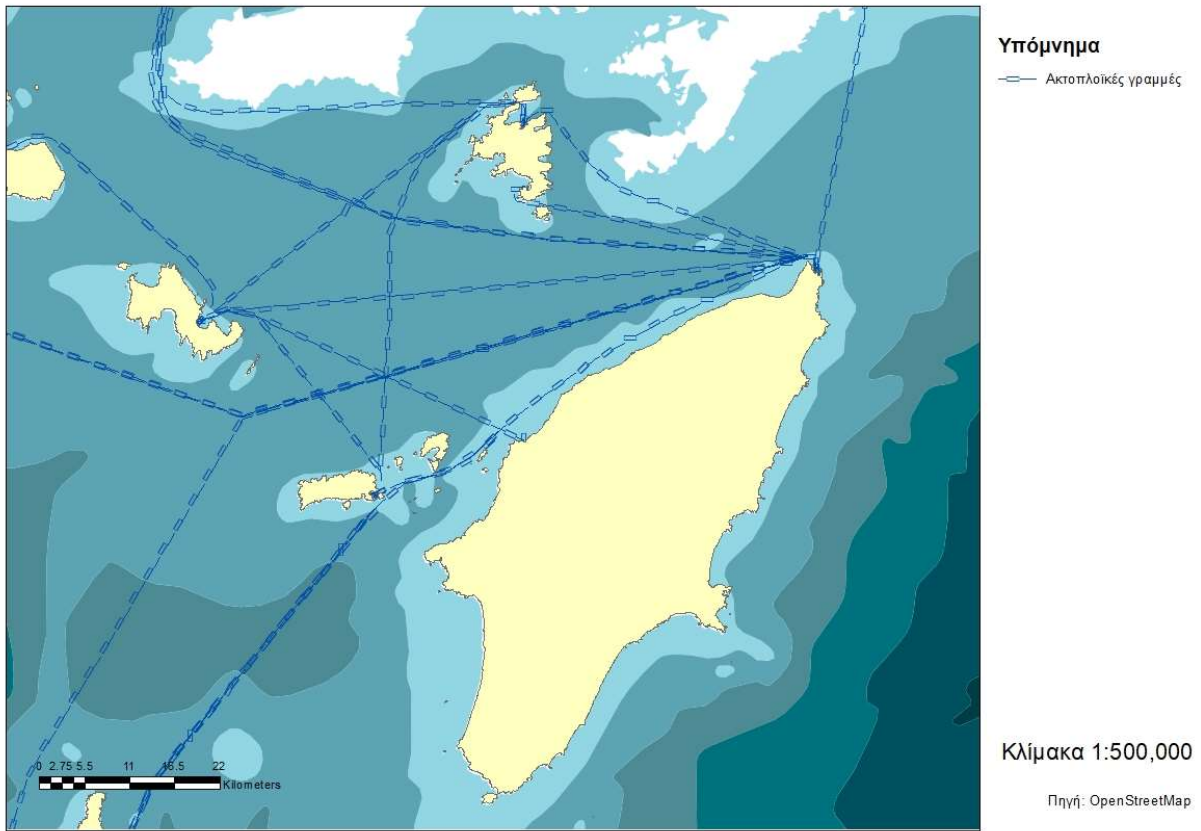
Στον παρακάτω χάρτη (Εικόνα 5.5) φαίνονται οι περιοχές Natura 2000 και τα καταφύγια άγριας ζωής της περιοχής μελέτης. Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως ασύμβατες με την εγκατάσταση ανεμογεννητριών. Στην περιοχή μελέτης παρατηρούνται αρκετές περιοχές Natura ενώ η Χάλκη αποτελεί ολόκληρη μια τέτοια περιοχή. Κατά τη διαδικασία εγκατάστασης των υπεράκτιων αιολικών πάρκων όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο υπάρχει περίπτωση να διαταραχθεί το θαλάσσιο οικοσύστημα στο σημείο το οποίο πραγματοποιείται η γεώτρηση για τη κατασκευή της θεμελίωσης που όμως μετά το πέρας της εγκατάστασης το οικοσύστημα επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση.



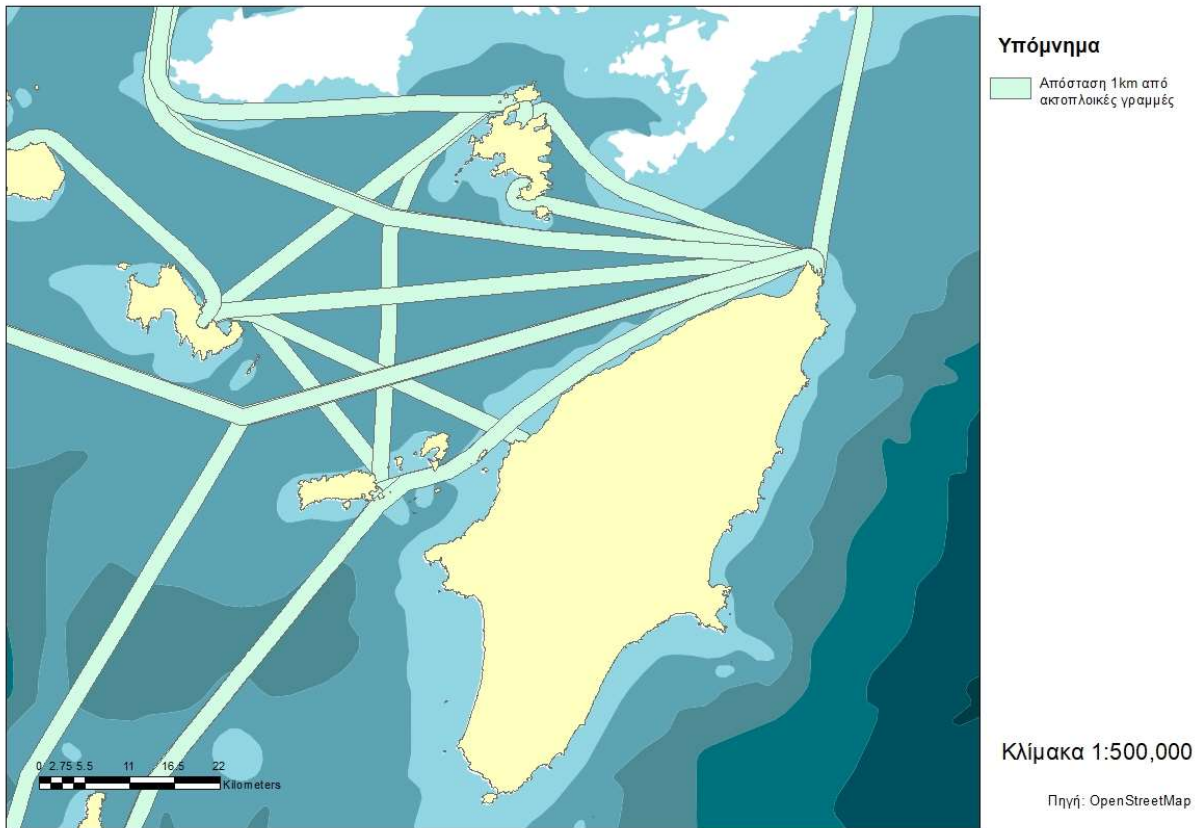
Εικόνα 5.5 Προστατευόμενες περιοχές

5.4.3 Απόσταση από ακτοπλοϊκές γραμμές

Η απόσταση από τις ακτοπλοϊκές γραμμές ορίστηκε ως 1km και όπως φαίνεται στους δύο παρακάτω χάρτες (Εικόνα 5.6 και 5.7) στην περιοχή μελέτης υπάρχει ένα αρκετά πυκνό δίκτυο θαλάσσιας συγκοινωνίας. Η ζώνη του 1 km φαίνεται στην Εικόνα 5.7 και στόχος είναι η διασφάλιση ασφαλών μετακινήσεων στην περιοχή μελέτης και αποφυγή οποιουδήποτε ατυχήματος. Παράλληλα οι ακτοπλοϊκές γραμμές είναι απαραίτητες για την ισόρροπη και ισότιμη ανάπτυξη των νησιωτικών περιοχών καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις αποτελούν το μοναδικό μέσο σύνδεσης με την ηπειρωτική Ελλάδα.



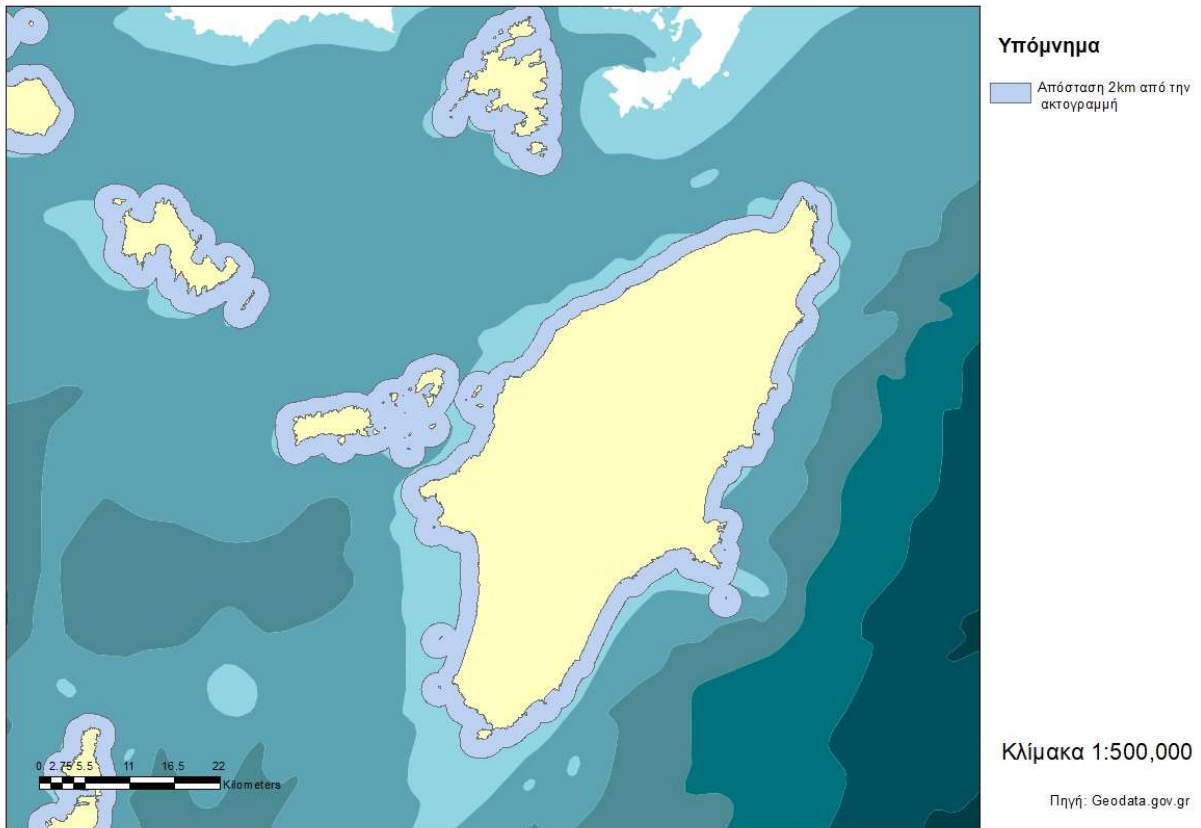
Εικόνα 5.6 Ακτοπλοϊκές γραμμές



Εικόνα 5.7 Απόσταση 1km από ακτοπλοϊκές γραμμές

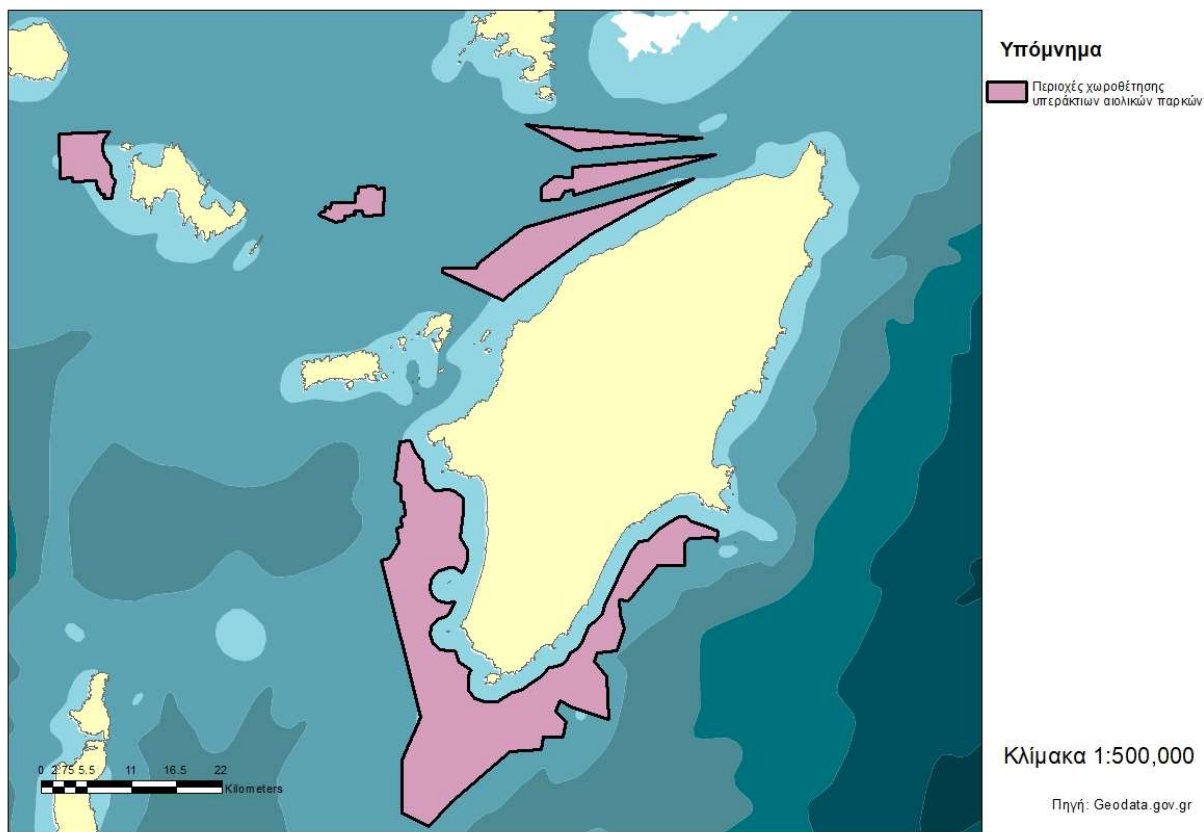
5.4.4 Απόσταση από την ακτογραμμή

Όπως αναλύθηκε στο τέταρτο κεφάλαιο η απόσταση από την ακτογραμμή ορίστηκε ως 2 km ώστε να εξυπηρετεί αφενός τα τεχνικό-οικονομικό κομμάτι της εγκατάστασης το οποίο σχετίζεται με τα υποθαλάσσια καλώδια σύνδεσης που αποτελούν από τα ακριβότερα κομμάτια σε μια αιολική εγκατάσταση και αφετέρου το κοινωνικό κομμάτι που είναι η οπτική όχληση. Στην Εικόνα 5.8 παρουσιάζεται ο χάρτης που ορίζει την απόσταση 2 km ως ελάχιστη απόσταση από την ακτογραμμή.



Εικόνα 5.8 Απόσταση 2 km από την ακτογραμμή

Έχοντας λάβει υπόψη όλα τα παραπάνω κριτήρια αποκλεισμού ταυτόχρονα προέκυψαν οι κατάλληλες περιοχές χωροθέτησης υπεράκτιων αιολικών πάρκων στην περιοχή μελέτης και φαίνονται στην Εικόνα 5.9 σε ροζ χρώμα.



Εικόνα 5.9 Κατάλληλες περιοχές χωροθέτησης υπεράκτιων αιολικών πάρκων

Με την εφαρμογή των κριτηρίων αποκλεισμού επισημάνθηκαν οι πιθανές θέσεις χωροθέτησης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Στην προκειμένη περίπτωση η περιοχές που προέκυψαν βρίσκονται 1) στο νότιο τμήμα της Ρόδου 2) βορειοανατολικά της Τήλου 3) ανάμεσα σε Ρόδο και Σύμη και 4) ανάμεσα σε Τήλο-Σύμη-Χάλκη. Η ελάχιστη απόσταση που έχει προταθεί από το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας ενώ η ελάχιστη έκταση ορίστηκε (από το ΚΑΠΕ) ως 0,65 km², δεδομένου ότι οι ανεμογεννήτριες που θα χρησιμοποιηθούν έχουν διάμετρο ρότορα τα 154 m. Σύμφωνα με το ΕΠΧΣΑΑ για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών είναι 2.5 φορές το περύγιο της ανεμογεννήτριας και συνεπώς η ελάχιστη έκταση, που ορίζεται στην παρούσα εργασία, να έχει μια περιοχή χωροθέτησης υπεράκτιου αιολικού πάρκου είναι τα 0.5 km². Στην προκειμένη περίπτωση όλες οι περιοχές που φαίνονται στα αποτελέσματα είναι μεγαλύτερες από 0.5 km² και συνεπώς είναι όλες αποδεκτές. Με την ίδια μέθοδο, σε οποιαδήποτε περίπτωση παρόμοιας έρευνας με σκοπό την χωροθέτηση αιολικού πάρκου στον θαλάσσιο (και ηπειρωτικό) χώρο είναι δυνατή η εύρεση κατάλληλων θέσεων.

6. Σύνοψη, Συμπεράσματα, Μελλοντική Έρευνα

Το ενεργειακό πρόβλημα αποτελεί ένα σύγχρονο ζήτημα το οποίο απαιτεί σύγχρονες λύσεις εκμετάλλευσης της υπάρχουσας ισχύος. Η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού αποτελεί μια μέθοδο παραγωγής ενέργειας που αναπτύσσεται σημαντικά τα τελευταία χρόνια και φαίνεται να έχει σημαντικές προοπτικές στο άμεσο μέλλον. Καθώς σταδιακά η εγκατάσταση χερσαίων αιολικών πάρκων φτάνει σε ένα επίπεδο κορεσμού είναι απαραίτητο να βρεθούν λύσεις για την χωροθέτηση υπεράκτιων αιολικών πάρκων με όλα τα πλεονεκτήματα που συνεπάγονται. Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα λύνουν ένα από τα βασικά προβλήματα που αντιμετωπίζουν τα χερσαία που αφορά τους περιορισμούς που θέτει το δομημένο και αδόμητο περιβάλλον όμως παρουσιάζουν διαφορετικά προβλήματα πολυπλοκότητας τα οποία χρειάζονται διευθέτηση για να επιτευχθεί ο στόχος που έχει τεθεί σύμφωνα με το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα της Ελλάδας το οποίο στοχεύει στην εγκατάσταση 7 GW αιολικής ενέργειας στη χώρα έως το 2030.

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση όπως φάνηκε για μια χώρα όπως η Ελλάδα, με μεγάλα βάθη θαλασσών, το πιθανότερο σενάριο είναι η εγκατάσταση πλωτών αιολικών πάρκων. Συνεπώς στην παρούσα εργασία κρίθηκε αναγκαίο να πραγματοποιηθεί επιπλέον διερεύνηση όσον αφορά τους τύπους θεμελίωσης με στόχο την επισήμανση των δυσκολιών το πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων που παρουσιάζει ένας τέτοιος τύπος θεμελίωσης. Μέχρι στιγμής τα περισσότερα εγκατεστημένα υπεράκτια αιολικά πάρκα στην Ευρώπη αποτελούνται από θεμελιώσεις σταθερής έδρασης που όπως επισημάνθηκε προηγουμένως στην Ελλάδα μια τέτοια μελέτη δεν ευδοκίμησε.

Έτσι στην παρούσα διπλωματική στόχος ήταν η εύρεση κατάλληλων θέσεων χωροθέτησης υπεράκτιων αιολικών πάρκων στον ελληνικό χώρο και συγκεκριμένα στην περιοχή του Νοτίου Αιγαίου στην Περιφερειακή ενότητα Ρόδου. Για να επιτευχθεί αυτό αξιοποιήθηκαν:

- Ελληνική νομοθεσία
- Βιβλιογραφικές αναφορές από εθνικά παραδείγματα και παραδείγματα του εξωτερικού
- Πρόγραμμα χαρτογραφίας ArcMap GIS
- Γεωχωρικά δεδομένα

Για την αξιοποίηση των παραπάνω δεδομένων καθορίστηκαν τα κριτήρια αποκλεισμού τα οποία σχετίζονται με οικονομικά-τεχνικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά ζητήματα, στοχεύουν στην όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού, τη μείωση του κόστους του και τον περιορισμό τυχόν περιβαλλοντικών συνεπειών και τα οποία ήταν:

- Βαθυμετρία
- Αιολικό δυναμικό
- Απόσταση από προστατευόμενες περιοχές
- Απόσταση από ακτοπλοϊκές γραμμές
- Απόσταση από την ακτογραμμή

Σε αυτό το σημείο είναι σκόπιμο να αναφερθεί ότι όσον αφορά της προστατευόμενες περιοχές σε άλλες μελέτες ενδεχομένως να χρησιμοποιούσαν σαν περιοριστικό παράγοντα και τις διαδρομές των αποδημητικών πτηνών στην Ελλάδα. Στην παρούσα εργασία δεν λήφθηκε υπόψη ο παράγοντας αυτός καθώς όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, πλέον στα αιολικά πάρκα μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης οι οποίες είτε αποπροσανατολίζουν τα πτηνά είτε σταματούν την λειτουργία του αιολικού πάρκου (αν και κάτι τέτοιο δεν ενδείκνυται) μόλις ανιχνεύσουν το σμήνος.

Αφού συλλέχθηκαν όλα τα δεδομένα και καθορίστηκαν οι ελάχιστες αποστάσεις προέκυψαν οι περιοχές χωροθέτησης.

Η βασικότερη δυσκολία που παρουσιάστηκε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας ήταν η εύρεση των γεωχωρικών δεδομένων που αφορούν το θαλάσσιο χώρο και επιπλέον η γενικότερη εύρεση βιβλιογραφικών αναφορών, καθώς το ζήτημα είναι αρκετά πρόσφατο. Το υπόβαθρο της βαθυμετρίας το οποίο να είναι σε αξιοποιήσιμη μορφή, βρέθηκε από την υδρογραφική υπηρεσία του πολεμικού ναυτικού το οποίο παλαιότερα ήταν επί πληρωμή. Όσον αφορά το υπόβαθρο του αιολικού δυναμικού, στο θαλάσσιο χώρο δεν βρέθηκε κάτι αντίστοιχο με αυτό της βαθυμετρίας, συνεπώς για τα αιολικά δεδομένα αξιοποιήθηκε η online υπηρεσία Wind Atlas που παρέχει αιολικά δεδομένα, τόσο σε ηπειρωτικό όσο και σε θαλάσσιο χώρο. Επιπλέον όσον αφορά τις ακτοπλοϊκές διαδρομές καθώς δεν βρέθηκε κάποιο σχετικό αρχείο πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της ψηφιοποίησης από το Open Street Map.

Ένα άλλο ζήτημα που προέκυψε ήταν η μετάφραση συγκεκριμένων λέξεων που αφορούν κυρίως στο τεχνικό κομμάτι της θεμελίωσης των ανεμογεννητριών, κάτι το οποίο ενδεχομένως συμβαίνει καθώς στην Ελλάδα δεν υπάρχουν ακόμα αντίστοιχες τεχνολογίες και συνεπώς δεν υπάρχει αντίστοιχα ελληνική ορολογία για να περιγράψει κάποια τμήματα.

Επιπλέον με αφορμή όλα τα παραπάνω, θα ήταν σκόπιμο σε μια μελλοντική έρευνα:

- Να καθοριστούν επιπλέον κριτήρια αξιολόγησης τα οποία είτε μέσω πολυκριτηριακής ανάλυσης (που διαφοροποιείται αναλόγως τον μελετητή), είτε μέσω ανάλυσης κόστους οφέλους θα αναδείξουν την βέλτιστη περιοχή χωροθέτησης από το σύνολο των περιοχών που φαίνονται να είναι ιδανικές.
- Να υπολογιστεί ο αριθμός και τύπος των ανεμογεννητριών που θα εγκατασταθούν στις ενδεδειγμένες περιοχές ή την βέλτιστη θέση εγκατάστασης και κατ' επέκταση ο υπολογισμός της εγκατεστημένης ισχύος και η συνεισφορά του αιολικού πάρκου στο ενεργειακό ισοζύγιο.
- Να πραγματοποιηθεί έρευνα όσον αφορά τους τύπους αγκύρωσης των πλωτών θεμελιώσεων στον πυθμένα της θάλασσας.
- Μια εκτενέστερη μελέτη όσον αφορά τα κριτήρια αποκλεισμού η οποία θα στοχεύσει στην απλούστευση των διαδικασιών χωροθέτησης και αδειοδότησης των υπεράκτιων αιολικών εγκαταστάσεων.

Βιβλιογραφία

- Βραχίμης, Μ., Ξωνίκης, Α., Παπιγκιώτης, Μ., (2010). Υπεράκτιες ανεμογεννήτριες ζητήματα διασύνδεσης τους στο δίκτυο. Μη εκδοθείσα Διπλωματική Εργασία. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (2021) *Necessary legislative adjustments to promote offshore wind energy in Greece. EEA Financial Mechanism 2014-2021.*
- Ελληνικό Ίδρυμα Ευρωπαϊκής & Εξωτερικής Πολιτικής (2021). Υπεράκτια αιολική ενέργεια στην Ελλάδα: κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις. Κείμενο Πολιτικής.
- Μαμάσης, Ν., Ευστρατιάδης, Α. (2018). Σημειώσεις Εισαγωγή στην Ενεργειακή Τεχνολογία Αιολική ενέργεια. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Μρνέλος, Γ. (n.d). Κεφάλαιο 1: Αιολική ενέργεια. Ειδικά κεφάλαια παραγωγής ενέργειας. Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας.
- Κανέλλας, Π. (2016). Μελέτη Εγκατάστασης Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου 240MW στον κόλπο της Αλεξανδρούπολης. Μη εκδοθείσα Διπλωματική Εργασία. Θεσσαλονίκη: Αριστέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Κρασανάκης, Ε. (2014). Τεχνική μελέτη και οικονομική αξιολόγηση σταθμού παραγωγής ενέργειας από μικρές ανεμογεννήτριες. Μη εκδοθείσα Διπλωματική Εργασία. Ηράκλειο: Τ.Ε.Ι Κρήτης.
- ΚΥΑ 49828 /2008 (Τεύχος ΦΕΚ Β' 2464): «Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας»
- Φυτίλης, Δ. (2012). Εκτίμηση αιολικού δυναμικού στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο και προτάσεις για υπεράκτια αιολικά πάρκα. Μη εκδοθείσα Διπλωματική Εργασία. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Τσιρόπουλος, Α. (2018). Χωροθέτηση υπεράκτιου αιολικού πάρκου στις Κυκλάδες με τη χρήση της μεθόδου VIKOR. Μη εκδοθείσα Διπλωματική Εργασία. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Alchetron (2018). Διαθέσιμο σε: <https://alchetron.com/Vindeby-Offshore-Wind-Farm> [πρόσβαση 22/05/2022].
- Argin, M., & Yerci, V. (2015). The Assessment of Offshore Wind Power Potential of Turkey. DOI: 10.1109/ELECO.2015.7394519.
- Bañuelos-García, F., Ring, M., Mendoza, E., & Silva, R. (2021). A design procedure for anchors of floating ocean current turbines on weak rock. *Energies*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/en14217347>.
- Chandrasekaran, S (2021). *Recent advancements in materials and offshore platforms*, Chapter 4. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823537-9.00005-0>.
- Energy efficiency and renewable energy (n.d). *Advantages and Challenges of Wind Energy*. Διαθέσιμο σε: <https://www.energy.gov/eere/wind/advantages-and-challenges-wind-energy> [πρόσβαση 22/05/2022].

- Dehghanimadvar, M., Ahmadi, F., Shirmohammadi, R., Aslani, A. (2019). Forecasting of wind energy technology domains based on the technology life cycle approach. *Energy Reports*. 5. 1236-1248. DOI: 10.1016/j.egy.2019.08.069.
- Du, A. (2021). Semi-Submersible, spar and tlp - how to select floating wind foundation types?. Διαθέσιμο σε: <https://www.empireengineering.co.uk/semi-submersible-spar-and-tlp-floating-wind-foundations/> [πρόσβαση 22/05/2022].
- Foundations of Offshore Wind Turbines (2020) Recommendation for planning and designing foundations of offshore wind turbines. Le Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique.
- Fernández-Guillamón, A., Das, K., Cutululis, N. A., & Molina-García, Á. (2019). Offshore wind power integration into future power systems: Overview and trends. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(11). <https://doi.org/10.3390/jmse7110399>.
- Gill, J. (2021). The Parts of a Wind Turbine: Major Components Explained. *Energy Follower*. Διαθέσιμο σε: <https://energyfollower.com/parts-of-a-wind-turbine/> [πρόσβαση 22/05/2022].
- Gomes, P.S, (2014). Offshore foundations: technologies, design and application. Μη εκδοθείσα Διπλωματική Εργασία. Λισαβόνα: Instituto Superior Técnico.
- Hau, E. (2013). *Wind turbines: Fundamentals, technologies, application, economics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-27151-9>.
- Head, M., Seo, J., Shokouhian, M., Schaffer, W., & Researcher, P. (n.d). Foundation Anchorages for Offshore Wind Turbines in Deep Water Using Composite Materials MOWER 14-01: <https://www.researchgate.net/publication/311442219>.
- Iberdola (n.d). How are offshore wind turbines anchored at sea? Διαθέσιμο σε: <https://www.iberdrola.com/sustainability/offshore-wind-turbines-foundations> [πρόσβαση 22/05/2022].
- IRENA (2016), *Floating Foundations: a Game Changer for Offshore Wind Power*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- Just Energy. Wind Energy: Pros and Cons Διαθέσιμο σε: <https://justenergy.com/blog/wind-energy-pros-and-cons/> [πρόσβαση 22/05/2022].
- Kalmikov, A. (2017) *Wind Power Fundamentals*. *Wind energy engineering*. DOI: 10.1016/B978-0-12-809451-8.00002-3.
- Keene, M. (2021). Comparing offshore wind turbine foundations. *Windpower Engineering & Development*. Διαθέσιμο σε: <https://www.windpowerengineering.com/comparing-offshore-wind-turbine-foundations/> [πρόσβαση 22/05/2022].
- Kim, T., Park, J., & Maeng, J. (2016). Offshore wind farm site selection study around Jeju Island, South Korea. In *Renewable Energy*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.083>.
- Lombardi, D. (2010). *Dynamics of offshore wind turbines*. Μη εκδοθείσα Διπλωματική Εργασία. Bristol: University of Bristol.

- Mordor Intelligence (n.d). Greece wind energy market-growth,trends, covid-19 impact and forecasts (2-22-2027). Διαθέσιμο σε: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/greece-wind-energy-market> [πρόσβαση 22/05/2022].
- Orsted. Our energy infrastructure: from wind farm to Grid. Διαθέσιμο σε: <https://orsted.co.uk/energy-solutions/offshore-wind/how-we-work-onshore> [πρόσβαση 22/05/2022].
- Reza, A., & Sedighi, H. M. (2015). Nonlinear vertical vibration of tension leg platforms with homotopy analysis method. *Advances in Applied Mathematics and Mechanics*, 357–368. <https://doi.org/10.4208/aamm.2013.m314>.
- Rodrigues, S., Restrepo, C., Katsouris, G., Pinto, R. T., Soleimanzadeh, M., Bosman, P., & Bauer, P. (2016). A multi-objective optimization framework for offshore wind farm layouts and electric infrastructures. *Energies*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/en9030216>.
- Stefanakou, A., & Nikitakos, N. (2016). A decision support model for site selection of offshore wind farms. 9th International Scientific Conference on Energy and Climate Change. Athens.
- Sourianos, E., Kyriakou, K., Hatiris, G. A., (2017). GIS-based spatial decision support system for the optimum siting of offshore windfarms. E.W Publications. Διαθέσιμο σε: <https://www.researchgate.net/publication/327209024>.
- Todd, F. (2019). Anatomy of a wind turbine: Analysing the key components involved. N.S Energy. Διαθέσιμο σε: <https://www.nsenerybusiness.com/features/wind-turbine-components/> [πρόσβαση 22/05/2022].
- The University of Western Ontario (n.d). Understanding Coefficient of Power (Cp) and Betz Limit. Διαθέσιμο σε: <https://www.scribd.com/document/118129923/Betz-Limit>. [πρόσβαση 22/05/2022].
- Tong, W. (2010). Fundamentals of wind energy: Chapter 1. WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering, 44, 1755–8336. <https://doi.org/10.2495/978-1-84564-205-1>.
- University of Strathclyde Glasgow (2015). Optimizing the installation phase of wind turbines in deep water. Διαθέσιμο σε: https://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/15-16/Floating_Windfarm_Installation/advantages-disadvantages.html [πρόσβαση 22/05/2022].
- Vagiona, D., Kamilakis, M. (2018). Sustainable Site Selection for Offshore Wind Farms in the South Aegean—Greece. MDPI. Διαθέσιμο σε: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/3/749> [πρόσβαση 22/05/2022].
- Vagiona, D. G., & Karanikolas, N. M. (2012). A multicriteria approach to evaluate offshore wind farms siting in Greece. *Global NEST Journal*.
- WindEurope, (2021). Wind energy in Europe: Scenarios for 2030. Διαθέσιμο σε: <https://www.anev.org/wp-content/uploads/2022/02/220222-Stats-Outlook.pdf> [πρόσβαση 22/05/2022].