



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΚΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Μιχάλης Αβραμόπουλος

Επιβλέπων: Σταμούλης Γεώργιος

Σεπτέμβριος 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

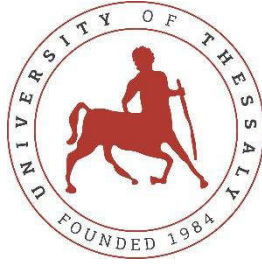
ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΚΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Μιχάλης Αβραμόπουλος

Επιβλέπων: Σταμούλης Γεώργιος

Σεπτέμβριος 2022



UNIVERSITY OF THESSALY
SCHOOL OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER
ENGINEERING

Study of Wind Farms

Diploma Thesis

Mixalis Avramopoulos

Supervisor: Stamoulis Georgios

September 2022

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων/πouσα **Σταμούλης Γεώργιος**

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος **Βόκας Γεώργιος**

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Μέλος **Δασκαλοπούλου Ασπασία**

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ και ΣΧΟΛΙΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας , στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών κατά το έτος 2022.

Η πραγματοποίηση και η ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την υποστήριξη του επιβλέποντα καθηγητή μου , κύριου Σταμούλη Γεώργιου στον οποίο εκφράζω θερμά τις ευχαριστίες και την ευγνωμοσύνη μου για όλη την βοήθεια που μου πρόσφερε .

Επίσης οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον καθηγητή κύριο Βόκα Γεώργιο για την βοήθεια του , τις συμβουλές του και την άψογη συνεργασία μας ,καθώς και για τον πολύτιμο χρόνο που μου διέθεσε για να μου παρέχει σημαντικές εξηγήσεις επί του θέματος οι οποίες ήταν πολύτιμες για την επίτευξη αυτής της εργασίας.

Τέλος ευχαριστώ την οικογένεια μου για την στήριξη τους καθ' όλη της διάρκεια της ζωής μου.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο Δηλών

Μιχάλης Αβραμόπουλος

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this diploma thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Mixalis Avramopoulos

ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΚΟΥ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Μιχάλης Αβραμόπουλος

Περίληψη

Ο αέρας χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο για την παραγωγή ενέργειας από αρχαιοτάτων χρόνων. Οι πρώτοι ανεμόμυλοι που βοήθησαν τον άνθρωπο στις καθημερινές του εργασίες εμφανίστηκαν εδώ και 3000 χρόνια περίπου. Τα τελευταία χρόνια με τη εξέλιξη της τεχνολογίας έχει καταστεί εφικτή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον αέρα με την χρήση ανεμογεννητριών . Η εξέλιξη αυτή προέκυψε σε αρκετές περιπτώσεις με κρατική χρηματοδότηση. Στις μέρες μας με την αυξανόμενη χρήση ηλεκτρικών αυτοκινήτων οι ανάγκες σε ενέργεια ολοένα και αυξάνονται. Για τον λόγο αυτό οι επενδύσεις σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας(ΑΠΕ) έχουν αυξηθεί ραγδαία και στην χώρα μας με την δημιουργία αιολικών πάρκων.

Λέξεις-κλειδιά:

ΑΠΕ, αυξημένες ανάγκες ενέργειας. Αιολικά πάρκα

Diploma Thesis

Study of wind farms

Mixalis Avramopoulos

Abstract

Air has been used by humans for energy production since ancient times. The first windmills that helped man in his daily tasks appeared about 3000 years ago. In recent years, with the development of technology, it has become possible to generate electricity from the air using wind turbines. This development has come about in several cases with government funding. Nowadays with the increasing use of electric cars the need for energy is increasing. For this reason, investments in Renewable Energy Sources (RES) have increased rapidly in our country with the creation of wind farms.

Keywords:

RES, Increased needs for energy, wind farms

"Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.Σφάλμα! Χρησιμοποιήστε την καρτέλα "Κεντρική σελίδα", για να εφαρμόσετε το Heading 1 στο κείμενο που θέλετε να εμφανίζεται εδώ.

Πίνακας περιεχομένων

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2.3	Θεμελίωση από σκυρόδεμα με βίδες αγκύρωσης και φλάντζα	18
Εικόνα 2.4	Βίδες συγκράτησης για μια ανεμογεννήτρια	18
Εικόνα 2.5	Τυπική κατασκευή από σκυρόδεμα	20
Εικόνα 2.6	Ανεμογεννήτρια υβριδικού πύργου	21
Εικόνα 2.7	Ανεμογεννήτρια με στύλο	22
Εικόνα 2.8	Τύποι θεμελίωσης ανεμογεννητριών	23
Εικόνα 2.9	Θεμελιώσεις μανδύα κάδου αναρρόφησης	24
Εικόνα 2.10	Τρίποδες για θεμελίωση ανεμογεννητριών	25

Κατάλογος σχημάτων

Κατάλογος πινάκων

	Πίνακας 1. Κριτήρια αποκλεισμού και ζώνες ασυμβατότητας	42
	Πίνακας 2 Κλιμάκωση του AC.	50
	Πίνακας 3 Βασικά χαρακτηριστικά των 16 OWF	56
58	Πίνακας 4 Κόστος επένδυσης και χαρακτηριστικά των ΟΤΔ σε σχέση με το ΑΚ	
	Πίνακας 5 Στρατηγική αξία των έργων χαρτοφυλακίου.	59

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Καθώς οι ανησυχίες για τη διαθεσιμότητα των πόρων, τις τιμές της ενέργειας, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού συνεχίζουν να αυξάνονται, η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές αποκτά ύψιστη σημασία για τη διατήρηση των σημερινών ενεργειακών απαιτήσεων και την κάλυψη των μελλοντικών απαιτήσεων. Η αιολική ενέργεια έχει επικρατήσει ως η πιο οικονομικά αποδοτική πηγή παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας. Εντός των Ηνωμένων Πολιτειών, η παραγωγή ενέργειας από αιολική ενέργεια στοχεύει στο 20% της συνολικής αγοράς ενέργειας μέχρι το 2030 (USDOE, 2008). Καθώς οι ανεμογεννήτριες φτάνουν ψηλότερα στην ατμόσφαιρα, οι διάμετροι των λεπίδων αυξάνονται και τα αιολικά πάρκα μπορούν να επεκταθούν σε μήκος άνω των 20 χιλιομέτρων. Η κατανόηση της δυναμικής της ροής που επιβάλλεται από το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα (ABL) και τις τοπικές αλληλεπιδράσεις των πτερυγίων των ανεμογεννητριών αποτελεί βασικό μέρος του σχεδιασμού και της βελτιστοποίησης των αιολικών πάρκων. Τα απόνερα της τουρμπίνας όχι μόνο μειώνουν τη μέση ταχύτητα ελάχιστα με αποτέλεσμα απώλειες στην παραγωγή ενέργειας, αλλά αυξάνουν επίσης τις διακυμάνσεις, γεγονός που οδηγεί σε δομική κόπωση.

Σκοπός της παρούσας διατριβής είναι να επιδείξει μια ενδελεχή επισκόπηση της προόδου στους σχετικούς τομείς μέσω μιας βιβλιογραφικής ανασκόπησης που περιλαμβάνει τόσο τη δομή των ανεμογεννητριών όσο και το σχήμα των αιολικών πάρκων.

Η αιολική ενέργεια έχει μια πλούσια ιστορία που ξεκίνησε με την τροφοδοσία των πανιών των πλοίων και εξελίχθηκε στη σημερινή της κυριαρχία στη βιομηχανία αιολικής ενέργειας. Τα πρώτα αναγνωρίσιμα συστήματα μετατροπής της αιολικής ενέργειας αναπτύχθηκαν τον δέκατο πέμπτο αιώνα για την άλεση και το άλεσμα των σιτηρών. Αυτοί οι πρώιμοι ανεμόμυλοι είδαν βελτιώσεις τόσο προηγμένες όσο και περιστρεφόμενα πτερύγια.

Τον δέκατο όγδοο αιώνα, οι Ολλανδοί άποικοι έφεραν τον εμβληματικό ανεμιστήρα ανέμου στις Ηνωμένες Πολιτείες, όπου χρησιμοποιήθηκε για την άντληση νερού σε ράντζα. Στις αρχές του εικοστού αιώνα, οι ανεμογεννήτριες άρχισαν να χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας- ωστόσο, μόνο κατά την πετρελαϊκή κρίση του 1970 οι ανεμόμυλοι άρχισαν να γίνονται δημοφιλείς ως υποκατάστατο της ενέργειας που βασίζεται στο πετρέλαιο. .

Σήμερα, η υπερθέρμανση του πλανήτη είναι το κύριο κίνητρο που τροφοδοτεί την ανάπτυξη και την εφαρμογή της αιολικής ενέργειας (Leishman, 2006).

Η ταχεία ανάπτυξη της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών κατέστησε αναγκαία την ανάγκη για ακριβέστερη ανάλυση. Παραδοσιακά η ανάλυση αυτή δανείστηκε και τροποποιήθηκε από την ανάλυση που χρησιμοποιείται για την αεροδυναμική ελικοπτέρων, επειδή υπάρχουν αρκετές ομοιότητες μεταξύ της λειτουργίας των πτερυγίων ελικοπτέρων και των πτερυγίων ανεμογεννητριών. Αυτές οι ομοιότητες επέτρεψαν την πρόβλεψη και κατανόηση των ασταθών φορτίων πτερυγίων-αέρα και της απόδοσης της ανεμογεννήτριας σε προσκολλημένη και ακινητοποιημένη ροή. Έχουν επίσης επιτρέψει την πρόβλεψη των δομικών φορτίων και της αεροελαστικής απόκρισης των περιστρεφόμενων πτερυγίων. Ωστόσο, η εφαρμογή της αεροδυναμικής των ελικοπτέρων στην αεροδυναμική των ανεμογεννητριών είναι περιορισμένη. Για παράδειγμα, υπάρχουν πολλές ατμοσφαιρικές συνθήκες τις οποίες βιώνουν οι ανεμογεννήτριες, τις οποίες δεν βιώνουν τα ελικόπτερα.

Οι συνθήκες αυτές περιλαμβάνουν τα φαινόμενα του οριακού στρώματος εδάφους, την ατμοσφαιρική τύρβη, τις μεγάλες τυρβώδεις δίνες, τις χρονικές και χωρικές μεταβολές στη διάτμηση του ανέμου, τη θερμική συναγωγή και τη διαστρωμάτωση. Υπάρχουν επίσης αφύσικες συνθήκες μοναδικές για τις ανεμογεννήτριες. Σε αυτές περιλαμβάνονται τα ασταθή φαινόμενα από τη σκιά του πύργου και τα φαινόμενα από ανάντη πύργους.

Πολλά έχουν διδαχθεί από τη μελέτη της αεροδυναμικής των ελικοπτέρων. Η κύρια μέθοδος ανάλυσης που έχει δανειστεί είναι η θεωρία της ορμής των στοιχείων πτερυγίου (BEM) με την προσθήκη μοντέλων εισροής (Leishman, 2006). Η μέθοδος αυτή υπήρξε πολύ χρήσιμη.

Ωστόσο, με την πρόοδο της υπολογιστικής ισχύος, η υπολογιστική δυναμική ρευστών (CFD) γίνεται μια πιο δημοφιλής μέθοδος ανάλυσης (McGowan, 2000).

Ένα καταναμημένο ενεργειακό μείγμα στην οικονομία είναι επιθυμητό. Εάν το κόστος των ορυκτών καυσίμων συνεχίσει να αυξάνεται στο μέλλον, όπως συνέβη στο παρελθόν, η οικονομική υπόθεση για τα πάρκα γίνεται ισχυρότερη, αλλά εάν η αποθήκευση ενέργειας σε κλίμακα δικτύου καταστεί αναγκαία για την εξομάλυνση της διαλείπουσας ενέργειας από τον άνεμο, το κόστος αυξάνεται και πάλι. Είναι ενδιαφέρον ότι τα ηλεκτρικά οχήματα, αν γίνουν ο κανόνας, θα μπορούσαν να λύσουν εν μέρει αυτό το πρόβλημα. Κατά μέσο όρο ένα ιδιωτικό αυτοκίνητο χρησιμοποιείται λιγότερο από το 4% της ημέρας- το υπόλοιπο της ημέρας είναι διαθέσιμο για φόρτιση. Η εισαγωγή έξυπνης φόρτισης των μπαταριών που αντλεί ενέργεια όταν υπάρχει πλεονάζουσα παραγωγική ικανότητα μετατρέπει το ίδιο το δίκτυο σε εικονική συσκευή αποθήκευσης.

Τα στοιχεία δείχνουν ότι τα αιολικά πάρκα μπορούν να συνεισφέρουν στις εθνικές ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά είναι πιθανό να παραμείνουν μικρά. Η εισβολή που προκαλούν τα πάρκα σε κλίμακα που θα μπορούσε να παρέχει, ας πούμε, τη μισή εθνική

ενέργεια φαίνεται να παρουσιάζει πολύ μεγάλα προβλήματα. Προς το παρόν, η κυρίαρχη πηγή ενέργειας εξακολουθεί να είναι τα ορυκτά καύσιμα. Τα αιολικά πάρκα μπορούν να προσφέρουν μια, ίσως πρόσκαιρη, συμβολή, ενώ παράλληλα προσπαθούμε να βρούμε άλλους τρόπους για να δημιουργήσουμε μια προσφορά καθαρής ενέργειας και να διαχειριστούμε αποτελεσματικότερα τη ζήτηση. Στην παρούσα εργασία δίνεται ένα παράδειγμα οικονομοτεχνικής μελέτης με την βοήθεια του λογισμικού Retscreen.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

Το μοντέλο Blade Element Momentum (BEM) είναι η πιο θεμελιώδης μέθοδος για την ανάλυση ανεμογεννητριών. Αναπτύχθηκε αρχικά από τον Glauert το 1935 για την ανάλυση ελίκων αεροπλάνων και είναι μια μονοδιάστατη προσέγγιση που μοντελοποιεί την ώση ως συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου (Glauert, 1935). Η κύρια λειτουργία του μοντέλου BEM είναι ο προσδιορισμός των συνθηκών για τη μέγιστη μετατροπή ενέργειας (Leishman, 2006). Υπάρχουν διάφορες παραδοχές που είναι απαραίτητες για να είναι έγκυρη η μέθοδος BEM. Αυτές περιλαμβάνουν μια τριβή χωρίς τριβές, ασυμπίεστη, σταθερή ροή χωρίς συνιστώσα ταχύτητας περιστροφής. Ο ρότορας μοντελοποιείται ως διαπερατός δίσκος και δεν υπάρχουν εξωτερικές δυνάμεις που δρουν στο ρευστό ανάντη ή κατόντη του ρότορα. Η οπισθέλκουσα λαμβάνεται με τη μοντελοποίηση μιας πτώσης πίεσης πάνω από τον ρότορα (Hansen, 2008).

Ο άνεμος δεν είναι μια νέα ορολογία για τον άνθρωπο. Η ανθρωπότητα έχει χρησιμοποιήσει τον άνεμο που μπορεί να εντοπιστεί πίσω στα 3000 χρόνια. Σε παλαιότερες εποχές, οι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν τον άνεμο κυρίως για γεωργικούς, αρδευτικούς και ναυτιλιακούς σκοπούς, ωστόσο, τα ορυκτά καύσιμα ήταν η κύρια πηγή παραγωγής ενέργειας. Τον 19ο αιώνα, η εμπορική εξερεύνηση μετατοπίστηκε από τον άνθρακα στο πετρέλαιο. Ο άνθρακας και το φυσικό αέριο εξακολουθούν να θεωρούνται η πιο συνηθισμένη και φθηνότερη μορφή παραγωγής ενέργειας στον άνεμο. Πολλοί επιστήμονες και ερευνητές θεωρούν τον άνεμο ως δυνητική πηγή για την κάλυψη των μελλοντικών αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι βλαβερές συνέπειες που προκαλούνται από την καύση ορυκτών καυσίμων ξεκίνησαν την ανάγκη για εναλλακτικές πηγές παραγωγής ενέργειας. Η κοινωνική και οικολογική-περιβαλλοντική συνείδηση εξαπλώθηκε σε πολλές χώρες απαιτώντας νέα αξιόπιστη και καθαρή πηγή ενέργειας. Αυτή ήταν η αρχή της έρευνας και της ανάπτυξης στον κλάδο της αιολικής ενέργειας που συνεχίζει να ακμάζει μέχρι σήμερα. Η αιολική ενέργεια, είναι μια εναλλακτική πηγή σε σχέση με τον άνθρακα, το πετρέλαιο και την πυρηνική ενέργεια, η οποία είναι πιο άφθονη, ανανεώσιμη, ευρέως διανεμημένη και έχει λιγότερες βλαβερές συνέπειες για το περιβάλλον.

Ο άνεμος είναι το αποτέλεσμα της κλίσης της πίεσης του αέρα. Δημιουργείται λόγω των αλλαγών στη θερμοκρασία των διαφόρων περιοχών. Η ξηρά και η θάλασσα έχουν διαφορετική σύνθεση που τους προσδίδει μοναδικά χαρακτηριστικά θερμοκρασίας. Γενικά, στη θάλασσα υπάρχει περισσότερος άνεμος σε σύγκριση με την ξηρά. Η ανεμογεννήτρια είναι μια μηχανή που αξιοποιεί την αιολική ενέργεια και τη μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο άνεμος τροφοδοτεί τον μηχανικά κινούμενο άξονα που περιστρέφεται και παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από τη διαθέσιμη ταχύτητα του ανέμου. Η ταχύτητα του ανέμου ποικίλλει πολύ σημαντικά σε κάθε ώρα της ημέρας, αλλά η μέση ταχύτητα του ανέμου παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια κάθε ημέρας. Αυτή η μέση ταχύτητα ανέμου χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς απόδοσης και ισχύος εξόδου. Ως εκ τούτου, οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται πάντα σε συνδυασμό με κάποια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας για τη σταθεροποίηση της παραγωγής (Wikipedia).

1.1 Χερσαίες ανεμογεννήτριες

Οι χερσαίες ανεμογεννήτριες αναφέρονται στις ανεμογεννήτριες που κατασκευάζονται και βρίσκονται σε εδάφη. Η κατασκευή τους είναι φθηνότερη και αποτελούν μια από τις πιο προσιτές ανανεώσιμες πηγές παραγωγής ενέργειας. Συχνά επικρίνονται για το πρόβλημα της οπτικής τους εξασθένησης. Έχουν το μισό κόστος ενέργειας ανά kWh από την υπεράκτια αιολική ενέργεια και το ένα τέταρτο του κόστους των ηλιακών συλλεκτών. Η χερσαία αιολική βιομηχανία κυριαρχεί κυρίως στην Ευρώπη. Η Κίνα, οι ΗΠΑ, η Γερμανία και η Ινδία είναι οι χώρες με την υψηλότερη συνεισφορά με συνολική σωρευτική δυναμικότητα 540 GW τον Δεκέμβριο του 2017. Οι ΗΠΑ και η Κίνα έχουν διαθέσει μεγάλη έρευνα και χρηματοδότηση στη χερσαία αιολική βιομηχανία. Αυτή η ανάπτυξη και το ενδιαφέρον για τη χερσαία αιολική βιομηχανία ήταν πολύ ενθαρρυντικά τα προηγούμενα χρόνια, γεγονός που οδήγησε στην προηγμένη και εξελιγμένη υπεράκτια αιολική βιομηχανία.

Ως αποτέλεσμα της εμφάνισης της υπεράκτιας αιολικής βιομηχανίας, παρατηρήθηκε συνολική μείωση της προσθήκης χερσαίας αιολικής ισχύος στο 10% το 2017 (IEA, GWEC). Η θεμελίωση για τις χερσαίες ανεμογεννήτριες χύνεται επί τόπου, ενώ ο πύργος, τα πτερύγια και άλλα μηχανήματα προκατασκευάζονται και μεταφέρονται επί τόπου.

Η μεταφορά των χερσαίων ανεμογεννητριών είναι σχετικά ευκολότερη από ό,τι των υπεράκτιων ανεμογεννητριών, ωστόσο, προϋποθέτει σημαντικό προηγούμενο σχεδιασμό και συζητήσεις με εταιρείες logistics και κυβερνητικούς φορείς.

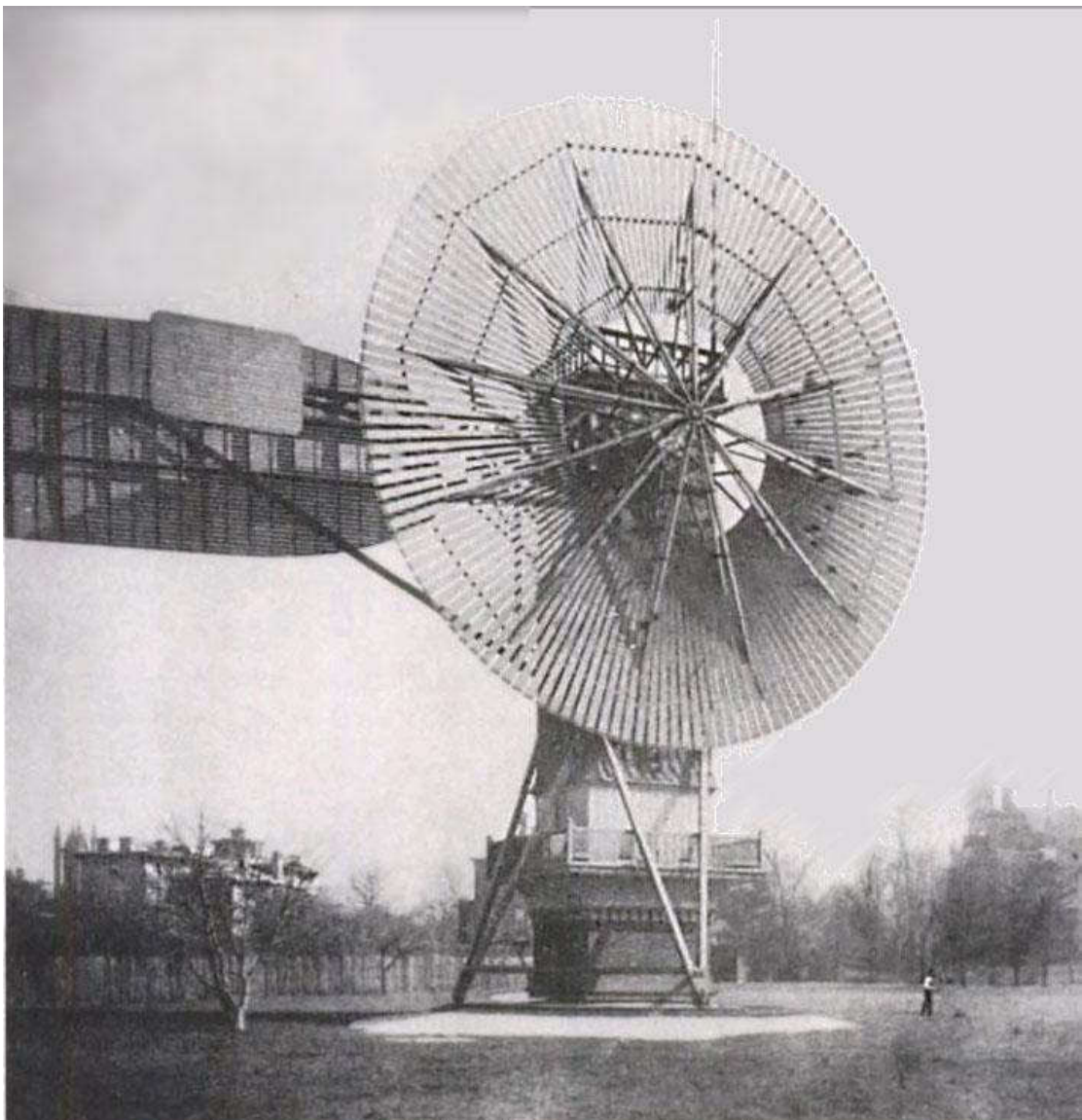
1.2 Υπεράκτιες ανεμογεννήτριες

Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες αναφέρονται στις ανεμογεννήτριες που κατασκευάζονται στη θάλασσα ή στους ωκεανούς. Διατίθενται υψηλότερες ταχύτητες ανέμου και, ως εκ τούτου, οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι σε θέση να παράγουν περισσότερη ενέργεια. Μέχρι το τέλος του 2017, η σωρευτική δυναμικότητα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας ήταν 18,8 GW. Όλα τα μεγαλύτερα υπεράκτια αιολικά πάρκα βρίσκονται σήμερα σε χώρες της βόρειας Ευρώπης. Το Ηνωμένο Βασίλειο ηγείται της υπεράκτιας αιολικής βιομηχανίας, ενώ η Γερμανία και οι ΗΠΑ συμβάλλουν επίσης σημαντικά στην υπεράκτια αιολική ενέργεια. Το αιολικό πάρκο Walney είναι το μεγαλύτερο υπεράκτιο αιολικό πάρκο που κατασκευάστηκε στη θάλασσα της Ιρλανδίας, στο Ηνωμένο Βασίλειο. Κατασκευάζεται σε 3 φάσεις με 189 ανεμογεννήτριες ικανές να παράγουν 659 MW για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε 600.000 σπίτια στο Ηνωμένο Βασίλειο. Η General Electric έχει αναπτύξει υπεράκτια ανεμογεννήτρια 12 MW, η οποία είναι η μεγαλύτερη υπεράκτια ανεμογεννήτρια στον κόσμο, η οποία θα λειτουργήσει το 2019. Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι ακριβές στην κατασκευή τους και απαιτούν πολύ βαριά και ειδικά μέσα μεταφοράς. Οι εξελίξεις των τελευταίων ετών στην υπεράκτια αιολική τεχνολογία έχουν μειώσει τις συνολικές δαπάνες και τα υπεράκτια αιολικά πάρκα αποτελούν πλέον μια ανταγωνιστική πηγή ενέργειας στην Ευρώπη.

1.3 Ιστορία των ανεμογεννητριών

Εδώ και χιλιάδες χρόνια, οι άνθρωποι χρησιμοποιούν τον άνεμο ως πηγή για άρδευση, άντληση νερού και ναυσιπλοΐα. Οι άνθρωποι χρησιμοποιούσαν την αιολική ενέργεια για να κινούν τις βάρκες κατά μήκος του ποταμού Νείλου, κάτι που μπορεί να ανιχνευθεί 5000 χρόνια πριν από σήμερα. Μέχρι το 200 π.Χ., οι άνθρωποι στην Περσία και την Κίνα χρησιμοποιούσαν ξύλινους αιολικούς νερόμυλους για την άντληση νερού και την άλεση σιτηρών. Αυτοί οι ανεμόμυλοι ήταν μικρής κλίμακας και χρησιμοποιούνταν κυρίως για απομακρυσμένες περιοχές και μικροέργα. Όταν κατασκευάστηκαν γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η τάση και η χρήση των μικρών ανεμόμυλων άρχισε να μειώνεται και παρέμεινε περιορισμένη στις αγροτικές περιοχές. Νέοι τρόποι χρήσης της αιολικής ενέργειας

ως αξιόπιστης και εμπορικής πηγής ενέργειας ξεκίνησαν γύρω στη δεκαετία του 1990. Το 1903, οι αδελφοί Ράιτ ανακάλυψαν με επιτυχία το πρώτο αεροπλάνο. Η ιδέα των εμπορικών χερσαίων ανεμογεννητριών προήλθε από την εφεύρεση του αεροπλάνου. Οι επιστήμονες και οι ερευνητές κατάφεραν να υιοθετήσουν την τεχνολογία της προπέλας και των φτερών του αεροπλάνου στη χερσαία αιολική ενέργεια (Καλδέλλης, Ζαφειράκης,2011). Η πρώτη ανεμογεννήτρια που κατασκευάστηκε ποτέ κατασκευάστηκε από τον Αμερικανό επιστήμονα Charles Brush το 1888. Ωστόσο, η εμπορική παραγωγή ανεμογεννητριών άρχισε γύρω στη δεκαετία του 1990. Αρχικά, λόγω της μικρότερης ανάπτυξης και της έλλειψης εξελιγμένης τεχνολογίας κατασκευής, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας περιοριζόταν μόνο στις χερσαίες ανεμογεννήτριες. Η τεχνολογία των υπεράκτιων ανεμογεννητριών εξελίχθηκε από την ήδη αναπτυγμένη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου. Πολλές από τις σύγχρονες δομές των υπεράκτιων ανεμογεννητριών έχουν ληφθεί από τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου, όπως οι δομές jacket, tripile και tripod. Το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο κατασκευάστηκε στη Δανία το 1991. Ονομάστηκε Vindeby και λειτούργησε 1,5 έως 3 χλμ. από τις νότιες δανικές ακτές. Διέθετε 11 ανεμογεννήτριες ισχύος 450 kW η καθεμία, ικανές να παράγουν 4,95 MW. Το Vindeby παράγαγε 243 GWh ηλεκτρικής ενέργειας στα 26 χρόνια ζωής του. Η Dong Energy τις απέσυρε τον Φεβρουάριο του 2016 (Weston,2017).



Εικόνα 1.1 - Ο πρώτος ανεμόμυλος που κατασκευάστηκε από τον Charles Brush το 1888(Kaldellis, Zafeirakis, 2011)



Εικόνα 1.2 - Vindeby (το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο στον κόσμο) (Weston, 2017)



Εικόνα 1.3 - Αιολικός μύλος αντλίας νερού στη Νότια Ντακότα, ΗΠΑ (Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Windmill&oldid=867607700>.)

1.4 Αιολική ενέργεια

Το μέτρο της διαθέσιμης ενέργειας σε οποιαδήποτε τοποθεσία ονομάζεται Ισχύς του ανέμου. Η ισχύς που περιέχεται σε έναν άνεμο είναι "P" και η ισχύς που μπορεί να εξαχθεί από την εισερχόμενη ισχύ του ανέμου "Pa" η ισχύς μπορεί να υπολογιστεί από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$P = \rho A P_a = \rho A$$

P = Ισχύς που περιέχεται στον άνεμο (Watt)

ρ = Πυκνότητα αέρα - ποικίλλει ανάλογα με τη θερμοκρασία και το υψόμετρο

A = επιφάνεια σάρωσης του δρομέα (m²)

v = ταχύτητα ανέμου (m/s)

P_a = Ισχύς που μπορεί να εξαχθεί από μια ανεμογεννήτρια (Watt)

C_p = Συντελεστής ισχύος λόγω απωλειών

Ο συντελεστής ισχύος (C_p) είναι το μέτρο της απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας. Ο συντελεστής ισχύος μετράται και παρέχεται από τους κατασκευαστές των ανεμογεννητριών σε σχέση με διάφορες ταχύτητες ανέμου. Γενικά, περιλαμβάνει όλες τις συνδυασμένες απώλειες, συμπεριλαμβανομένων των απωλειών των μηχανικών εξαρτημάτων, των αεροδυναμικών και των ηλεκτρικών απωλειών. Ο Γερμανός φυσικός Albert Betz κατέληξε το 1919 στο συμπέρασμα ότι καμία ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να μετατρέψει περισσότερο από το 59,3% της κινητικής ενέργειας του ανέμου, το οποίο ονομάζεται νόμος του Betz. Σημειώνεται επίσης ότι το όριο Betz είναι στην πραγματικότητα η θεωρητική μέγιστη τιμή που δεν μπορεί να λειτουργήσει καμία πρακτική ανεμογεννήτρια. Πρακτικά, η τιμή αυτή είναι περίπου 35% έως 40% (συντελεστής ισχύος ανεμογεννήτριας).

Παράδειγμα: με τις ακόλουθες παραμέτρους: Πόση ισχύς μπορεί να εξαχθεί από μια ανεμογεννήτρια με τις ακόλουθες παραμέτρους.

Μήκος λεπίδας = 52 m

Ταχύτητα ανέμου = 12 m/s

Πυκνότητα αέρα = 1,23 kg /m³

Συντελεστής ισχύος = 0,4

Εμβαδόν σάρωσης του δρομέα = $A = \pi r^2$

$$A = \pi \times (52)^2 = 8495 \text{ m}^2$$

Ισχύς στον άνεμο = $P = 0,5 \times 1,23 \times 8495 \times (12)^3 = 9,02 \text{ MW}$

Παραγόμενη ισχύς = $P_a = 0,4 \times 9,02 = 3,6 \text{ MW}$

Ονομαστική ισχύς 3,6 MW σημαίνει ότι μια ανεμογεννήτρια μπορεί να παράγει 3,6 MW ανά ώρα με τη διαθεσιμότητα της βέλτιστης ταχύτητας ανέμου για 1 ώρα συνεχώς.

Ο Συντελεστής Ισχύος ενός αιολικού πάρκου είναι ο λόγος της πραγματικής παραγωγής του κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου προς τη μέγιστη παραγωγή του. Ονομάζεται επίσης συντελεστής φορτίου στη βιομηχανία αιολικής ενέργειας. Περιγράφει πόσο λειτουργούν οι γεννήτριες. Μπορεί να κυμαίνεται από 0 έως 100%. Συνήθως ο υψηλότερος συντελεστής δυναμικότητας έχει μεγαλύτερες αποδόσεις, αλλά θα είναι πιο ακριβός. Για υψηλότερους συντελεστές ισχύος, η μέση μείωση της παραγωγής ενέργειας θα είναι μεγαλύτερη και ως εκ τούτου η σχέση κόστους προς απόδοση δεν θα είναι οικονομική. Για ολόκληρη τη διάρκεια ζωής μιας ανεμογεννήτριας, ο συντελεστής ισχύος καθίσταται ασήμαντος. Σύμφωνα με την ΕΙΑ, ο συντελεστής δυναμικότητας της τάξης του 40% θεωρείται καλός και οικονομικός στην αιολική βιομηχανία.

Παράδειγμα: παράγει 44.000 MWh ηλεκτρικής ενέργειας σε 1 έτος. Ο συντελεστής δυναμικότητας αυτού του αιολικού πάρκου θα είναι.

Συντελεστής χωρητικότητας

Η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μιας ανεμογεννήτριας είναι η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που θα παράγει ετησίως, ανεξάρτητα από τις διακυμάνσεις της ταχύτητας και της ισχύος. Μετρείται σε kWh και μπορεί να εκτιμηθεί ως εξής:

Παράδειγμα: με ονομαστική ισχύ 2 KW και συντελεστή ισχύος 25%.

$$\text{Ετήσια ισχύς (kWh)} = 365 \text{ (ημέρες)} \times 24 \text{ (ώρες)} \times 2 \text{ (kw)} \times 0,25$$

$$= 4.380 \text{ kWh}$$

1.5 Πυκνότητα ισχύος ανέμου

Η πυκνότητα ισχύος του ανέμου (WPD) μιας περιοχής βοηθά στη σύγκριση και την επιλογή των καταλληλότερων θέσεων για τις ανεμογεννήτριες. Οι ανεμογεννήτριες που εγκαθίστανται σε περιοχές με υψηλότερη WPD παράγουν συνήθως περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια. Η WPD ορίζεται ως εξής:

$$\text{WPD} = \text{Πυκνότητα ισχύος ανέμου (watt / τετραγωνική επιφάνεια)}$$

$$\rho = \text{Πυκνότητα αέρα}$$

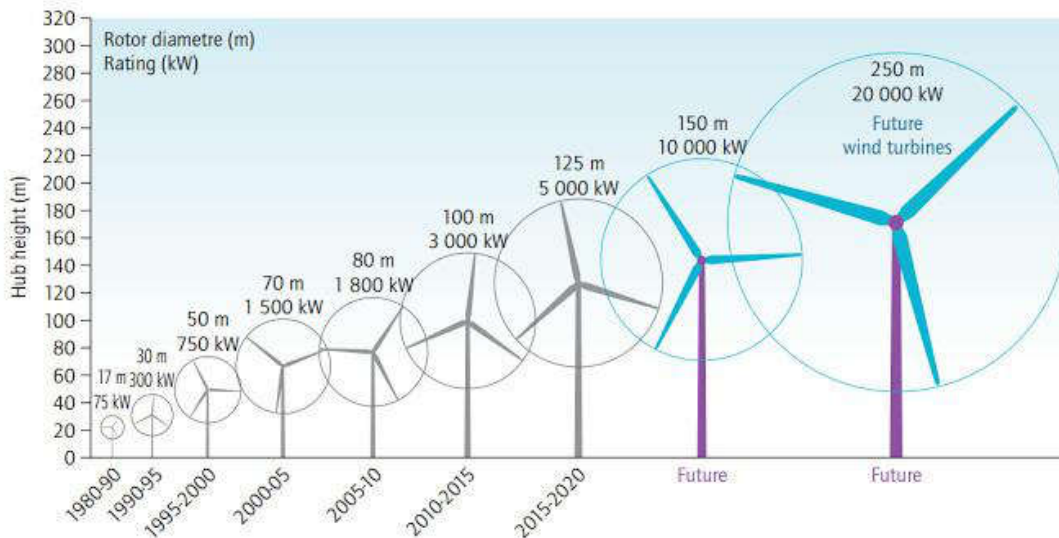
$$v = \text{ταχύτητα ανέμου}$$

Σύμφωνα με την Αμερικανική Ένωση Αιολικής Ενέργειας, ο άνεμος μπορεί να ταξινομηθεί σε κατηγορίες, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένδειξη για μια πιθανή τοποθεσία για μελλοντικά αιολικά πάρκα.

1.6 Χωρητικότητα και μεγέθη ανεμογεννητριών

Η αιολική βιομηχανία ακμάζει μέρα με τη μέρα και τα μεγέθη και οι ικανότητες των ανεμογεννητριών γίνονται επίσης όλο και μεγαλύτερες. Σχεδιάζονται και αναπτύσσονται ολοένα και μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες. Το ενδιαφέρον και η ανάπτυξη των χερσαίων ανεμογεννητριών έχουν μειωθεί τα τελευταία χρόνια και η υπεράκτια βιομηχανία έχει γίνει πιο προηγμένη τεχνολογικά από την χερσαία αιολική βιομηχανία. Η μέση δυναμικότητα των υπεράκτιων ανεμογεννητριών που λειτουργούν και κατασκευάζονται σήμερα είναι περίπου 2,5 MW έως 3,5 MW. Οι ανεμογεννήτριες των 8 MW είναι οι μεγαλύτερες που λειτουργούν σήμερα. Σχεδιάζονται ανεμογεννήτριες 15 MW και θεωρούνται θεωρητικά δυνατές ανεμογεννήτριες 20 MW. Οι συνολικές πρόσφατα κατασκευασμένες ανεμογεννήτριες έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα από ποτέ άλλοτε (Deign,2017)

Η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη σε μεγαλύτερα υψόμετρα και επηρεάζει σημαντικά τη συνολική ισχύ εξόδου της ανεμογεννήτριας. Η ψηλότερη ανεμογεννήτρια παρουσιάζει υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, οι οποίες σε αντάλλαγμα μπορούν να αποδώσουν μεγαλύτερη ισχύ. Η Vestas V126 ήταν η ψηλότερη ανεμογεννήτρια που ανεγέρθηκε το 2017 με ύψος πλήμνης 166 m. Το μέγιστο συνολικό ύψος των ανεμογεννητριών που εγκαταστάθηκαν το 2016 είχε αυξητική τάση με μετρήσεις μέχρι 230 m .



Source: adapted from EWEA, 2009.

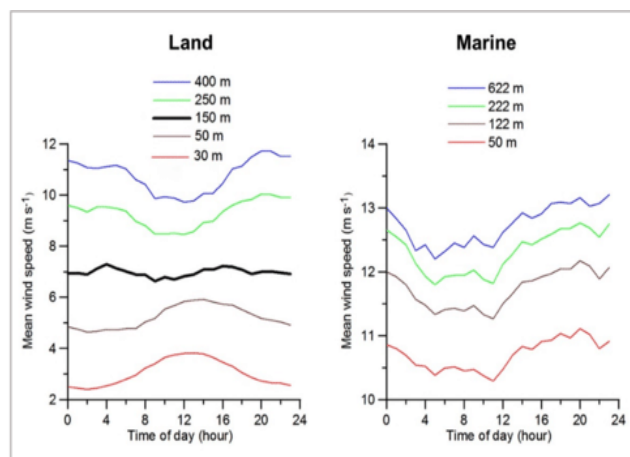
Εικόνα 1.4 Αύξηση του μεγέθους των ανεμογεννητριών (Διαθέσιμο στη [διεύθυνση https://www.researchgate.net/figure/Growth-in-size-of-wind-turbines-since-1980-and-prospect-KEY-POINT-Scaling-up-turbines_fig1_320867742](https://www.researchgate.net/figure/Growth-in-size-of-wind-turbines-since-1980-and-prospect-KEY-POINT-Scaling-up-turbines_fig1_320867742))

1.7 Προφίλ ανέμου

Ο άνεμος είναι απρόβλεπτος στη φύση και η ταχύτητα του ανέμου εξαρτάται από τον χρόνο και την τοποθεσία. Η ταχύτητα του ανέμου ποικίλλει κατά τη διάρκεια της ημέρας καθώς και ανάλογα με την τραχύτητα της επιφάνειας των διαφόρων περιοχών. Το προφίλ του ανέμου είναι βασικός παράγοντας για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την ισχύ των ανεμογεννητριών που πρόκειται να εγκατασταθούν. Τα εδάφη που δεν έχουν πολλά εμπόδια όπως δέντρα, σπίτια ή κτίρια θα έχουν μικρότερο μήκος τραχύτητας και μπορούν να έχουν υψηλότερες ταχύτητες ανέμου, ενώ, οι αστικές περιοχές είναι συνήθως οι περιοχές με χαμηλές ταχύτητες ανέμου.

Στις θάλασσες ή τους ωκεανούς, οι ταχύτητες ανέμου είναι πολύ υψηλότερες σε σύγκριση με τις ταχύτητες ανέμου στην ξηρά. Τις ηλιόλουστες ημέρες, η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις συννεφιασμένες ημέρες. Σε χαμηλά υψόμετρα, η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου είναι πιο σημαντική στους ωκεανούς από ό,τι στη στεριά. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, οι ταχύτητες του ανέμου είναι γενικά χαμηλότερες από ό,τι κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Σε χαμηλότερα υψόμετρα, οι ταχύτητες του ανέμου είναι υψηλότερες κατά τη διάρκεια της ημέρας απ' ό,τι τις νύχτες και σε μεγαλύτερα υψόμετρα, οι ταχύτητες του ανέμου είναι υψηλότερες τις νύχτες απ' ό,τι την ημέρα. Αυτή η διαφορετική συμπεριφορά μπορεί να υπολογιστεί για τη μεγαλύτερη μεταβολή της θερμοκρασίας κοντά στην επιφάνεια σε σχέση με τα μεγαλύτερα υψόμετρα όπου η ανταλλαγή θερμοκρασίας μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων αέρα δεν είναι σημαντική.

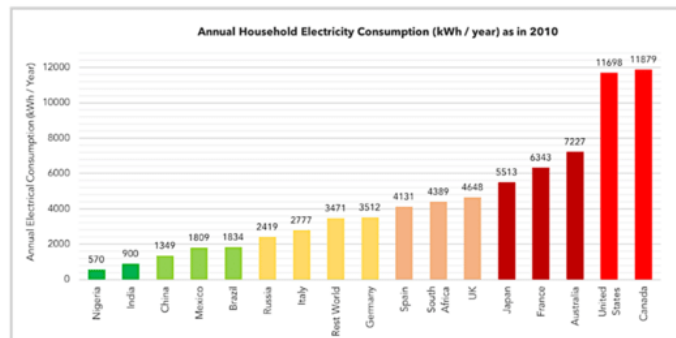


Εικόνα 1.5 - Μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου ανάλογα με τα ύψη, τις επιφάνειες και τις ώρες της ημέρας

1.8 Ανάγκη ενός νοικοκυριού σε ηλεκτρική ενέργεια

Περίπου το 80% των ανθρώπων στον κόσμο έχουν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια. Ο αριθμός αυτός έχει αυξηθεί την τελευταία δεκαετία, κυρίως λόγω της αυξανόμενης αστικοποίησης. Υπάρχουν πολλά πράγματα που οδηγούν σε αυτές τις διαφορές, όπως ο πλούτος, το φυσικό μέγεθος του σπιτιού, τα πρότυπα των συσκευών, οι τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος και η πρόσβαση σε καύσιμα για μαγείρεμα, θέρμανση και ψύξη. Ο Καναδάς, οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Αυστραλία συγκαταλέγονται μεταξύ των κορυφαίων καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας ετησίως. Η ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε μια γειτονιά αποτελεί βασικό παράγοντα για τη λήψη απόφασης σχετικά με το μέγεθος κάθε αιολικού πάρκου. Πρόκειται για την πραγματική ισχύ εξόδου που πρέπει να παράγει ένα

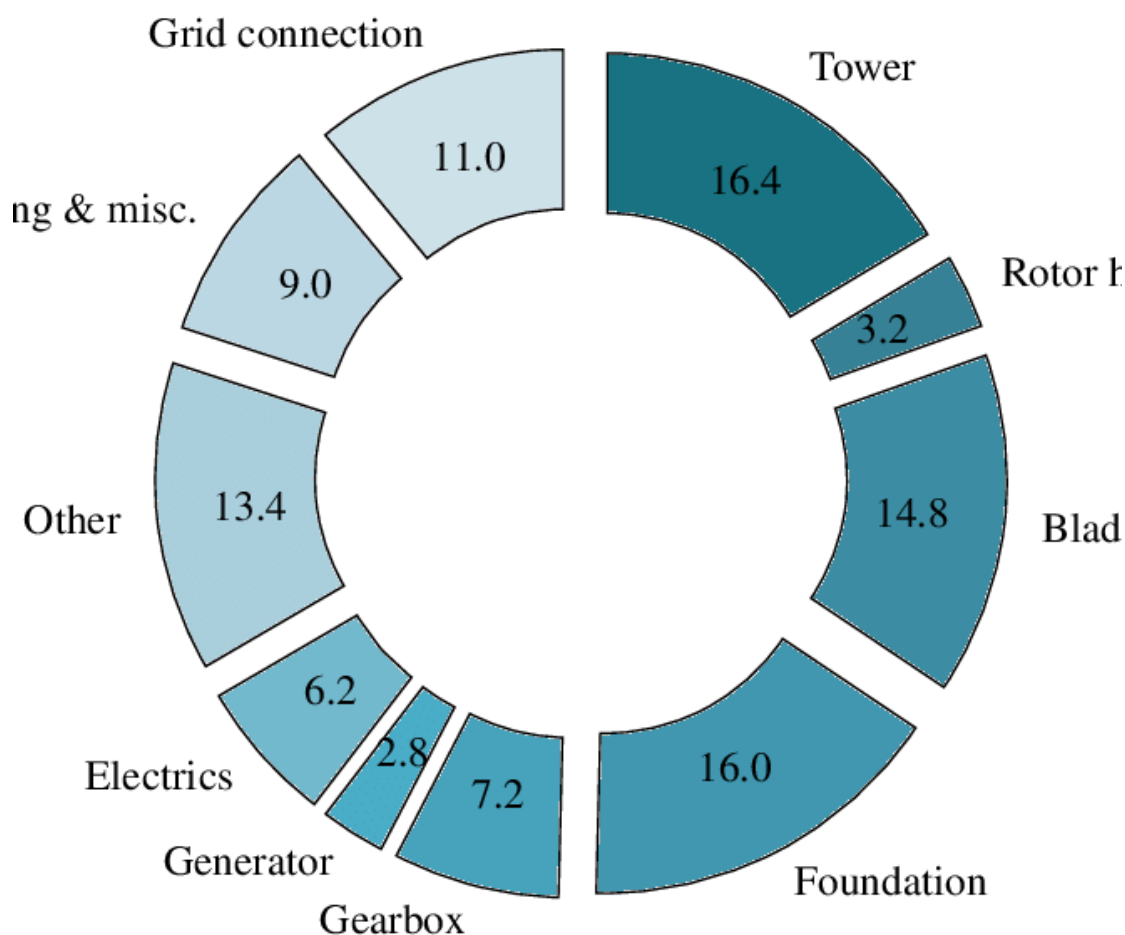
αιολικό πάρκο για να καλύψει τις ανάγκες μιας κοινότητας ή μιας πολιτείας σε ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 1.1- Ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση των νοικοκυριών(Enerdata μέσω του Παγκόσμιου Συμβουλίου Ενέργειας)

1.9 Στοιχεία κόστους ανεμογεννητριών

Το κόστος μιας ανεμογεννήτριας ποικίλλει ανάλογα με το σχεδιασμό και τις προδιαγραφές, αλλά το μεγαλύτερο κόστος είναι η ίδια η ανεμογεννήτρια. Πρόκειται για μια επένδυση κεφαλαίου που οι αγοραστές πρέπει να καταβάλουν εκ των προτέρων και η οποία συνήθως ανέρχεται σε περίπου 75% του συνολικού κόστους του έργου. Καθώς ο άνεμος είναι μια δωρεάν πηγή ενέργειας για την τροφοδοσία των ανεμογεννητριών, μόνο οι δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης παραμένουν υπόλογες μετά την εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας. Αυτές οι δαπάνες λειτουργίας και διαχείρισης είναι ελάχιστες σε σύγκριση με το συνολικό κόστος του έργου. Για την ανεμογεννήτρια, τα μεγαλύτερα στοιχεία κόστους είναι τα πτερύγια του ρότορα, ο πύργος και το κιβώτιο ταχυτήτων, τα οποία συνολικά συμβάλλουν περίπου στο 50-60% του κόστους μιας ανεμογεννήτριας. Τα ηλεκτρικά εξαρτήματα όπως η γεννήτρια, ο μετασχηματιστής και οι μετατροπείς ισχύος αντιπροσωπεύουν περίπου το 13% του κόστους της ανεμογεννήτριας. Το κόστος των χερσαίων ανεμογεννητριών είναι μικρότερο από τις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, το τυπικό εύρος εγκατάστασης μιας χερσαίας ανεμογεννήτριας το 2010 ήταν μεταξύ 1800 USD/kW και 2200/kW, ενώ η υπεράκτια ανεμογεννήτρια ήταν μεταξύ 4000/kW και 4500/kW. Οι τιμές των ανεμογεννητριών από το 2004 έως το 2010 συνέχισαν να αυξάνονται, ωστόσο από το 2010 παρατηρείται μείωση του κόστους. Οι λόγοι για τη μείωση αυτή είναι ο βελτιωμένος σχεδιασμός και η συνολική απόδοση των εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών και η μείωση των τιμών του χάλυβα και του άνθρακα στις παγκόσμιες αγορές (IRENA,2012).



Σχήμα 1.2-Κατανομή του κόστους κεφαλαίου μιας αιολικής τουρμπίνας(Zillmann ,Bechtle,2018)

1.10 Ταχύτητα και απόδοση ανεμογεννήτριας

Η απόδοση και η ασφάλεια της ανεμογεννήτριας εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου. Η αιολική βιομηχανία έχει ορίσει τρία σαφή σύνολα ταχυτήτων ανέμου για την αξιολόγηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας μιας ανεμογεννήτριας.

Γενικά, όλοι οι κατασκευαστές ανεμογεννητριών αξιολογούν την απόδοση και το σχεδιασμό των ανεμογεννητριών τους και παρέχουν την ταχύτητα αποκοπής, την ονομαστική ταχύτητα εξόδου και την ταχύτητα αποκοπής.

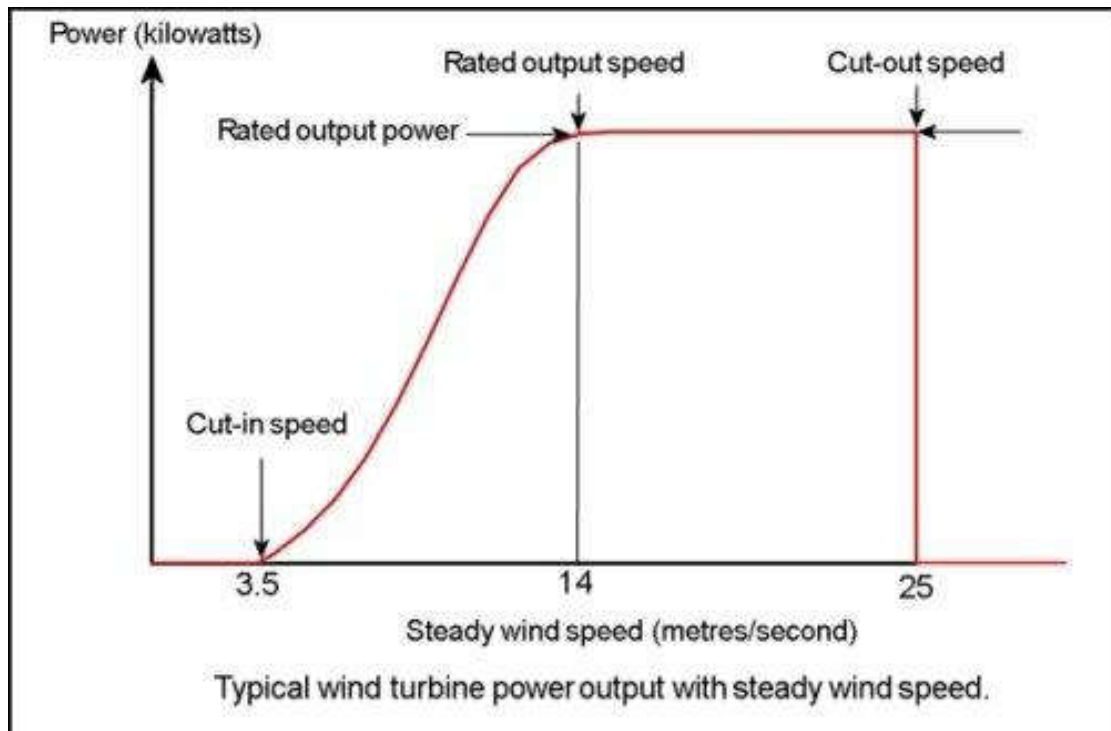
Ταχύτητα αποκοπής. Είναι η ταχύτητα στην οποία τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας αρχίζουν να περιστρέφονται και να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Σε πολύ χαμηλές ταχύτητες ανέμου, λόγω του βάρους και της ανεπαρκούς διαθέσιμης ισχύος, τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας δεν μπορούν να περιστραφούν. Ωστόσο, καθώς η ταχύτητα αυξάνεται, η ανεμογεννήτρια θα αποκτήσει επαρκή ροπή για να περιστραφεί και να παράγει ηλεκτρική ισχύ. Η ταχύτητα αποκοπής είναι συνήθως μεταξύ 3 και 4 m/s .

Ονομαστική ταχύτητα ανέμου εξόδου. Καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται πάνω από την ταχύτητα αποκοπής, η ηλεκτρική ισχύς εξόδου αυξάνεται επίσης γρήγορα. Ωστόσο, συνήθως μεταξύ 12 και 17 m/s, η ισχύς εξόδου φτάνει στο μέγιστο όριο που μπορεί να παράγει η ηλεκτρική γεννήτρια. Αυτό το όριο στην έξοδο της γεννήτριας ονομάζεται

ονομαστική ισχύς εξόδου και η ταχύτητα του ανέμου στην οποία επιτυγχάνεται ονομάζεται ονομαστική ταχύτητα του ανέμου εξόδου (πρόγραμμα Windpower).

Ταχύτητα αποκοπής. Πρόκειται για τη μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας πέραν της οποίας η ανεμογεννήτρια αντιμετωπίζει πολύ υψηλές δυνάμεις που μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την ευστάθειά της. Γενικά, όλες οι ανεμογεννήτριες είναι εξοπλισμένες με αυτόματο ή χειροκίνητο σύστημα πέδησης. Στην ταχύτητα αποκοπής, εφαρμόζεται το σύστημα πέδησης το οποίο τις φέρνει σε ακινησία.

Η ταχύτητα αποκοπής και είναι συνήθως γύρω στα 25 m/s



Σχήμα 1.3 - Τυπική καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας

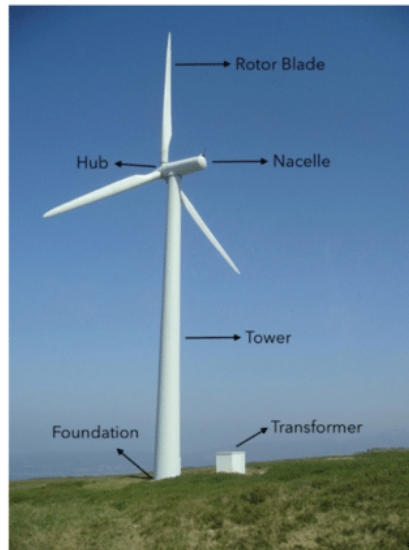
1.11 Στατιστικά στοιχεία για την αιολική ενέργεια

Σύμφωνα με την GWEC, το 2017 ήταν μια χρονιά παγκόσμιας επέκτασης για την αιολική και ηλιακή βιομηχανία. Νέες αγορές εμφανίστηκαν σε πολλές χώρες, γεγονός που σκιαγραφεί την ανάπτυξη και το βιώσιμο μέλλον των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι συνολικές εγκαταστάσεις το 2017 ήταν περίπου 52 GW, με αποτέλεσμα το σύνολο των εγκαταστάσεων αιολικής ενέργειας να ανέρχεται σε 539 GW παγκοσμίως. Η Κίνα, οι ΗΠΑ και η Γερμανία ήταν οι χώρες με την υψηλότερη συνεισφορά το 2017, καθιστώντας τις επίσης τις κορυφαίες χώρες παραγωγής αιολικής ενέργειας στο τέλος του 2017. Το 2017 σημειώθηκε αύξηση 16% στη συνολική παγκόσμια δυναμικότητα αιολικής ενέργειας σε σχέση με το 2016. Το 2015 ήταν μια χρονιά ρεκόρ για την αιολική ενέργεια με 22% ετήσια αύξηση της αγοράς που είχε ως αποτέλεσμα να ξεπεραστεί το όριο των 60 GW μόνο το 2015 (Παγκόσμιο Συμβούλιο Αιολικής Ενέργειας).

1.12.Υλικά ανεμογεννήτριας

Η ανεμογεννήτρια είναι μια μηχανή που χρησιμοποιεί την αιολική ενέργεια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέποντας την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ενέργεια. Πρόκειται για μια πολύπλοκη κατασκευή που κατασκευάζεται με ένα ευρύ φάσμα εξαρτημάτων που περιλαμβάνει μηχανικά, ηλεκτρικά και κατασκευαστικά στοιχεία. Ένα τυπικό σύστημα αιολικής ενέργειας περιλαμβάνει τους ρότορες, το συγκρότημα πλήμνης, την άτρακτο, το μηχανισμό περιστροφής, τη γεννήτρια, το σύστημα μετάδοσης, τον

πύργου και ένα σύστημα θεμελίωσης. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζονται τα τυπικά εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 2.1 Τυπική επισκόπηση μιας ανεμογεννήτριας. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: https://www.researchgate.net/figure/Typical-overview-of-a-wind-turbine_fig5_329680977

1.12.1 Πύργος

Ο σκοπός του πύργου είναι να φέρει την ανεμογεννήτρια. Φέρει τα βάρη της ατράκτου, των πτερυγίων του ρότορα, του συγκροτήματος ζυγοστάθμισης και όλων των ηλεκτρικών εξαρτημάτων. Πρέπει επίσης να απορροφήσει τα τεράστια φορτία ανέμου και κραδασμών και να τα μεταφέρει με ασφάλεια στη θεμελίωση. Γενικά, χρησιμοποιείται ένα σωληνοειδές τμήμα από σκυρόδεμα ή προκατασκευασμένο χάλυβα. Οι πύργοι από σκυρόδεμα είναι ισχυροί αλλά ακριβοί και οι χαλύβδινοι πύργοι είναι ικανοί για υψηλότερες κατασκευές ανεμογεννητριών, οπότε ο τύπος και η επιλογή του πύργου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που διαφέρουν ανάλογα με την τοποθεσία. Η πραγματική κατακόρυφη ευθυγράμμιση είναι ένα πολύ βασικό μέρος της κατασκευής μιας ανεμογεννήτριας και επιτρέπεται κλίση μέχρι 1 μόνο βαθμό. Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι πύργων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανεμογεννήτριες.

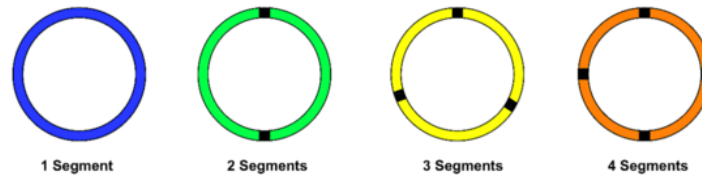


Εικόνα 2.2. Τύποι πύργων ανεμογεννητριών. Διαθέσιμο στο: https://www.researchgate.net/figure/Types-of-wind-turbine-tower-202122_fig6_329680977

- Χαλύβδινοι πύργοι

Κατασκευάζονται από προκατασκευασμένα χαλύβδινα τμήματα και συνήθως αποτελούνται από δύο έως τέσσερα τμήματα που ενώνονται μεταξύ τους στο εργοτάξιο.

Κυρίως οι μεγάλες ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται με σωληνωτούς χαλύβδινους πύργους, οι οποίοι κατασκευάζονται σε τμήματα ύψους 20 έως 30 μέτρων με φλάντζες στα δύο άκρα και ενώνονται μεταξύ τους με βίδες στο εργοστάσιο. Οι πύργοι έχουν κωνικό σχήμα για να αυξήσουν την αντοχή τους και να εξοικονομήσουν υλικό. Το πλεονέκτημα των χαλύβδινων πύργων έναντι των πύργων από σκυρόδεμα είναι η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του χάλυβα μετά τη διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας. Η υψηλότερη κατασκευή μιας ανεμογεννήτριας είναι επίσης δυνατή σε χαλύβδινους πύργους, ενώ οι ψηλοί πύργοι από σκυρόδεμα καθίστανται αντικοινομικοί (Πύργοι ανεμογεννητριών).



Σχήμα 1.4 Απεικόνιση των τμημάτων του χαλύβδινου πύργου. Διαθέσιμο στη [διεύθυνση https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-segments-of-steel-tower_fig7_329680977](https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-segments-of-steel-tower_fig7_329680977)

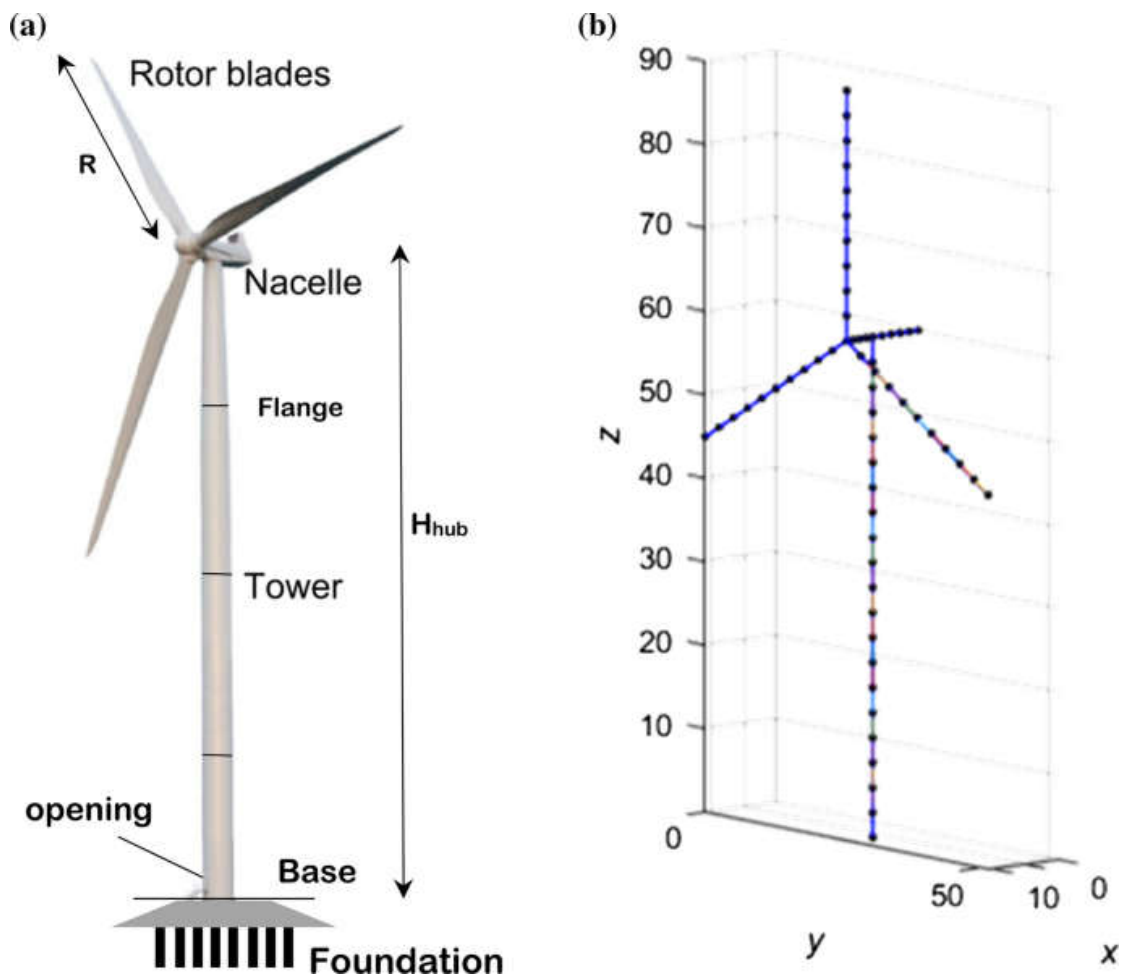


Εικόνα 2.3 Θεμελίωση από σκυρόδεμα με βίδες αγκύρωσης και φλάντζα. Διαθέσιμο στο: <https://www.windfarmbop.com/category/foundations/page/3/>



Εικόνα 2.4 Βίδες συγκράτησης για μια ανεμογεννήτρια

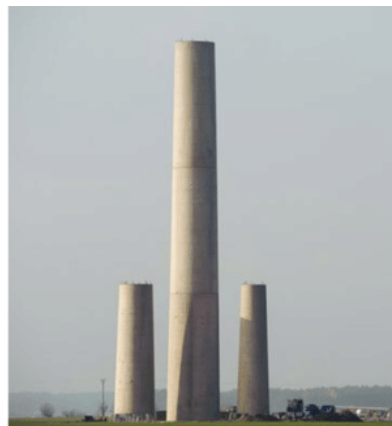
Διατίθεται στη [διεύθυνση: https://www.geograph.org.uk/photo/4653109](https://www.geograph.org.uk/photo/4653109)



Σχήμα 1.5 Σχηματική απεικόνιση πύργου ανεμογεννήτριας. Available at <https://link.springer.com/article/10.1007/s13296-021-00551-5>

- Πύργοι από σκυρόδεμα

Οι πύργοι από σκυρόδεμα κατασκευάζονται με τεράστια κομμάτια από βαρύ σκυρόδεμα. Είναι αντιδημοφιλείς και χρησιμοποιούνται κυρίως σε χώρες όπου οι τιμές του χάλυβα είναι πολύ υψηλές. Συνήθως αποτελούνται από 3 τμήματα. Η ζώνη βάσης κατασκευάζεται από χοντρότοιχο σκυρόδεμα πάχους 40 έως 50 cm για να παρέχει επαρκή αντοχή και ακαμψία στη δομή. Η μεσαία και η ανώτερη ζώνη σχεδιάζονται συνήθως για εξοικονόμηση υλικού παρά για αντοχή και δυσκαμψία. Τα πάνελ από σκυρόδεμα κατασκευάζονται στο ναυπηγείο φόρτωσης και μεταφέρονται στην τοποθεσία (Concrete wind towers, 2007).



Εικόνα 2.5 Τυπική κατασκευή από σκυρόδεμα. Διαθέσιμο στη διεύθυνση https://www.researchgate.net/figure/Typical-concrete-tower-construction-28_fig8_329680977

- Πύργοι πλέγματος χάλυβα

Οι πύργοι πλέγματος κατασκευάζονται με συγκολλημένα χαλύβδινα τμήματα. Οι πύργοι πλέγματος είναι φθηνότεροι στην κατασκευή, καθώς ένας πύργος πλέγματος απαιτεί μόνο το μισό υλικό από έναν σωληνωτό πύργο με παρόμοια ακαμψία.

Οι πύργοι πλέγματος έχουν σχεδόν εξαφανιστεί από τη βιομηχανία για αισθητικούς λόγους (Πύργοι ανεμογεννητριών).

- Υβριδικοί πύργοι

Ο υβριδικός πύργος είναι ένας συνδυασμός διαφορετικών υλικών πύργου. Μπορεί να είναι είτε ένας συνδυασμός πύργων από χάλυβα και σκυρόδεμα είτε πύργοι από χαλύβδινο πλέγμα και σκυρόδεμα. Γενικά, αποτελείται από δύο διαφορετικά μεταξύ τους μέρη που συνδέονται μέσω ενός δακτυλίου προσαρμογής.



Εικόνα 2.6 Ανεμογεννήτρια υβριδικού πύργου. Διαθέσιμο στη [διεύθυνση https://www.researchgate.net/figure/Hybrid-lattice-tubular-tower_fig5_292610311](https://www.researchgate.net/figure/Hybrid-lattice-tubular-tower_fig5_292610311)

- Κατευθυντήριος πύλος

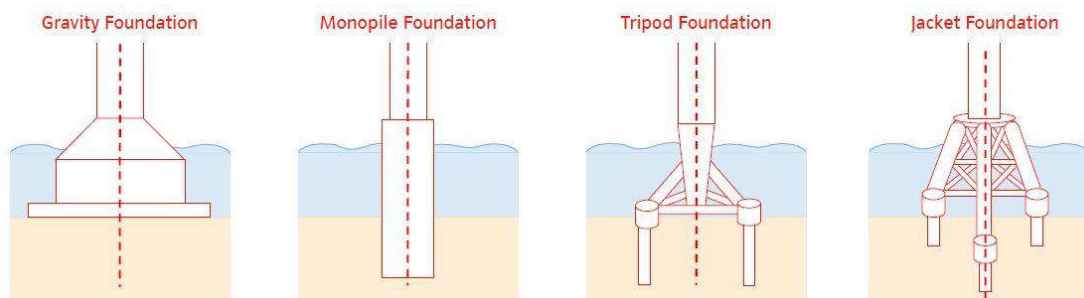
Οι στύλοι με στύλους ήταν πολύ συνηθισμένοι στις μικρές ανεμογεννήτριες. Πρόκειται για ελαφριά δομή που υποστηρίζεται από σύρματα. Είναι κατάλληλο ειδικά για οικιακή χρήση ή μικρή χρήση. Η πρόσβαση γύρω από τον στύλο είναι δύσκολη, γεγονός που περιορίσε περαιτέρω τη χρήση.



Εικόνα 2.7 Ανεμογεννήτρια με στύλο . Διαθέσιμο στη διεύθυνση <https://www.leadingedgepower.com/guyed-wind-turbine-tower-kit-1013012.html>

1.12.2 Θεμέλια

Σκοπός της θεμελίωσης είναι η ασφαλής μεταφορά των φορτίων στο έδαφος και η εξασφάλιση της ευστάθειας μιας ανεμογεννήτριας εντός της επιτρεπόμενης απόκλισης και κλίσης. Το θεμέλιο φέρει πολλά διαφορετικά φορτία, συμπεριλαμβανομένων των νεκρών φορτίων, των φορτίων ανέμου, των ανοδικών ωθήσεων, των ανατρεπτικών ροπών κάμψης, των δονήσεων και των μακροπρόθεσμων κυκλικών κυματικών φορτίσεων. Το νεκρό φορτίο που ασκείται στην ανεμογεννήτρια είναι κυρίως το ίδιο βάρος της κατασκευής, συμπεριλαμβανομένου του πύργου, των ρότορων, της ατράκτου και των ηλεκτρικών εξαρτημάτων. Τα πρόσθετα φορτία συνολικά προκαλούν τεράστιες καμπτικές ροπές στη θεμελίωση (Svensson,2010). Στο σχήμα 2.10 παρουσιάζονται ορισμένα από τα σημαντικότερα και συνήθως υιοθετούμενα θεμέλια στην αιολική βιομηχανία.



Εικόνα 2.8 Τύποι θεμελίωσης ανεμογεννητριών. Διαθέσιμο στη διεύθυνση <https://www.windfarmbop.com/offshore-wind-turbines-foundation-types/>

- Θεμέλιο στήριξης βαρύτητας

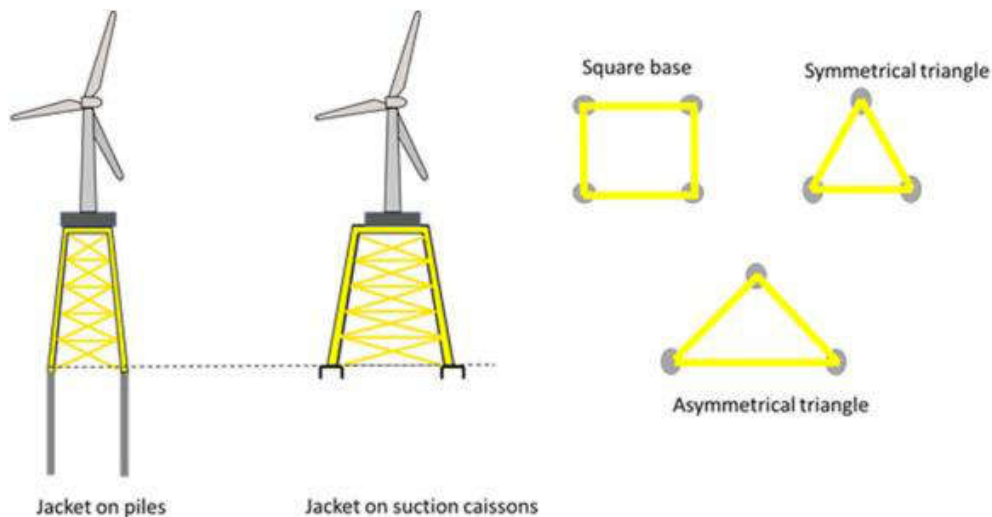
Η δομή στήριξης τύπου βαρύτητας είναι συνήθως μια δομή με βάση το σκυρόδεμα. Για τις χερσαίες ανεμογεννήτριες, τα θεμέλια βαρύτητας είναι ο συνήθης τύπος θεμελίωσης,

ωστόσο, χρησιμοποιούνται επίσης σε υπεράκτιες ανεμογεννήτριες. Συνήθως προτιμώνται εκεί όπου το έδαφος είναι τόσο σκληρό που οι πάσσαλοι δεν μπορούν να διεισδύσουν.

Για τις χερσαίες ανεμογεννήτριες, τα θεμέλια βαρύτητας βρίσκονται σε βάθος 2 έως 3 μέτρων κάτω από την επιφάνεια του εδάφους και έχουν συνήθως ορθογώνιο, κυκλικό ή οκταγωνικό σχήμα. Σε γενικές γραμμές, τα θεμέλια βαρύτητας σχεδιάζονται για να αξιοποιούν το τεράστιο ίδιο βάρος για να αποτρέπουν την ανατροπή της ανεμογεννήτριας. Δεν απαιτείται διάτρηση ή σφυρηλάτηση στην περίπτωση της θεμελίωσης με πασσάλους (Malhotra,2011, Shrestha, 2015)

- Θεμέλιο Μανδύα

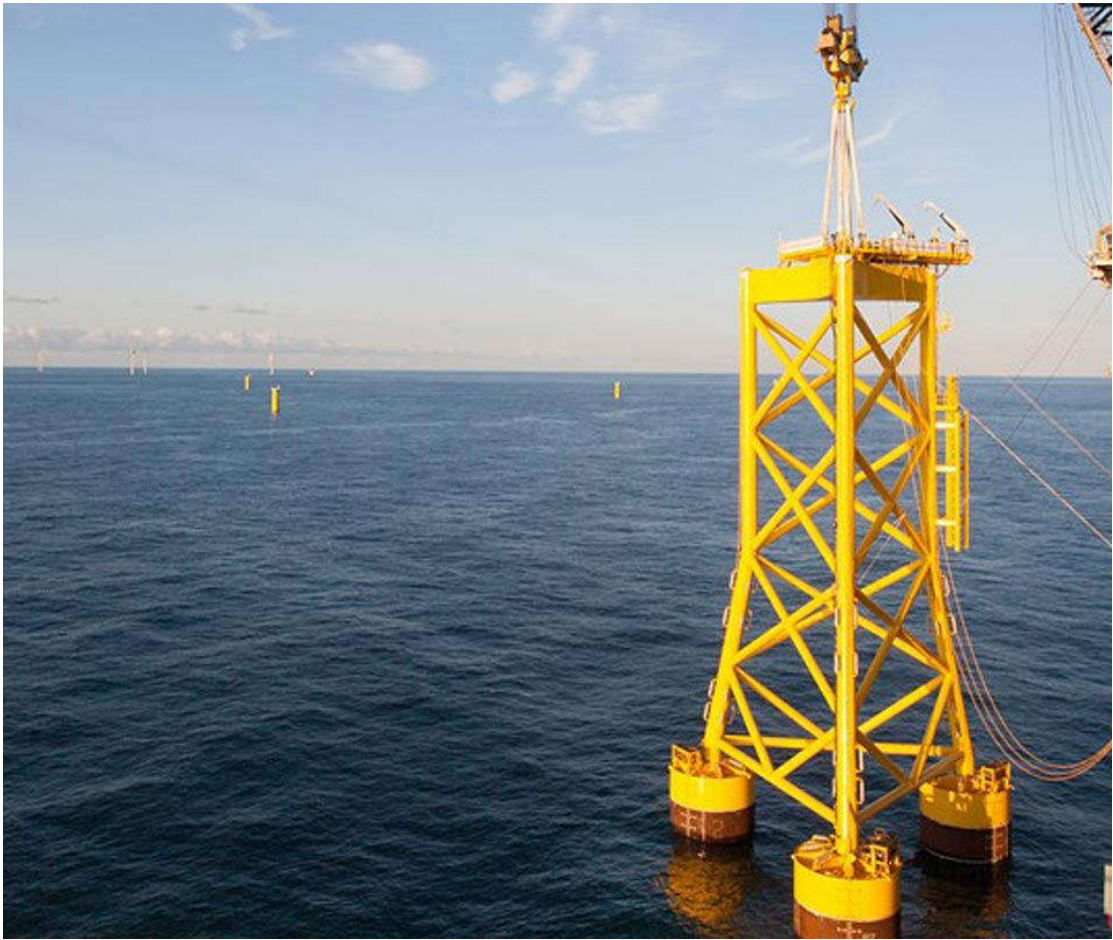
Μια δομή μανδύα είναι μια χαλύβδινη κατασκευή τριών ή τεσσάρων ποδιών που συνδέονται μεταξύ τους με συγκολλημένα χαλύβδινα τμήματα. Τα στηρίγματα παρέχουν καλή ακαμψία στη δομή. Είναι βαριές κατασκευές και αναπτύσσονται σε βάθος νερού περίπου 20 έως 50 m. Γενικά, χρησιμοποιείται κοίλη χαλύβδινη διατομή. Υπάρχουν πολλές παραλλαγές θεμελίωσης μανδύα. Αποτελούνται από γωνιακούς πασσάλους που συνδέονται μεταξύ τους με στηρίγματα με διάμετρο που μπορεί να είναι έως και 2 m. Οι πάσσαλοι οδηγούνται μέσα στο μανδύα πασσάλων στο απαιτούμενο βάθος για να αποκτήσει σταθερότητα η κατασκευή (Shrestha, 2015).



Σχήμα 1.6 Θεμελιώσεις μανδύα για υπεράκτιες ανεμογεννήτριες. (Jalbi , Bhattacharya,2020)

- Θεμέλια κάδου αναρρόφησης

Τα θεμέλια με κάδο αναρρόφησης είναι μια σχετικά νέα εξέλιξη στην υπεράκτια αιολική βιομηχανία. Αυτός ο τύπος θεμελίωσης έχει έναν αντίστροφο κάδο από χάλυβα συνήθως με μεγάλες διαμέτρους έως και 10 m. Ο κάδος αναρρόφησης κατεβαίνει στη θάλασσα και το νερό αντλείται από τον κάδο για να μειωθεί η πίεση στο εσωτερικό της ποδιάς του κάδου. Η προκύπτουσα αρνητική πίεση και το βάρος της θεμελίωσης προκαλούν τη βύθιση της θεμελίωσης στον πυθμένα της θάλασσας. Η θεμελίωση με κάδο αναρρόφησης είναι κατάλληλη για βαθιά νερά και μεγάλες τουρμπίνες. Μπορεί να εγκατασταθεί σε μεγάλη ποικιλία συνθηκών τοποθεσίας, όπως άμμος, ιλύς, άργιλος και στρωματοποιημένα στρώματα.



Εικόνα 2.9 Θεμελιώσεις μανδύα κάδου αναρρόφησης. Διαθέσιμο στη διεύθυνση <https://orsted.com/en/our-business/offshore-wind/wind-technology/suction-bucket-jacket-foundations>

- Τριπλό Θεμέλιο

Το τριπλό θεμέλιο είναι μια δομή μανδύα με τρία πόδια που συνδέεται με έναν μονοπάσσαλο στην ανώτερη δομή.

Αποτελούνται από κοίλες χαλύβδινες διατομές και είναι κατάλληλες για βάθη από 25 έως 40 m. Το πλεονέκτημα της τριπλής θεμελίωσης είναι η προσαρμογή του πλάτους και του βάθους διείσδυσης των πασσάλων ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής. Το πρώτο τριπλό θεμέλιο κατασκευάστηκε από την BARD το 2008, κάθε τριπλό θεμέλιο περιείχε 1100 τόνους χάλυβα (υπεράκτια αιολικά πάρκα).



Εικόνα 2.10 Τρίποδες για θεμελίωση ανεμογεννητριών. Διατίθεται στη διεύθυνση <https://maritek.com.ua/portfolio-item/foundations-of-tripiles-for-the-bard-offshore/>

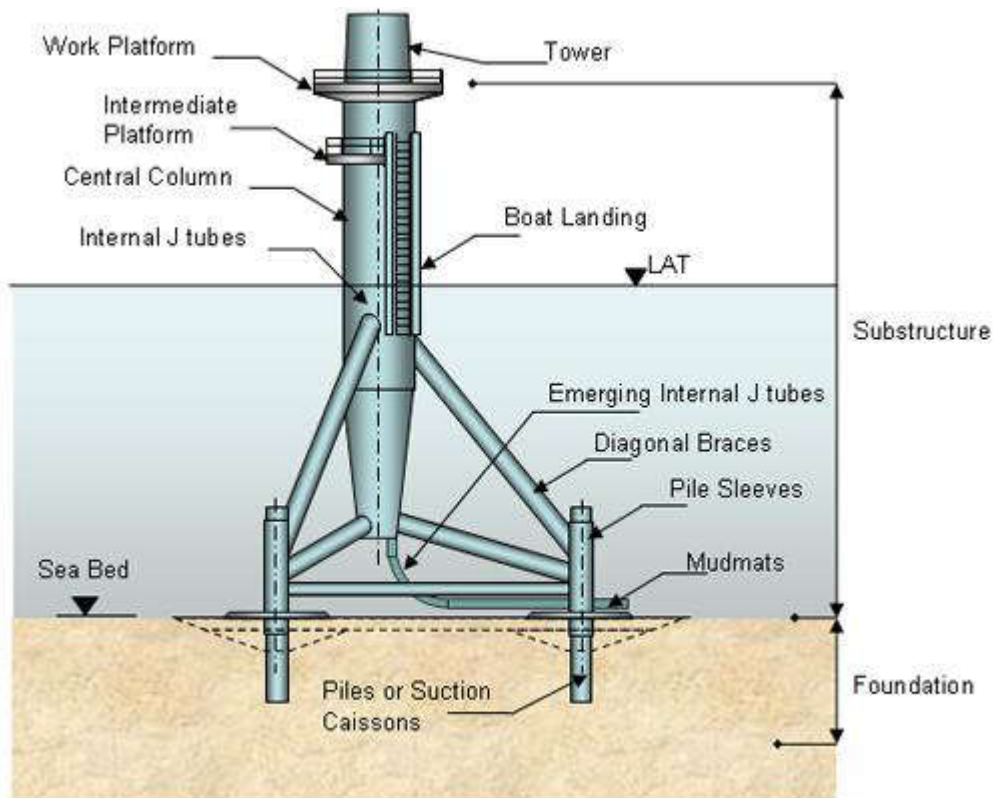
- Θεμέλιο με μονό πάσσαλο

Η δομή στήριξης με μονό πάσσαλο είναι μια πολύ απλή κατασκευή με την οποία ο πύργος υποστηρίζεται από τον μονό πάσσαλο.

Το μονοπάτι θεμελίωσης αποτελείται από κοίλο κυλινδρικό χαλύβδινο σωλήνα με διάμετρο έως 12 m και εξωτερικό πάχος 150 mm. Τα μονοπάτια είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες κατασκευές θεμελίωσης στην υπεράκτια αιολική ενέργεια. Είναι κατάλληλες για ρηχά έως μεσαία βάθη νερού έως 30 m. "Η συνήθης μέθοδος εγκατάστασης των πασσαλοειδών κατασκευών είναι η ανύψωση ή η πλεύση της κατασκευής στη θέση της και στη συνέχεια η έμπηξή της στον πυθμένα με τη χρήση είτε ατμοκίνητων είτε υδραυλικών σφυρών" (Monopiles Support Structures).

- Τριποδικά θεμέλια

Τα τριποδικά θεμέλια είναι ένα από τα βαρύτερα εκτός από τα θεμέλια του μανδύα. Τρεις γωνιακοί πάσσαλοι εγκαθίστανται σε κάθε θέση του ποδιού και αγκιστρώνονται στον πυθμένα της θάλασσας. Η αγκύρωση παρέχει καλή σταθερότητα και ακαμψία έναντι πλευρικών φορτίων. Γίνονται ασύμφορες όταν χρησιμοποιούνται για μικρά βάθη νερού. Η δομή τρίποδα προκατασκευάζεται σε ένα εργοτάξιο και μεταφέρεται στη θέση όπου κατεβαίνει στον πυθμένα της θάλασσας εξασφαλίζοντας την ευθυγράμμιση της ανεμογεννήτριας (δομές στήριξης τρίποδα).



Σχήμα 1.7 Ανεμογεννήτριες με δομή τρίποδα. Διαθέσιμο στη διεύθυνση <https://www.wind-energy-the-facts.org/offshore-support-structures-7.html>

1.12.3 Άλλα στοιχεία μιας ανεμογεννήτριας

1. Η άτρακτος παρέχει ένα περίβλημα που περιέχει και προστατεύει όλα τα υπόλοιπα εξαρτήματα μιας ανεμογεννήτριας, κυρίως μηχανικά και ηλεκτρικά εξαρτήματα, συμπεριλαμβανομένης της γεννήτριας, του κιβωτίου ταχυτήτων, των αξόνων ταχύτητας, του μηχανισμού περιστροφής και του συστήματος πέδησης. Βρίσκεται στην κορυφή ενός πύργου. Οι σύγχρονες ατράκτους ανεμογεννητριών κατασκευάζονται με στήριγμα προσγειώσης ελικοπτέρου για άμεση συντήρηση και δυνατότητα συντήρησης.

2. Σχεδόν όλες οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι εξοπλισμένες με ανεμόμετρα και ανεμοδείκτες, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου. Η ανεμογεννήτρια ευθυγραμμίζεται αυτόματα με την κατεύθυνση του ανέμου χρησιμοποιώντας δεδομένα από το ανεμόμετρο και το ανεμολόγιο.

3. Όταν ο άνεμος φτάσει την ταχύτητα αποκοπής, εφαρμόζονται φρένα είτε μηχανικά, είτε ηλεκτρικά, είτε υδραυλικά για να σταματήσει η ανεμογεννήτρια. Στις ανεμογεννήτριες ενσωματώνεται επίσης ένα εξελιγμένο σύστημα πέδησης.

4. Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι ένας κόμβος που συνδέει τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας. Αυτό αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής σε ένα ορισμένο επίπεδο που απαιτείται από τη γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι το βαρύτερο και ακριβότερο μηχανικό μέρος της ανεμογεννήτριας.

5. Η γεννήτρια χρησιμοποιεί την περιστροφική ενέργεια που προέρχεται από τους άξονες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

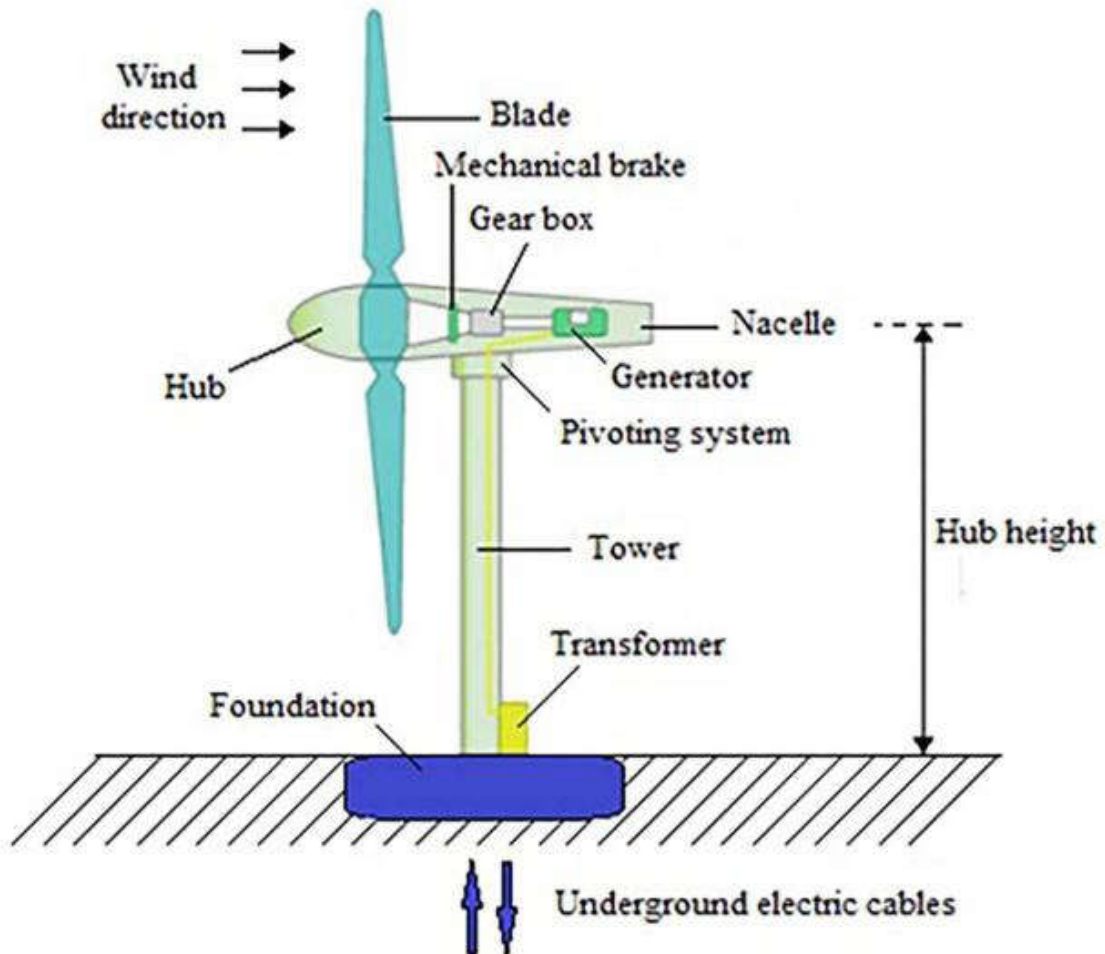
6. Ο άξονας υψηλής ταχύτητας κινεί τη γεννήτρια.

7. Ο άξονας χαμηλής ταχύτητας συνδέει απευθείας τον ρότορα με το κιβώτιο ταχυτήτων. Όταν τα πτερύγια του ρότορα αρχίζουν να περιστρέφονται, ο

άξονας χαμηλής ταχύτητας περιστρέφεται πρώτος, ο οποίος κινεί τον άξονα υψηλής ταχύτητας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

8. Ο μηχανισμός εκτροπής χρησιμοποιείται για τον προσανατολισμό των ρότορων της ανεμογεννήτριας κατά τη διεύθυνση του ανέμου. Ο προσανατολισμός της ανεμογεννήτριας ελέγχεται με την εφαρμογή της κατεύθυνσης του ανέμου από το ανεμοθώρακα ως σημείο ρύθμισης κατεύθυνσης. Ο μηχανισμός εκτροπής μιας ανεμογεννήτριας ενεργοποιείται από ηλεκτρικούς κινητήρες.

9. Στρέφει (ή στρέφει) τα πτερύγια έξω από τον άνεμο για να ελέγχει την ταχύτητα του ρότορα και για να εμποδίζει τον ρότορα να περιστρέφεται σε ανέμους που είναι πολύ υψηλοί ή πολύ χαμηλοί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Department of Energy).



Σχήμα 1.8 Επισκόπηση των κύριων στοιχείων μιας ανεμογεννήτριας (Năstase,2017).

Αυτό το κεφάλαιο έχει ως στόχο να παρουσιάσει τη βιβλιογραφική ανασκόπηση των ανεμογεννητριών. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται επίσης σημαντικές ορολογίες, γεγονότα, πτυχές των επιδόσεων, εξαρτήματα και μελλοντικές προοπτικές των ανεμογεννητριών. Ο άνεμος χρησιμοποιείται επί μακρόν από τον άνθρωπο, γεγονός που συνεχίζει να αυξάνει και να ανθίζει την αιολική βιομηχανία. Σε παλαιότερες εποχές, ο άνεμος χρησιμοποιούνταν μόνο για οικιακούς σκοπούς, ωστόσο, στη σύγχρονη εποχή, έχει γίνει εμπορική και κύρια πηγή παραγωγής ενέργειας σε πολλές ανεπτυγμένες χώρες. Το μεγαλύτερο μέρος της αιολικής βιομηχανίας κυριαρχείται στην Ευρώπη. Το Ηνωμένο Βασίλειο, η Γερμανία και οι ΗΠΑ είναι οι κορυφαίες χώρες παραγωγής αιολικής ενέργειας στον κόσμο, ωστόσο, χώρες όπως η Ταϊβάν, η Κίνα και η Ινδία έχουν δείξει τεράστιο ενδιαφέρον για την υιοθέτηση της αιολικής βιομηχανίας. Ο μηχανισμός λειτουργίας των ανεμογεννητριών εξαρτάται εξ ολοκλήρου από την ταχύτητα του ανέμου. Μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου θα παράγει υψηλότερη απόδοση. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι

εξοπλισμένες με αυτόματους μηχανισμούς αισθητήρων που μπορούν να ανιχνεύσουν την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου.

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να περιστρέφονται ώστε να ευθυγραμμίζονται με την κατεύθυνση του ανέμου και να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής τους. Έχουν επίσης την ικανότητα να σταματούν όταν υπάρχει κίνδυνος λόγω ισχυρών ανέμων. Το 1900 οι ανεμογεννήτριες ήταν πολύ μικρής κλίμακας με ισχύ σε kW, αλλά σήμερα λειτουργούν ακόμη και ανεμογεννήτριες ισχύος 10 MW και ύψους 120 μέτρων. Η ανάπτυξη, η έρευνα και η χρηματοδότηση έχουν εφαρμόσει με επιτυχία διάφορα πρωτότυπα ανεμογεννητριών με αποτέλεσμα την εμφάνιση των χερσαίων και υπεράκτιων βιομηχανιών αιολικής ενέργειας. Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες έχουν περισσότερα πρακτικά πλεονεκτήματα από τις χερσαίες ανεμογεννήτριες. Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα μπορούν να αξιοποιήσουν τεράστιες λεκάνες ωκεανού χωρίς οπτική δυσχέρεια και μπορούν να παράγουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από τα χερσαία αιολικά πάρκα. Η λειτουργικότητα μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από την ασφαλή μεταφορά όλων των φορτίων από τη θεμελίωση. Τα μονοπάτια είναι η πιο κοινή και ευρέως χρησιμοποιούμενη δομή θεμελίωσης για ανεμογεννήτριες. Ο λόγος μπορεί να αποδοθεί στην απλοϊκή δομή και στα οικονομικά χαρακτηριστικά. Οι άλλες κατασκευές παρέχουν καλή αντοχή έναντι πλευρικών φορτίων και συνήθως κατασκευάζονται σε βαθιά νερά. Με τη μελλοντική εξαρτημένη πηγή, η αιολική κοινότητα έχει αναπτύξει τυποποιημένους κώδικες και προδιαγραφές για την περαιτέρω ενίσχυση και προώθηση της βιομηχανίας. Το πρότυπο DNV για τις υπεράκτιες εγκαταστάσεις, η Διεθνής Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC), η Germanischer Lloyd, το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (NREL), το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου είναι μεταξύ των ευρέως χρησιμοποιούμενων κωδίκων. Αναμφίβολα, η αιολική βιομηχανία έχει τη δυνατότητα να ηγηθεί της βιομηχανίας ενέργειας ως αξιόπιστη πηγή παραγωγής ενέργειας στο μέλλον.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

2.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον για την εγκατάσταση Α/Γ, λόγω της ύπαρξης πολλαπλών πλεονεκτημάτων που σχετίζονται με τη χωροθέτηση και τη λειτουργία των ανεμογεννητριών στη θάλασσα, όπως η ύπαρξη ισχυρότερων ανέμων μεγαλύτερης διάρκειας, η διαθεσιμότητα εκτεταμένου ελεύθερου χώρου για την κατασκευή έργων μεγάλης κλίμακας, η μείωση ή/και η αποφυγή του θορύβου και των οπτικών διαταραχών που προκαλούνται στο τοπίο από τις κατασκευές αυτές κ.λπ. Μετά την εγκατάσταση του πρώτου OWF στη Δανία στις αρχές της δεκαετίας του 1990, σημειώθηκε σημαντική αύξηση της χερσαίας αιολικής βιομηχανίας κατά την πρώτη δεκαετία του 2000, με τη συνολική δυναμικότητα να διπλασιάζεται κάθε 2-4 χρόνια (Ng,Ran,2016).

Σε παγκόσμια κλίμακα, σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία της GlobalWind για το 2014, πάνω από το 90% του συνόλου των υπεράκτιων αιολικών εγκαταστάσεων υλοποιήθηκαν σε ευρωπαϊκά ύδατα. Η υπεράκτια αιολική ενέργεια στην Ευρώπη έφθασε το 2017 στο ποσό ρεκόρ των 3148 μεγαβάτ (MW) συνολικής εγκατεστημένης ισχύος, το οποίο αντιστοιχεί σε 560 νέες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες και 17 OWF (Ng,Ran,2016, Remy,Mbistrova,2018) Το συγκεκριμένο ρεκόρ είναι δύο φορές υψηλότερο από τα στοιχεία του 2016 και 4% υψηλότερο από το προηγούμενο ρεκόρ του 2015 (Remy,Mbistrova,2018). Το επόμενο έτος (2018), 409 νέες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες συνδέθηκαν στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας σε 18 υπεράκτια αιολικά έργα στην Ευρώπη (Selot et al,2019). Το αναφερόμενο ποσό αντιστοιχεί σε 2649 MW καθαρής πρόσθετης δυναμικότητας, η οποία είναι κατά 15,8% χαμηλότερη σε σχέση με το 2017 (Selot et al,2019). Έτσι, η σωρευτική υπεράκτια αιολική δυναμικότητα της Ευρώπης έφτασε τα 18.499 MW στο τέλος του 2018, που αντιστοιχεί σε συνολικά 4543 αιολικές εγκαταστάσεις συνδεδεμένες στο δίκτυο σε 11 ευρωπαϊκές χώρες (Selot et al,2019). Επί του παρόντος, το Ηνωμένο Βασίλειο διαθέτει το μεγαλύτερο ποσό υπεράκτιας αιολικής ισχύος στην Ευρώπη με 44% του συνόλου των εγκαταστάσεων σε MW, ακολουθούμενο από τη Γερμανία με 34%, τη Δανία (7%), το Βέλγιο (6,4%) και τις Κάτω Χώρες (6%) (Selot et al,2019). Τέλος, τα τελευταία χρόνια δόθηκε έμφαση στην ανάπτυξη των ΥΦΑ σε βαθύτερα ύδατα (Ruccell,2019, Costoya,et al, 2019), όπου είναι προτιμότερες οι πλωτές δομές στήριξης. Για παράδειγμα, έχουν αναπτυχθεί χρήσιμες μεθοδολογίες για τον ακριβή προσδιορισμό όλων των σχετικών οικονομικών μεταβλητών απόφασης των πλωτών OWF (Castro-Santos,2016), για την πρόταση των βέλτιστων τεχνολογικών εναλλακτικών λύσεων (Castro-Santos et al,2017) και για την ανάλυση των μελλοντικών αιολικών πόρων σε βαθύτερα ύδατα (Costoya,et al, 2019).

Μια σημαντική διαδικασία για την εγκατάσταση των OWF είναι ο προσδιορισμός των περιοχών που είναι κατάλληλες για την εγκατάσταση των υπεράκτιων ενεργειακών συστημάτων. Η επιλογή της περιοχής για τη χρήση των OWF αντιστοιχεί σε ένα πολυδιάστατο ζήτημα λήψης αποφάσεων. Αν και στη βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές εφαρμογές σε διάφορες κλίμακες χωροταξικού σχεδιασμού (Mahdy,Bahaj, 2018), οι εφαρμογές χωροθέτησης OWF σε εθνική κλίμακα είναι πραγματικά ελάχιστες. Μόνο πέντε από τις δεκαεπτά (Mahdy,Bahaj, 2018,Hong,Moller,2011, Vagiona,Karanikolas,2012,Moller , 2011,Argin et al 2019), αναφέρονται σε αναλύσεις καταλληλότητας θέσης σε εθνική κλίμακα χωροταξικού σχεδιασμού. Πιο συγκεκριμένα, οι (Mahdy,Bahaj, 2018) εφάρμοσαν πέντε παράγοντες και επτά περιορισμούς χρησιμοποιώντας πολυκριτήρια μοντέλα λήψης αποφάσεων και GIS για να παρέχουν έναν χάρτη καταλληλότητας για την υπεράκτια αιολική ενέργεια στην Αίγυπτο. Η ανάλυση διεξήχθη σε μεγάλη κλίμακα που κάλυπτε ολόκληρη την Αίγυπτο και τα γύρω ύδατα. Το δυναμικό μεγάλης κλίμακας της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας της Κίνας από την άποψη των σημερινών τεχνικών, χωρικών και οικονομικών περιορισμών και της πιθανής συμβολής της στο ενεργειακό σύστημα της χώρας διερευνήθηκε στο (Hong,Moller,2011). Με τη βοήθεια ενός εργαλείου βασισμένου σε ΓΣΠ, το υπεράκτιο αιολικό δυναμικό αξιολογήθηκε ως συνδυασμός

των αιολικών πόρων, των τεχνικών προβλέψεων των ανεμογεννητριών, του οικονομικού κόστους και των χωρικών περιορισμών των υπεράκτιων αιολικών πάρκων.

Αναπτύχθηκαν επίσης καμπύλες ισοσταθμισμένου κόστους παραγωγής και κόστους προσφοράς υπεράκτιας αιολικής ενέργειας ανά τοποθεσία. Μια διαδικασία λήψης αποφάσεων σε δύο στάδια υιοθετήθηκε στο (Vagiona, Karanikolas, 2012) για την αξιολόγηση των θέσεων για υπεράκτια αιολικά πάρκα στην Ελλάδα. Οι ακατάλληλες τοποθεσίες απορρίφθηκαν αρχικά με τη χρήση GIS και τριών περιοριστικών παραγόντων, ενώ οι υπόλοιπες τοποθεσίες αξιολογήθηκαν με τη μέθοδο AHP και πέντε κριτήρια αξιολόγησης. Ένα χωρικό μοντέλο για την αξιολόγηση του δυναμικού υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, του κόστους παραγωγής και του προσδιορισμού των κατάλληλων περιοχών με βάση τα ΓΣΠ παρουσιάστηκε στο (Moller, 2011) και εφαρμόστηκε σε ένα τμήμα της Αποκλειστικής Οικονομικής Ζώνης (ΑΟΖ) της Δανίας. Τέλος, διενεργήθηκε πολυκριτήρια ανάλυση επιλογής χώρου λαμβάνοντας υπόψη τεχνικούς, κοινωνικούς και πολιτικούς περιορισμούς για την εύρεση των καταλληλότερων θέσεων υπεράκτιων αιολικών πάρκων στην Τουρκία μεταξύ των 55 παράκτιων περιοχών, συμπεριλαμβανομένων των τεχνικών δυνατοτήτων ισχύος τους (Argin et al., 2019). Λαμβάνοντας υπόψη τα εργαλεία και τις τεχνικές που έχουν εφαρμοστεί μέχρι στιγμής στη βιβλιογραφία για τη χωροθέτηση OWF, αρκετοί ερευνητές έχουν εφαρμόσει πολυκριτήριες τεχνικές για την κατάταξη εναλλακτικών λύσεων χωροθέτησης OWF (Mahdy, Bahaj, 2018, Stefanakou, Nikitakos, 2016, Vagiona, Karanikolas, 2012), υποδεικνύοντας ότι η πολυκριτήρια ανάλυση αποφάσεων διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη χωροθέτηση OWF. Τα ΓΣΠ παρουσιάζουν επίσης ένα σημαντικό εργαλείο για τον εντοπισμό και την επιλογή των κατάλληλων περιοχών για την εγκατάσταση αιολικών πάρκων είτε στην ξηρά είτε στο θαλάσσιο περιβάλλον (Christidis, Law, 2012). Έχει χρησιμοποιηθεί σε παγκόσμιο επίπεδο σε πολλές χώρες για την επιλογή της τοποθεσίας των χερσαίων αιολικών έργων, όπως στην Αίγυπτο (Mahdy, Bahaj, 2018), στο Οχάιο-ΗΠΑ (Mekonnen, Gorsevski, 2015), στην Κίνα (Hong, Moller, 2011), στην Ελλάδα (Χριστοφοράκη, Τσούτσος, 2017, Βαγιωνά, Καρανικόλας, 2012), στη Νότια Κορέα (Kim et al., 2018), στην Ισπανία (Schulleberg-Rodriguez, Montesdeoca, 2018), στην Ταϊλάνδη (Waewsak et al., 2015) κ.λπ.

Αυτό που λείπει από την τρέχουσα βιβλιογραφία και πρακτική είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου στρατηγικού σχεδίου για την αποτελεσματική και βιώσιμη εκμετάλλευση του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού και τη σχετική ανάπτυξη των ΟΣΠ. Στην παρούσα διατριβή παρουσιάζεται μια νέα μεθοδολογία στρατηγικού σχεδιασμού για τον εντοπισμό και την ιεράρχηση κατάλληλων περιοχών για υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις, η οποία αντιμετωπίζει ένα κενό γνώσης στον τομέα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό, η παρούσα εργασία χρησιμοποιεί μια μελέτη περίπτωσης σε όλη τη χώρα (Ελλάδα), όπου εφαρμόζεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην Ελλάδα δεν έχουν αναπτυχθεί μέχρι στιγμής OWFs.

Η μεθοδολογία που προτείνεται και εφαρμόζεται περιλαμβάνει την εφαρμογή πέντε διακριτών σταδίων που αντιστοιχούν σε: (ii) τον προσδιορισμό των κατάλληλων περιοχών για τη χωροθέτηση των ΟΣΔ βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων αποκλεισμού, (iii) τον καθορισμό της χωροθέτησης των ΟΣΔ στις προαναφερθείσες περιοχές, (iv) τον υπολογισμό του συνολικού κόστους επένδυσης των ΟΣΔ (έργων) με τον υπολογισμό των κεφαλαιακών δαπανών (CAPEX), των λειτουργικών δαπανών (OPEX) και των δαπανών παροπλισμού (DECEX) και, τέλος, (v) την ανάλυση χαρτοφυλακίου βάσει επτά κριτηρίων αξιολόγησης.

Ένα κρίσιμο πλεονέκτημα της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι ότι αντιμετωπίζει τα υφιστάμενα κενά σε θέματα χωροθέτησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), μέσω: (i) εισάγει μια ολιστική, βήμα προς βήμα, μεθοδολογία χωροθέτησης ΑΠΕ, η οποία εξετάζει όλα τα σχετικά κρίσιμα ζητήματα που πρέπει να αναλύσει και να επιλύσει ένας κατασκευαστής ΑΠΕ ή/και ένας ενεργειακός σχεδιαστής, (ii) παρέχει μια μακροπρόθεσμη προσέγγιση σχεδιασμού (25 χρόνια, μετά την εφαρμογή του σχεδίου) και (iii) αναγνωρίζει μια διεπιστημονική προσέγγιση, καθώς εξετάζει νομικά, τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά, κοινωνικά και πολιτικά ζητήματα. Το τελικό αποτέλεσμα είναι η αξιολόγηση και η κατάταξη όλων των προτάσεων έργων του ΟΣΕ λαμβάνοντας υπόψη τη στρατηγική τους αξία και τους περιορισμούς κόστους. Η προτεινόμενη μεθοδολογία μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί και σε άλλες περιοχές ακολουθώντας τα προαναφερθέντα πέντε στάδια. Η καινοτομία της εργασίας

έγκειται τόσο στην ίδια την ολοκληρωμένη μεθοδολογία (στρατηγικός χωροταξικός σχεδιασμός) όσο και στα εργαλεία και τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση.

Πιο συγκεκριμένα, τα ΓΣΠ χρησιμοποιούνται με διττό τρόπο στην παρούσα εργασία: (i) για τον εντοπισμό των καταλληλότερων περιοχών (ΠΕ) για Α/Γ στην Ελλάδα και (ii) για τον προσδιορισμό της διάταξης και για πρώτη φορά των ακριβών συντεταγμένων θέσης των ανεμογεννητριών σε κάθε Α/Γ (χαρτογράφηση Α/Γ και προσδιορισμός μικρο-τοποθέτησης) και, συνεπώς, της ενεργειακής ισχύος των έργων. Η εκτίμηση των ακριβών συντεταγμένων θέσης των ανεμογεννητριών σε ένα OWF είναι ένα κρίσιμο ζήτημα στη φάση του σχεδιασμού και θα πρέπει να πραγματοποιηθεί πριν από τη φάση της κατασκευής τέτοιων έργων μεγάλης κλίμακας. Επιπλέον, η παρούσα διατριβή προτείνει για πρώτη φορά την ιεράρχηση των έργων OWF (και, συνεπώς, τον προσδιορισμό των βέλτιστων θέσεων για την εγκατάσταση OWF) μέσω της ανάλυσης χαρτοφυλακίου. Η ανάλυση χαρτοφυλακίου περιλαμβάνει μια συλλογή έργων/προτάσεων που θα ανταγωνίζονται για επιλογή με βάση το κόστος τους σε σχέση με τη στρατηγική τους αξία. Το εργαλείο Microsoft Project Server, το οποίο ενσωματώνει τεχνικές πολυκριτήριας αξιολόγησης και μαθηματικές

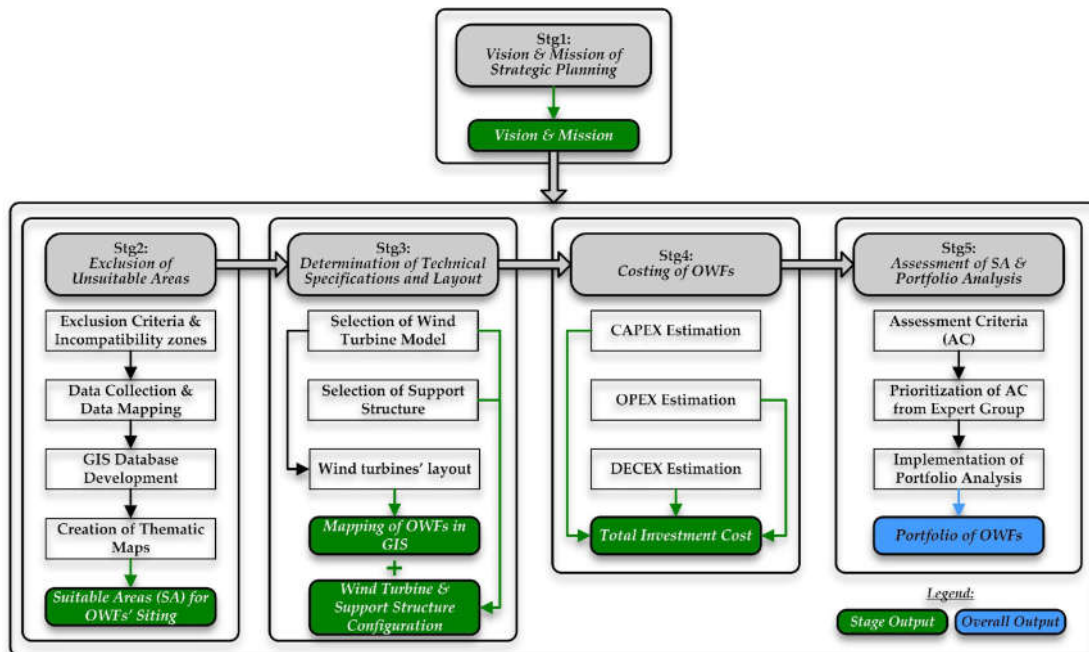
βελτιστοποίησης, χρησιμοποιείται για πρώτη φορά στο θέμα της χωροθέτησης των ΥΗΣ, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η απαιτούμενη ανάλυση χαρτοφυλακίου και τα στρατηγικά σενάρια σε σχέση με τις ενεργειακές ανάγκες της χώρας.

Τέλος, στην προτεινόμενη μεθοδολογία χρησιμοποιούνται συνολικά είκοσι κριτήρια (αποκλεισμού και αξιολόγησης) και το παρόν πλαίσιο υποστήριξης της καταλληλότητας των χώρων καλύπτει σχεδόν πλήρως τις οικονομικές, κοινωνικές, πολιτικές, τεχνικές και περιβαλλοντικές διαστάσεις του προβλήματος χωροθέτησης των ΟΥΚ σε εθνική κλίμακα χωροταξικού σχεδιασμού. Η προτεινόμενη μεθοδολογία αξιοποιεί ορισμένα κριτήρια και περιορισμούς προηγούμενων μελετών (π.χ. ταχύτητα ανέμου, βάθος νερού, απόσταση από προστατευόμενες περιοχές), ενώ εισάγει καινοτόμα κριτήρια σε σχέση με τα ζητήματα χωροθέτησης των ΟΥΚ. Κριτήρια αποκλεισμού, όπως ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας, προστασία τοπίου/οπτική και ακουστική όχληση, καθώς και κριτήρια αξιολόγησης (ΚΑ), όπως η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και η απόσταση από περιοχές στρατιωτικών ασκήσεων (πεδία βολής και θέσεις ασκήσεων), εφαρμόζονται για πρώτη φορά σε εθνική κλίμακα σχεδιασμού.

Το κεφάλαιο αυτό διαρθρώνεται σε οκτώ ενότητες. Στην ενότητα 2 παρουσιάζεται συνοπτικά η προτεινόμενη μεθοδολογία. Στην ενότητα 3 ορίζονται τα κριτήρια αποκλεισμού και οι σχετικές ζώνες αποκλεισμού και παρουσιάζονται οι πηγές και η μέθοδος επεξεργασίας των απαιτούμενων χωρικών δεδομένων. Στην ενότητα 4 παρουσιάζονται οι κύριες τεχνικές προδιαγραφές των υπεράκτιων ανεμογεννητριών (π.χ. ορισμός της καταλληλότερης δομής στήριξης) και τα χαρακτηριστικά διάταξής τους που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη. Στην ενότητα 5 περιγράφεται η μέθοδος που εφαρμόστηκε για την εκτίμηση των CAPEX, OPEX και DECEX κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής των έργων και, συνεπώς, του συνολικού κόστους επένδυσης των έργων του χαρτοφυλακίου. Η Ενότητα 6 περιλαμβάνει την περιγραφή των κριτηρίων που χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των ΣΑ για τη χωροθέτηση ΟΣΔ και της ανάλυσης του χαρτοφυλακίου, ενώ στην Ενότητα 7 παρουσιάζονται και συζητούνται τα αποτελέσματα όλων των σταδίων του μεθοδολογικού πλαισίου. Τέλος, στην ενότητα 8 παρατίθενται τα συμπεράσματα του παρόντος κεφαλαίου.

2.2 Υλικά και μέθοδοι

Προκειμένου να προσδιοριστούν οι πλέον κατάλληλες, βιώσιμες, τεχνικά και οικονομικά βιώσιμες λύσεις για τη χωροθέτηση υπεράκτιων αιολικών έργων στην Ελλάδα, αναπτύσσεται και εφαρμόζεται στο παρόν κεφάλαιο η μεθοδολογία στρατηγικού σχεδιασμού που παρουσιάζεται στο Σχήμα 1. Το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο αποτελείται από πέντε στάδια, τα οποία αναλύονται παρακάτω.



Σχήμα 2.1. Προτεινόμενη μεθοδολογία στρατηγικού σχεδιασμού για τη χωροθέτηση υπεράκτιων αιολικών πάρκων στην Ελλάδα.

Στάδιο 1 (Stg1)-Όραμα και αποστολή του στρατηγικού σχεδιασμού

Στο πρώτο στάδιο ορίζεται το όραμα και η αποστολή του στρατηγικού σχεδιασμού, στα οποία βασίζονται τα επόμενα τέσσερα στάδια. Το στάδιο αυτό προσεγγίζεται μέσω ενός συνδυασμού προληπτικής και εμπειρικής στρατηγικής (Fred & Forest, 2017). Λαμβάνεται υπόψη η τρέχουσα κατάσταση στην εξεταζόμενη χώρα, όσον αφορά το ζήτημα της ενεργειακής ανεξαρτησίας, καθώς και η μελλοντική ζήτηση για την παραγωγή μεγάλου αριθμού δημόσιων αγαθών, όπως η ηλεκτρική ενέργεια, με απώτερο στόχο την εξαγωγή της τελευταίας και, ως εκ τούτου, τη βελτίωση της τρέχουσας οικονομικής κατάστασης της χώρας. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί ότι στην Ελλάδα στο τέλος Ιουνίου 2018, η συνολική αιολική ισχύς, που παράγεται μόνο από χερσαίες ανεμογεννήτριες, ήταν 2690,5 MW, παρουσιάζοντας αύξηση μόλις 1,5% ή 39,2 MW σε σχέση με το τέλος του 2017 (Ελληνική Ένωση Αιολικής Ενέργειας 2018). Έτσι, το άφθονο αιολικό δυναμικό που υπάρχει στο ελληνικό θαλάσσιο περιβάλλον παραμένει ακόμη ανεκμετάλλευτο. Επιπλέον, η εθνική προσπάθεια για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου επικεντρώνεται στον ενεργειακό τομέα. Το σχέδιο πολιτικής για την Ελλάδα "Εθνικό ενεργειακό σχέδιο: Οδικός χάρτης έως το 2050" αναρτήθηκε από το Υπουργείο Ενέργειας, Περιβάλλοντος και Κλιματικής Αλλαγής το 2012 (Georgoroulou, Mirasgedis, Sarafidis, Koutentaki, Lalas, Gakis, 2014). Ο οδικός χάρτης στόχευε στη μείωση των εκπομπών CO₂ από τον ενεργειακό

τομέα κατά 60%-70% έως το 2050 σε σχέση με το 2005, με το 85%-100% της ηλεκτρικής ενέργειας να προέρχεται από ΑΠΕ (Georgoroulou et al,2014).

Στάδιο 2 (Stg2)-Αποκλεισμός ακατάλληλων περιοχών

Το συγκεκριμένο στάδιο βασίζεται στη χρήση του εργαλείου χαρτογράφησης GIS. Περιλαμβάνει τον αποκλεισμό των περιοχών που κρίνονται ακατάλληλες για τη χωροθέτηση ΟΣΔ, μέσω της εφαρμογής διαφόρων κριτηρίων αποκλεισμού, με αποτέλεσμα τον καθορισμό των ΣΑ σε εθνικό επίπεδο. Τα κριτήρια αποκλεισμού καθορίζονται με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης περιοχής, λαμβάνοντας υπόψη και τις σχετικές διατάξεις του Ελληνικού Ειδικού Πλαισίου Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΕΠΧΣΑΑ-ΑΠΕ) (Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, 2008).

Στάδιο 3 (Stg3)-Καθορισμός τεχνικών προδιαγραφών και διάταξης

Το στάδιο αυτό ασχολείται με τεχνικά ζητήματα που σχετίζονται με τέτοια έργα, όπως η επιλογή του μοντέλου τύπου της ανεμογεννήτριας (συγκρότημα ρότορα-κάτουρας), η επιλογή του καταλληλότερου τύπου δομής στήριξης κ.λπ. Οι απαιτούμενες τεχνικές προδιαγραφές καθορίζονται από τα ακόλουθα στοιχεία: (i) τα ειδικά χαρακτηριστικά των κατάλληλων περιοχών, δηλαδή η ταχύτητα του ανέμου, η κατεύθυνση του ανέμου, το βάθος του νερού και

διαθέσιμη επιφάνεια/σχήμα των προτεινόμενων χώρων και, επίσης, ii) μελέτη παρόμοιων έργων που έχουν ολοκληρωθεί και λειτουργούν πλήρως ή μερικώς μέχρι σήμερα (4γ Υπεράκτια). Επιπλέον, με τη χρήση GIS, οι ΟΥΚ χωροθετούνται εντός της ΣΑ που προσδιορίζεται στο στάδιο 2.

Στάδιο 4 (Stg4)-Κόστος των OWFs

Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την εκτίμηση των CAPEX, OPEX και DECEX όλων των προτεινόμενων έργων, λαμβάνοντας υπόψη τα διαθέσιμα στοιχεία παρόμοιων ολοκληρωμένων έργων που βρίσκονται ακόμη σε λειτουργία (4c Offshore).

Στάδιο 5 (Stg5)-Αξιολόγηση της ΣΑ και ανάλυση χαρτοφυλακίου

Στο τελικό στάδιο της προτεινόμενης μεθοδολογίας, δημιουργείται το χαρτοφυλάκιο έργων για τον στρατηγικό σχεδιασμό των ΟΤΔ στην Ελλάδα και πραγματοποιείται η ανάλυσή του. Η προσέγγιση ανάλυσης αποφάσεων χαρτοφυλακίου συνδυάζει την πολυκριτήρια αξιολόγηση και τη μαθηματική βελτιστοποίηση και χαρακτηρίζεται από τα ακόλουθα στοιχεία: (i) σχηματισμό ενός χαρτοφυλακίου προτάσεων έργων (βασικός στόχος), λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλούς στόχους, αλληλεπιδράσεις και περιορισμούς πόρων, (ii) αποτύπωση των προτιμήσεων των φορέων λήψης αποφάσεων σχετικά με τους στόχους με τη χρήση μιας συνάρτησης αξίας πολλαπλών χαρακτηριστικών, (iii) εφαρμογή ακέραιης βελτιστοποίησης για την απόκτηση του εφικτού χαρτοφυλακίου με τη μεγαλύτερη συνολική στρατηγική αξία και (iv) πιθανή εφαρμογή διαδραστικών αναλύσεων "what-if" για την εξέταση του τρόπου με τον οποίο μεταβάλλεται το βέλτιστο χαρτοφυλάκιο δράσεων σε απόκριση σε αλλαγές στις παραμέτρους ή τους περιορισμούς του μοντέλου [Lahtinen, Hämmäläinen, Liesiö, 2017]. Στόχος του συγκεκριμένου σταδίου είναι ο υπολογισμός της στρατηγικής αξίας των προτεινόμενων έργων με βάση συγκεκριμένο ΑΚ και η ιεράρχηση της υλοποίησης των έργων του χαρτοφυλακίου. Οι ΑΚ προκύπτουν κυρίως από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ΑΣ και η ιεράρχησή τους επιτυγχάνεται με τη συμβολή μιας ομάδας εμπειρογνομόνων (ΟΕ) σε θέματα χωροθέτησης ΑΠΕ και ειδικότερα ΟΣΔ, μέσω έρευνας ερωτηματολογίου. Η ανάλυση του χαρτοφυλακίου πραγματοποιείται με τη χρήση του λογισμικού Microsoft Project Portfolio Server. Διατυπώνονται διάφορα σενάρια ενεργειακής πολιτικής για τη χώρα με βάση τους οικονομικούς περιορισμούς.

2.3 Κριτήρια αποκλεισμού και συλλογή δεδομένων/ψηφιοποίηση

Κριτήρια αποκλεισμού

Η περιοχή μελέτης ορίζεται από την ΑΟΖ της Ελλάδας και κάθε περιοχή εκτός αυτής αποκλείεται νομικά. Η ΑΟΖ μιας χώρας ή αλλιώς τα Εθνικά Χωρικά Ύδατα, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, λαμβάνεται επίσημα υπόψη, ως κριτήριο χωροθέτησης, (Schallenberg-Rodriguez, Montesdeoca, 2018 , Chaouachi, Covrig, Ardelean, 2017, Argin, Yerci, 2015, Yue, Yang, 2009). Τα κριτήρια αποκλεισμού που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία αναλύονται παρακάτω.

Ταχύτητα ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου είναι ένα σημαντικό κριτήριο για την επιλογή της τοποθεσίας ενός ΟΣΔ, καθώς συνδέεται άμεσα με την οικονομική σκοπιμότητα του έργου. Ως εκ τούτου, η ακριβής και λεπτομερής ανάλυση των ανεμολογικών δεδομένων είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση της πιθανής αιολικής ενέργειας στις προτεινόμενες κατάλληλες τοποθεσίες. Στην παρούσα μελέτη παρέχονται δεδομένα ταχύτητας ανέμου με

βάση μετρήσεις που πραγματοποιούνται σε ύψος 80 m σε ωριαία βάση και περιλαμβάνουν μετρήσεις για 10 έτη (2009-2018). Στην παρούσα ανάλυση καταλληλότητας των χώρων, οι θαλάσσιες περιοχές, όπου η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη από 6 m/s σε ύψος 80 m πάνω από τη μέση στάθμη του νερού, θεωρούνται ακατάλληλες για τη χωροθέτηση OWF (Schallenberg- Rodriguez, Montesdeoca, 2018).

Βάθος νερού

Το βάθος του νερού είναι ένα από τα βασικά κριτήρια για τη χωροθέτηση των ΟΥΚ, καθώς συμβάλλει σημαντικά στον καθορισμό του κόστους επένδυσης των έργων αυτών (Ng, Ran, 2016). Συγκεκριμένα, το βάθος των υδάτων επηρεάζει την επιλογή της δομής στήριξης της ανεμογεννήτριας, καθώς και το CAPEX και το OPEX ενός έργου OWF, τα οποία αυξάνονται σημαντικά στα βαθύτερα ύδατα. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τους Lynch, Murphy, Serri, & Airolidi, (2012), μπορεί να υποτεθεί ότι με το βάθος του νερού το κόστος αυξάνεται λόγω του κόστους πρόσδεσης, αγκυροβολίας και καλωδίωσης στα βαθύτερα ύδατα. Στην παρούσα έρευνα, το μέγιστο όριο του βάθους νερού ορίζεται στα 500 μέτρα (Schallenberg-Rodriguez, Nontesdeoca, 2018, Lynch et al, 2012, Vasileiou, Loukogeorgaki, Vagiona, 2017).

Στρατιωτικές ζώνες

Αυτές οι θαλάσσιες περιοχές χρησιμοποιούνται επίσημα από τον Εθνικό Στρατό είτε για σκοπούς εκπαίδευσης είτε ως πεδία βολής και, ως εκ τούτου, δεν μπορούν να θεωρηθούν για οποιαδήποτε άλλη χρήση. Το παρόν κριτήριο λαμβάνεται υπόψη από τους (Mahdy,Bahaj,2018,Kim et al, 2018 ,Argin,Yerci,2015 , Ou, Xu, Yue, Ma, Teng, Dong,. 2018 ,Vasileiou et al,2017).

Ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας

Ο παράγοντας της σεισμικής επικινδυνότητας θα πρέπει να λαμβάνεται γενικά υπόψη κατά τη διαδικασία επιλογής της τοποθεσίας για τη μείωση του κόστους κατασκευής. Η Ελλάδα αντιστοιχεί σε μία από τις πιο σεισμικά ενεργές χώρες παγκοσμίως. Ως εκ τούτου, όλες οι υποδομές θα πρέπει να σχεδιάζονται επαρκώς έναντι σεισμού. Στην περίπτωση των Α/Γ, το γεγονός αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ειδικούς σχεδιασμούς της δομής στήριξης των ανεμογεννητριών και, ως εκ τούτου, σε μεγαλύτερο κόστος κατασκευής. Έτσι, εξαιρούνται οι περιοχές που ανήκουν στη Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας III (0,36 g) στην Ελλάδα. Το παρόν κριτήριο δεν έχει εξεταστεί μέχρι στιγμής σε καμία άλλη μελέτη χωροθέτησης Α/Γ διεθνώς, ενώ έχει προταθεί ως κριτήριο επιλογής περιοχών κατάλληλων για την ανάπτυξη Α/Γ στη Νότια Κορέα από τους Kim, Kang, Oh, Lee, Ryu, (2010), αλλά δεν εξετάστηκε ως κριτήριο επιλογής περιοχής στη μελέτη τους.

Υποβρύχια καλώδια

Αυτό το κριτήριο αποκλεισμού αναφέρεται στα καλώδια που υπάρχουν ήδη στον πυθμένα της θάλασσας και χρησιμεύουν είτε για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας είτε για τηλεπικοινωνιακούς σκοπούς (π.χ. (Mahdy,Bahaj,2018 ,Stefanakou,Nikitakos,2016 ,Argin,Yerci,2015 ,Ou et al,2018). Είναι σημαντικό να εξεταστούν οι υποβρύχιες διαδρομές των εν λόγω καλωδίων, προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν ζημιές σε αυτά κατά τη διαδικασία εγκατάστασης των αναπτύξεων των ΟΥΚ.

Απόσταση από τα λιμάνια

Η απόσταση ενός έργου OWF από έναν λιμένα αποτελεί σημαντικό παράγοντα που επηρεάζει το συνολικό κόστος επένδυσης, καθώς έχει άμεσο αντίκτυπο στο κόστος εγκατάστασης, στο κόστος λειτουργίας και συντήρησης, καθώς και στο κόστος παροπλισμού του OWF (Myhr, Bjerkseter, Ågotnes, Nygaard, 2014). Συγκεκριμένα, το συνολικό κόστος επένδυσης μειώνεται όσο η θέση ενός OWF βρίσκεται πιο κοντά σε έναν υφιστάμενο λιμένα, ενώ, επιπλέον, η εγγύτητα της περιοχής εγκατάστασης σε έναν λιμένα απλοποιεί τη συνολική διαχείριση του έργου (π.χ. δεν χρειάζεται να εγκατασταθεί υποσταθμός εντός του θαλάσσιου περιβάλλοντος). Το κριτήριο αυτό έχει ληφθεί υπόψη κατά την επιλογή του τόπου εγκατάστασης υβριδικών υπεράκτιων συστημάτων αιολικής και κυματικής ενέργειας στην Ελλάδα (Vasileiou et al,2017). Το επιλεγμένο όριο της απόστασης από έναν εγγώριο λιμένα ορίζεται στην παρούσα εργασία στα 100 χλμ. και αποκλείονται θαλάσσιες περιοχές που απέχουν περισσότερο από τα 100 χλμ.

Απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο υψηλής τάσης

Η απόσταση ενός OWF από το εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας και ιδίως από ένα δίκτυο υψηλής τάσης είναι εξαιρετικά σημαντική για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους. Επιλέγεται η σύνδεση με το δίκτυο υψηλής τάσης, διότι στην αντίθετη περίπτωση (σύνδεση με δίκτυο μέσης ή χαμηλής τάσης) μπορεί να υπάρξει σοβαρός κίνδυνος καταστροφής του καλωδίου λόγω υπερφόρτωσης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας (Chaouachi, Covrig, Ardelean, 2017, Waewsak et al,2015,Lynch et al, 2012). Υπάρχουν μελέτες που θέτουν την απόσταση των υποψήφιων περιοχών χωροθέτησης από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας σε

όριο 200 km (Mahdy,Bahj,2018 ,Myhr et al,2014), ενώ υπάρχουν άλλες που μειώνουν το όριο αυτό στα 60 km (Chaouachi et al,2017)ή ακόμη και στα 40 km (Waewsak et al, 2015). Στο παρόν κεφάλαιο επιλέχθηκε το όριο των 100 km από το υφιστάμενο και το δυνητικό επίσημα εγκεκριμένο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης. Επιπλέον, ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για την ανάπτυξη των ΟΤΣ είναι η αξιολόγηση της χωρητικότητας του δικτύου. Στην Ελλάδα, ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) Α.Ε. αναλαμβάνει το ρόλο του διαχειριστή συστήματος μεταφοράς για το Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (δίκτυο μέσης και υψηλής τάσης). Το 2018, ο ΔΠΤΟ δημοσίευσε ένα εγκεκριμένο μελλοντικό σχέδιο για τη χωρική ανάπτυξη των δικτύων μέσης και υψηλής τάσης στην Ελλάδα ως στόχο για το 2027 (Admie). Σε αυτό το σχέδιο, η πλειονότητα των νησιών που βρίσκονται τόσο κοντά όσο και μακριά από την ηπειρωτική χώρα δεν διαθέτουν δίκτυα μέσης και υψηλής τάσης. Ως εκ τούτου, είναι αδύνατο και οικονομικά μη βιώσιμο να βρεθούν θέσεις για την ανάπτυξη ΥΗΕ σε μεγάλη απόσταση από την ηπειρωτική χώρα στο εγγύς μέλλον. Μια λεπτομερέστερη ανάλυση της χωρητικότητας του δικτύου θα μπορούσε να είναι χρήσιμη για την ανάπτυξη των OWF, αλλά η ανάλυση αυτή δεν εμπίπτει στο πεδίο εφαρμογής της παρούσας μελέτης.

Προστασία τοπίου/οπτική και ακουστική όχληση

Το παρόν κριτήριο σχετίζεται με την απόσταση ενός ΟΣΔ από την ακτή και έχει χρησιμοποιηθεί για να διασφαλιστεί η προστασία του τοπίου, η αποφυγή οπτικών και ακουστικών διαταραχών και η κοινωνική αποδοχή ενός ΟΣΔ (Kim et al,2018,Moller,2011). Στην παρούσα μελέτη, οι θαλάσσιες περιοχές με απόσταση από την ακτή μικρότερη των 20 χιλιομέτρων θεωρούνται ακατάλληλες για τη χωροθέτηση OWF και αποκλείονται από την περαιτέρω ανάλυση. Το όριο αυτό ορίζεται με βάση (Lynch et al,2012). Επιπλέον, τα 20 km εξασφαλίζουν απόσταση τουλάχιστον 130 φορές το συνολικό ύψος της επιλεγμένης υπεράκτιας ανεμογεννήτριας, προκειμένου να αποφευχθούν οι οπτικές και ακουστικές επιπτώσεις του έργου.

Απόσταση από διαδρομές ναυτιλίας

Η ύπαρξη ασφαλών οδών ναυσιπλοΐας που συνδέουν την πληθώρα των ελληνικών νησιών με την ηπειρωτική χώρα είναι ένα εξαιρετικά σημαντικό ζήτημα. Προκειμένου να διασφαλιστεί η προστασία της ναυτιλιακής κίνησης είτε για εμπορικούς είτε για τουριστικούς σκοπούς, επιλέγεται μια απόσταση ασφαλείας περίπου 5 χιλιομέτρων (3 μιλίων) από τις αναφερόμενες διαδρομές (Mekonnen ,Gorsevski,2015, Βαγιονά,Καμηλάκης,2018).

Απόσταση από θαλάσσιες προστατευόμενες περιοχές

Στην παρούσα διατριβή, οι θαλάσσιες προστατευόμενες περιοχές αντιστοιχούν σε Τόπους Κοινοτικής Σημασίας (ΤΚΣ) του Natura 2000, σε εθνικά θαλάσσια περιβαλλοντικά πάρκα, σε παράκτια ύδατα κολύμβησης που παρακολουθούνται και αξιολογούνται στο πλαίσιο του προγράμματος παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων κολύμβησης σύμφωνα με τις διατάξεις της οδηγίας 2006/7/ΕΚ και σε παραλίες κολύμβησης που έχουν βραβευτεί με τη γαλάζια σημαία. Στην παρούσα εργασία, η ελάχιστη απόσταση από θαλάσσιες προστατευόμενες περιοχές επιλέγεται ίση με 2 χλμ, όπως σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες (Χριστοφοράκη, Τσούτσος,2017,Vagiona,Kamilakis,2018 ,Moller,2011) το σχετικό όριο απόστασης ορίζεται στα 1-2 χλμ.

Απόσταση από καταφύγια άγριας ζωής και διαδρόμους μετανάστευσης

Το κριτήριο αυτό περιλαμβάνει τους διαδρόμους μετανάστευσης και τους υγροτόπους διεθνούς σημασίας, όπως ορίζονται σύμφωνα με τη Σύμβαση Ραμσάρ. Το συγκεκριμένο κριτήριο εξετάζεται προκειμένου να μειωθεί ο πιθανός κίνδυνος σύγκρουσης των πτηνών με τις ανεμογεννήτριες, κυρίως κατά τη διάρκεια της μεταναστευτικής περιόδου. Η εγκατάσταση Α/Γ θα πρέπει να αποφεύγεται εντός των ορίων των αναφερόμενων περιοχών που φιλοξενούν ποικιλία πτηνών. Λαμβάνεται υπόψη μια ζώνη αποκλεισμού 3 km (Hong,Moller,2011,Vagiona,Kamilakis,2018).

Απόσταση από οικιστικό δίκτυο

Σύμφωνα με το εθνικό νομοθετικό πλαίσιο (SFSDSP-RES) (MEECC,2008) λαμβάνονται υπόψη ελάχιστες αποστάσεις από οικισμούς και από παραδοσιακούς οικισμούς ίσες με 1 χλμ. και 1,5 χλμ. αντίστοιχα.

Με βάση όλα τα παραπάνω, ο Πίνακας 1 συνοψίζει τα κριτήρια αποκλεισμού που εξετάζονται στην παρούσα εργασία και τις ζώνες ασυμβατότητάς τους.

Πίνακας 1. Κριτήρια αποκλεισμού και ζώνες ασυμβατότητας.

Όχι.	Κριτήριο αποκλεισμού	Παράγοντας	Ακατάλληλες περιοχές
------	----------------------	------------	----------------------

EK.1	Αποκλειστική Οικονομική Ζώνη	Νομικό	Εκτός των ορίων
EC.2	Ταχύτητα ανέμου	Οικονομική	<6 m/s
EC.3	Βάθος νερού	Οικονομικά/Τεχνικά	>500 m
EC.4	Στρατιωτικές ζώνες	Πολιτικά/περιοριστι κά	Όλα
EC.5	Ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας	Προστατευτικό/περι οριστικό	Ζώνη III (0,36g)
EC.6	Υποβρύχια καλώδια	Προστατευτικό/τεχνι κό/περιοριστικό	Όλα
EC.7	Απόσταση από τα λιμάνια	Οικονομικά/Τεχνικά	>100 km
EK.8	Απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο υψηλής τάσης	Οικονομικά/Τεχνικά	>100 km
	Προστασία τοπίου/οπτική και ακουστική όχληση	0 km	Κοινωνικά/πολιτικά/προστατευτικά ≤2
	EC.10 Απόσταση από ναυτιλιακές διαδρομές		

Κοινωνικά/πολιτικά/προστατευτικά \approx 5km EC.11 Απόσταση από θαλάσσιες

προστατευόμενες περιοχές Περιβαλλοντικά/προστατευτικά \leq 2 km

Απόσταση από καταφύγια άγριας ζωής
και διαδρόμους μετανάστευσης km Περιβαλλοντικό/προστατευτικό \leq 3

EC.13 Απόσταση από δίκτυο κατοικίας Νομική κοινωνική προστασία \leq 1,5 km

2.4 Συλλογή δεδομένων/ψηφιοποίηση

Προκειμένου να προσδιοριστούν και να αναλυθούν όλα τα περιβαλλοντικά, οικονομικά, τεχνικά, νομικά και πολιτικά χαρακτηριστικά της ΑΟΖ της Ελλάδας, ήταν απαραίτητο να συλλεχθούν και να ψηφιοποιηθούν κατάλληλα, εάν ήταν απαραίτητο, ορισμένα δεδομένα γεωγραφικών πληροφοριών από εθνικά ινστιτούτα, ερευνητικά κέντρα, υπηρεσίες και επίσημες διεθνείς και εθνικές ιστοσελίδες που παρέχουν επίσημα εγκεκριμένα χαρτογραφικά δεδομένα.

Πιο συγκεκριμένα, τα ψηφιακά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη σε αντιστοιχία με τον υπεύθυνο φορέα/πηγή είναι τα εξής: (i) Δεδομένα βάθους νερού που ελήφθησαν από την Υδρογραφική Υπηρεσία του Ελληνικού Πολεμικού Ναυτικού (HNHS). (ii) Δεδομένα ταχύτητας ανέμου που παρέχονται από το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών. (iii) Δεδομένα της ΑΟΖ της Ελλάδας, της Μεσογείου και της Ελλάδας που συγκεντρώθηκαν από την ηλεκτρονική βάση δεδομένων της Ευρωπαϊκής Στατιστικής Υπηρεσίας (Eurostat). (iv) Δεδομένα των ΥΠΕΧΩΔΕ, των εθνικών θαλάσσιων περιβαλλοντικών πάρκων, των παράκτιων υδάτων κολύμβησης, των κολυμβητικών παραλιών και των υγροτόπων διεθνούς σημασίας που ελήφθησαν από την επίσημη εθνική ιστοσελίδα "GEODATA", η οποία έχει χαρακτηριστεί ως η εθνική πύλη γεωγραφικών δεδομένων πληροφοριών της Ελλάδας (Geodata). (v) Δεδομένα των υποθαλάσσιων τηλεπικοινωνιακών καλωδίων εντός της ΑΟΖ της Ελλάδας, τα οποία συλλέχθηκαν από την ηλεκτρονική βάση δεδομένων του επίσημου ευρωπαϊκού δικτυακού τύπου "EMODnet" (Emodnet).

Εκτός από τα παραπάνω, εντοπίστηκαν, συλλέχθηκαν και χαρτογραφήθηκαν τα ακόλουθα δεδομένα: (i) Οι επαληθευμένες ναυτιλιακές διαδρομές ολόκληρης της χώρας ψηφιοποιήθηκαν μέσω των βασικών χαρτών του χαρτογραφικού εργαλείου ArcGIS, χρησιμοποιώντας το ίδιο προβαλλόμενο σύστημα συντεταγμένων. (ii) Οι στρατιωτικές ζώνες που χρησιμοποιούνται για εκπαιδευτικούς σκοπούς και ως πεδία βολής, οι οποίες παρασχέθηκαν σε αναλογική μορφή από την Υδρογραφική Υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού (YYN) και, στη συνέχεια, ψηφιοποιήθηκαν κατάλληλα. (iii) Οι μεταναστευτικοί διάδρομοι, οι οποίοι αποτυπώθηκαν με τη λήψη αντίστοιχου χάρτη (σε μορφή εικόνας) από την Ελληνική Ορνιθολογική Εταιρεία (Ε.Ο.Ε.). (iv) Οι εγχώριοι λιμένες, οι οποίοι χαρτογραφήθηκαν με την παροχή πληροφοριών σχετικά με τη θέση και την ονομασία τους (Marine Traffic). Χαρτογραφήθηκαν μόνο τα επίσημα καθορισμένα λιμάνια της χώρας. (v) Οι ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας της χώρας, οι οποίες ψηφιοποιήθηκαν μέσω του επίσημου χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας, που συλλέχθηκε ως εικόνα από το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (ΤΕΕ). (vi) Τα στοιχεία που αφορούν τα υποβρύχια καλώδια του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, τις θέσεις των κέντρων υψηλής τάσης 400 kilovolt (kV) και των υποσταθμών υψηλής τάσης 150 kV, τα οποία ελήφθησαν από τον ΔΕΔΔΗΕ, μέσω επίσημου χάρτη που βρέθηκε στο Admie.

Τεχνικές προδιαγραφές και διάταξη τοποθέτησης OWF

2.5 Ορισμός του μοντέλου ανεμογεννήτριας

Στην παρούσα μελέτη επιλέγεται ο γενικός στρόβιλος 5 MW, ο οποίος αναπτύχθηκε από το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (NREL) (Jonkman, Butterfield, Musial, Scott, 2009). Αυτό το μοντέλο ανεμογεννήτριας έχει επίσης χρησιμοποιηθεί σε αρκετές προηγούμενες μελέτες (Myhr et al, 2019, Fischer, de Vries, Schmidt, 2010), ενώ ένας μεγάλος αριθμός υφιστάμενων και πλήρως ή εν μέρει λειτουργουσών OWF παγκοσμίως, αναπτύσσουν υπεράκτιες ανεμογεννήτριες με την ίδια ονομαστική ισχύ (δέκα στην Ευρώπη και έξι στην Ασία) (4c Offshore).

2.6 Επιλογή της δομής στήριξης των ανεμογεννητριών

Η επιλογή της δομής στήριξης των ανεμογεννητριών σχετίζεται με το βάθος του νερού της ΑΕ (Stg2, Σχήμα 1). Οι περιοχές αυτές βρίσκονται σε βάθος νερού άνω των 50

μέτρων και, ως εκ τούτου, προτιμώνται οι πλωτές πλατφόρμες ως δομές στήριξης (Scullenberg-Rodriguez, Montesdeoca, 2018, Myhr et al ,2019). Στην παρούσα εργασία, για βάθη νερού 50-200 m, ως πλωτή δομή στήριξης κάθε ανεμογεννήτριας επιλέγεται η Tension Leg Buoy (TLB). Τα συστήματα TLB μπορούν να χρησιμεύσουν ως βιώσιμες λύσεις για την εκμετάλλευση των ΑΠΕ (Scullenberg-Rodriguez, Montesdeoca, 2018). Στη Βόρεια Θάλασσα, όπου επικρατούν σκληρότερες συνθήκες ανέμου και κύματος σε σχέση με το ελληνικό θαλάσσιο περιβάλλον, έχει αποδειχθεί ότι τα TLBs παρουσιάζουν τα πιο οικονομικά αποδοτικά συστήματα για βάθη νερού από 50 έως 200 m (Myhr, 2016). Όσον αφορά τα βάθη νερού από 200 έως 500 m, επιλέγεται η ιδέα Hywind. Ο απλός σχεδιασμός του Hywind προσφέρει πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως τεχνολογία βασισμένη σε αποδείξεις, απλή κατασκευή της δομής στήριξης με δυνατότητα τυποποίησης και χαμηλότερο κόστος κατασκευής, καθώς και στιβαρότητα και καταλληλότητα σε περίπτωση σκληρών περιβαλλοντικών συνθηκών (Hywind). Το πλωτό σύστημα Hywind, αν και ελαφρώς ακριβότερο από το σύστημα SWAY όσον αφορά το κόστος ανά μεγαβατώρα (MWh) (Myhr et ,2019), αντιστοιχεί σε μια πλωτή πλατφόρμα που έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε παγκόσμιο επίπεδο (Hywind).

Καθορισμός της διάταξης των ανεμογεννητριών εντός των κατάλληλων περιοχών

Η διάταξη των ανεμογεννητριών εξαρτάται από διάφορους παράγοντες (π.χ. κόστος, επιπτώσεις από τα κύματα κ.λπ.) και ο καθορισμός της αντιστοιχεί σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης (Pillai, Chick, Khorasanchi, Barbouchi, Johanning, 2017). Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται μια προσανατολισμένη προσέγγιση που εκπληρώνει τον στόχο της παρούσας έρευνας, η οποία, επιπλέον, λαμβάνει υπόψη τις βέλτιστες ευρωπαϊκές πρακτικές. Συγκεκριμένα, η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ανεμογεννητριών σε μια γραμμική παράλληλη και κάθετη στην επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου συμβολίζεται ως dx και dy αντίστοιχα, ενώ D_{rotor} συμβολίζει τη διάμετρο του ρότορα. Στις υπάρχουσες, πλήρως λειτουργούσες ευρωπαϊκές Α/Γ (π.χ. Nysted OWF Δανία, Eneco Luchterduinen OWF Ολλανδία, Kentish Flats OWF Ηνωμένο Βασίλειο, Belwind OWF Βέλγιο), οι τιμές του dx κυμαίνονται μεταξύ $4,6 \sim 12,1 D_{rotor}$, ενώ το αντίστοιχο εύρος για το dy είναι $3,2 \sim 8 D_{rotor}$. Επιπλέον, σύμφωνα με τους (Lynch, Murphy, 2012) το NREL συνιστά τιμές του dy που αντιστοιχούν σε $5 \sim 10 D_{rotor}$. Στην παρούσα μελέτη, η διάταξη των ανεμογεννητριών καθορίζεται με τη χρήση των "Advanced Editor Tools" στο ArcGIS και σύμφωνα με τα ακόλουθα στοιχεία: (i) κύρια διεύθυνση του ανέμου κάθε συγκεκριμένης θέσης, (ii) D_{rotor} του επιλεγμένου μοντέλου ανεμογεννήτριας, (iii) σχήμα κάθε θέσης OWF και, επίσης, (iv) τα αναφερόμενα ευρωπαϊκά πρότυπα, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες συστοιχίας στα προτεινόμενα έργα OWF. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, στην παρούσα μελέτη, οι καθορισμένες τιμές dx και dy για τη διάταξη των ανεμογεννητριών είναι $7 D_{rotor}$ και $7 D_{rotor}$ αντίστοιχα.

¹ **2.7 Κόστος των OWFs**

Εκτίμηση του CAPEX

Οι συνιστώσες του CAPEX που εξετάζονται στην παρούσα μελέτη είναι: (i) ανάπτυξη και έγκριση,

(ii) ασφάλιση στη φάση κατασκευής, (iii) κόστος συναρμολόγησης ρότορα-κάτουρας, (iv) κόστος παραγωγής (συμπεριλαμβανομένου του πύργου και της δομής στήριξης), (v) κόστος πρόσδεσης (συμπεριλαμβανομένης της εγκατάστασης για την περίπτωση πλωτών ανεμογεννητριών), (vi) κόστος δικτύου (συμπεριλαμβανομένης της εγκατάστασης) και (vii) εγκατάσταση ολόκληρου του συστήματος ανεμογεννητριών (Myhr et al 2019). Σύμφωνα με τους (Schullenberg- Rodriguez, Montesdeoca, 2018), το CAPEX υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη το βάθος του νερού και την απόσταση από την ακτή. Εκτός από αυτούς τους παράγοντες, το CAPEX των εν λόγω έργων εξαρτάται από: (i) την ανεπτυγμένη δομή στήριξης της ανεμογεννήτριας, η οποία μπορεί να είναι είτε σταθερή στον πυθμένα της θάλασσας είτε πλωτή (Schullenberg- Rodriguez, Montesdeoca, 2018, Myhr et al 2019, Myhr, 2016) και (ii) την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας.

Εκτίμηση του OPEX

Το OPEX των OWFs αποτελεί σημαντικό μέρος του συνολικού κόστους της επένδυσης και συνδέεται άμεσα και επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την απόσταση από τους λιμένες και από το βάθος του νερού (Myhr et al, 2019). Επιπλέον, σύμφωνα με (Schullenberg-Rodriguez, Montesdeoca, 2018, Myhr et al 2019) (OPEX ανά έτος για πλωτές δομές στήριξης αντιστοιχούν περίπου στο 3% του CAPEX

(€/MW). Στο [Schullenberg-Rodriguez, Montesdeoca, 2018) το OPEX θεωρήθηκε ίσο με 3,7% του CAPEX (€/MW) για τις ανεμογεννήτριες με πλωτή πλατφόρμα TLB και ίσο με 3,44% του CAPEX (€/MW) για τις ανεμογεννήτριες με πλωτή πλατφόρμα Hywind. Μετά τον υπολογισμό του OPEX για όλες τις OWF για το πρώτο έτος λειτουργίας τους, μπορεί να εκτιμηθεί το OPEX κατά τη διάρκεια του συνολικού κύκλου ζωής τους, ο οποίος ορίζεται ίσος με 25 έτη (Ioannou, Angus, Brennan, 2018). Για τον σκοπό αυτό,

χρησιμοποιήθηκε ο τύπος της παρούσας αξίας των ετησίως κατανεμημένων δαπανών (PVAAE) (Εξ. 1.) (Brigham, Houston,2015):

$$PVAAE = \frac{(1 + i)^n - 1}{i(1 + i)^n} \quad (1)$$

όπου n είναι τα έτη λειτουργίας (25 έτη) και i το επιτόκιο, το οποίο λαμβάνεται ίσο με 2,5%.

Εκτίμηση της DECEX

Το DECEX ενός έργου OWF μπορεί να αντιστοιχεί στο 0%-4% του συνολικού κόστους επένδυσης (Scullenberg-Rodriguez, Montesdeoca, 2018, Ιοαννου et al, 2018). Στην παρούσα εργασία, για κάθε έργο, το DECEX λαμβάνεται ίσο με το 2% του αντίστοιχου συνολικού κόστους επένδυσης, καθώς θεωρείται ότι παρόλο που εισπράττεται ένα σημαντικό ποσό από την ανακύκλωση των διασωθέντων δομικών υλικών, το ποσό αυτό δεν επαρκεί για να καλύψει συνολικά το DECEX.

2.8Αξιολόγηση των κατάλληλων περιοχών και ανάλυση χαρτοφυλακίου

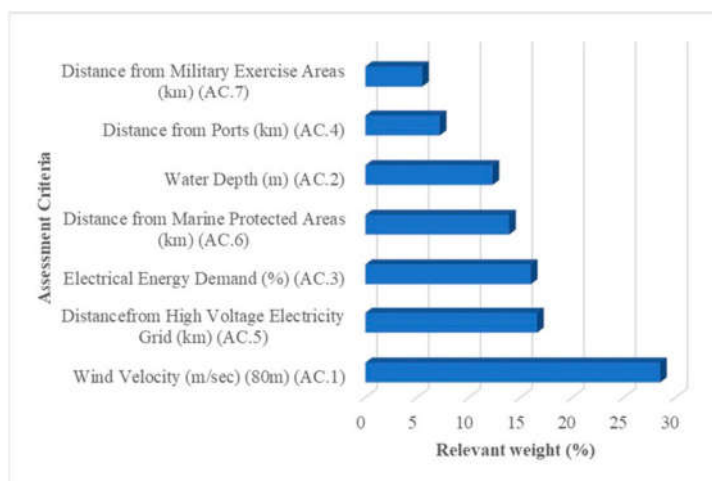
Κριτήρια αξιολόγησης

Το AC που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση χαρτοφυλακίου περιλαμβάνει: (i) ταχύτητα ανέμου (AC.1) (Mahdy,Bahaj ,2018, Vagiona,Karanikolas,2012,Chaouachi et al,2017 ,Waewsak et al 2015 ,Lynch et al 2012), (ii) βάθος νερού (AC.2) (Mahdy, Bahaj,2018 ,Waewsak et al ,2015 ,Lynch et al ,2012), (iii) ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (AC.3), (iv) απόσταση από λιμάνια (με βάθος νερού >10 m όσον αφορά τις απαιτήσεις βυθίσματος) (AC.4) (Lynch et al,2012), (v) απόσταση από δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης (AC.5) (Mahdy,Bahaj,2018 ,Stefanakou, Nikitakos,2016), (vi) απόσταση από θαλάσσιες προστατευόμενες περιοχές (AC.6) (Stefanakou,Nikitakos,2016) (vii) απόσταση από περιοχές στρατιωτικών ασκήσεων (πεδία βολής και θέσεις ασκήσεων) (AC.7). Αξίζει να σημειωθεί ότι η "ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας" και η "απόσταση από περιοχές στρατιωτικής άσκησης (πεδία βολής και θέσεις άσκησης)" δεν έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν ως AC για τη χωροθέτηση των ΟΥΚ.

Ιεράρχηση των ΑΚ

Η ιεράρχηση των ΑΚ βασίζεται σε ένα κατάλληλα σχεδιασμένο ερωτηματολόγιο, το οποίο στάλθηκε μέσω ηλεκτρονικού ταχυδρομείου σε μια ΕΟ για τη χωροθέτηση των ΑΠΕ και, πιο συγκεκριμένα, των ΟΤΚΖ. Η ομάδα αποτελείται από σαράντα εμπειρογνώμονες από πανεπιστήμια, ινστιτούτα, ερευνητικά κέντρα και εταιρείες από όλο τον κόσμο (ΗΠΑ, Ευρώπη και Ασία). Αυτοί οι εμπειρογνώμονες επιλέχθηκαν προσεκτικά, λαμβάνοντας υπόψη το διαφορετικό υπόβαθρο των συμμετεχόντων, έτσι ώστε οι διαφορετικές απόψεις τους να αντικατοπτρίζουν τους διαφορετικούς στρατηγικούς προσανατολισμούς του σημερινού προβλήματος χωροθέτησης ΑΠΕ και προκειμένου να τονιστεί η πολυπλοκότητα αυτών των προβλημάτων χωροθέτησης. Από τα σαράντα ερωτηματολόγια που στάλθηκαν, επτά συμπληρώθηκαν επιτυχώς και απαντήθηκαν από καθηγητές, έμπειρους επιστημονικούς ερευνητές και χωροταξικούς αναλυτές των ΑΠΕ από διάφορες ευρωπαϊκές χώρες (Ελλάδα, Ισπανία, Ιταλία, Ολλανδία κ.λπ.). Οι εμπειρογνώμονες ιεράρχησαν τα επιλεγμένα κριτήρια στα ερωτηματολόγια με βάση τη δική τους μεγάλη εμπειρία και τις δικές τους διαφορετικές προτιμήσεις- η πλειονότητα των εμπειρογνομόνων έχει πάνω από επτά χρόνια εμπειρίας σε τέτοια θέματα. Το Σχήμα 2 παρουσιάζει την τελική ιεράρχηση των προτεραιοτήτων της ΣΕ. Ο λόγος συνέπειας που υπολογίστηκε από τον Microsoft Project Server έφτασε το 100%.

αξιολόγησης (ΚΑ).



Σχήμα 2.2 Σχετική βαρύτητα των κριτηρίων

Το συγκεκριμένο στάδιο περιλαμβάνει την πραγματική διαδικασία επιλογής, όπου όλες οι προτάσεις έργων εξετάζονται σε συνδυασμό με τους περιορισμούς της ΣΕ και τους οικονομικούς περιορισμούς. Πιο συγκεκριμένα, η ανάλυση χαρτοφυλακίου καταλήγει σε μια ιεράρχηση των προτάσεων έργων, ανάλογα με την απόδοσή τους σε σχέση με το ΑΚ. Έτσι,

εάν ένα έργο έχει σημαντικό αντίκτυπο σε πολλές παράλληλες ΑΚ, τοποθετείται ψηλά στον κατάλογο προτεραιοτήτων και λαμβάνει υψηλή βαθμολογία στρατηγικής αξίας.

Στην παρούσα εργασία, η ανάλυση χαρτοφυλακίου πραγματοποιείται με τη χρήση του λογισμικού Microsoft Project Server και περιλαμβάνει τα ακόλουθα κύρια βήματα: (i) εισαγωγή των ΑΚ στη βιβλιοθήκη των παραγόντων επιρροής, (ii) εισαγωγή όλων των έργων (OWFs) και του εκτιμώμενου συνολικού κόστους επένδυσης τους στο κέντρο έργων, (iii) αξιολόγηση

του στρατηγικού αντίκτυπου κάθε ΟΕΠ, με βάση τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των έργων που σχετίζονται με το συγκεκριμένο ΑΚ με τη χρήση πενταβάθμιας κλίμακας (Πίνακας 2), (iv) εισαγωγή της σχετικής βαρύτητας κάθε ΑΚ (Σχήμα 2) σύμφωνα με την ΕΓ και (v) δημιουργία σεναρίων με βάση τους οικονομικούς περιορισμούς (50%, 60% και 75% του συνολικού χαρτοφυλακίου).

Πίνακας 2. Κλιμάκωση του ΑC.

	Κανένα ς (0)	Χαμηλή (1)	Μέτρια (3)	Ισχυρό (6)	Extreme (9)
AC.1	< 6	6-7	7-8	8-9	> 9
AC.2	> 100	> 65	50-65	35-50	20-35
AC.3	0	0-5	5-10	10-15	> 15
AC.4	0	15-25	25-35	35-45	45-55
AC.5	> 500	Μέχρι 500	Μέχρι 400	Μέχρι 300	Μέχρι 200
AC.6	> 100	> 75	60-75	45-60	30-45
AC.7	0	0-20	20-40	40-60	60-80

AC

Κλιμάκωση

² 2.9 Αποτελέσματα και συζήτηση

Στρατηγικός σχεδιασμός Όραμα και αποστολή

Το όραμα και η αποστολή του Στρατηγικού Σχεδιασμού περιλαμβάνουν μια σαφή και σταθερή δήλωση σκοπού που περιγράφει τις αξίες και τις προτεραιότητες της χώρας, όσον αφορά την εφαρμογή των ΠΔΠ, και απευθύνεται σε διάφορους ενδιαφερόμενους φορείς, άτομα ή ομάδες που συνδέονται άμεσα ή έμμεσα με την εφαρμογή του προτεινόμενου Στρατηγικού Σχεδίου. Στο παρόν έγγραφο το όραμα/αποστολή ορίζεται ως εξής: "Η απόκτηση εθνικής ενεργειακής ανεξαρτησίας, λαμβάνοντας υπόψη τη βιώσιμη ανάπτυξη καθώς και την κοινωνική ευθύνη και αποδοχή ως ύψιστη προτεραιότητα. Ο κύριος στρατηγικός στόχος είναι η προώθηση της ολοκληρωμένης

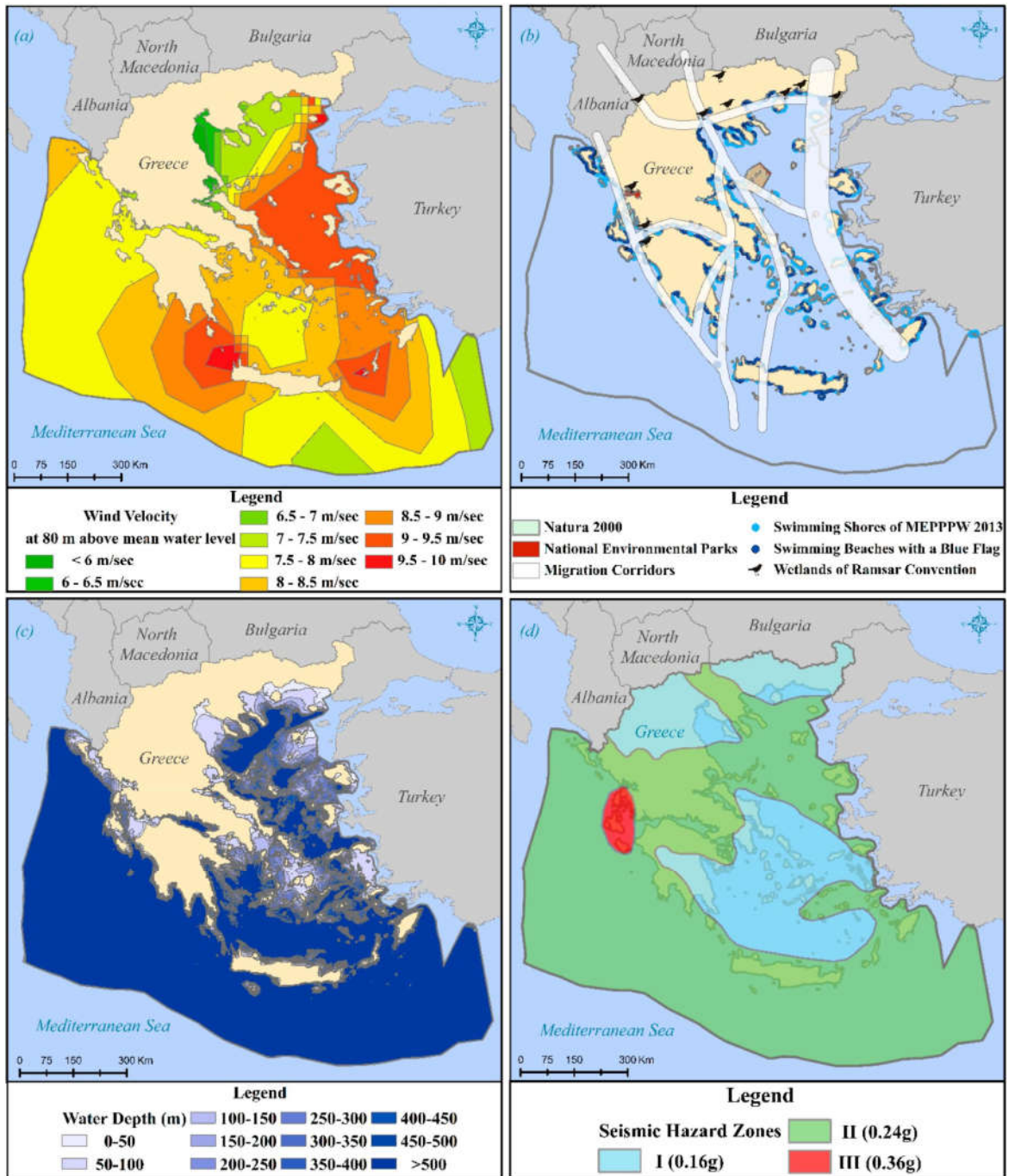
λύσεις για τη χωροθέτηση, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τα θέματα λήψης αποφάσεων των ΟΥΦ".

Προσδιορισμός των κατάλληλων περιοχών

Για τον προσδιορισμό των θαλάσσιων περιοχών που είναι κατάλληλες για τη χωροθέτηση ΟΣΔ στην Ελλάδα λαμβάνονται υπόψη τα 13 κριτήρια αποκλεισμού, EC.1~EC.13, (Πίνακας 1). Στην Εικόνα 3α-δ παρουσιάζονται ενδεικτικά οι θεματικοί χάρτες που αναπτύχθηκαν για το σκοπό αυτό για τα κριτήρια αποκλεισμού που αντιστοιχούν σε: (α) ταχύτητα ανέμου (EC.2), (β) θαλάσσιες προστατευόμενες περιοχές (EC.11), καταφύγια άγριας ζωής και διάδρομοι μετανάστευσης (EC.12), (γ) βάθος νερού (EC.3) και (δ) ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας (EC.5). Με τη δημιουργία, επεξεργασία και διαχείριση τριών διαφορετικών γραμμικών μοντέλων με τη χρήση εργαλείων γεωεπεξεργασίας στο "ModelBuilder" του λογισμικού ArcGIS, προκύπτουν οι ΣΑ για τη χωροθέτηση των ΟΣΔ

στο ελληνικό θαλάσσιο περιβάλλον και παρουσιάζονται στην Εικόνα 4. Συγκεκριμένα, εφαρμόζοντας τα αναφερόμενα μοντέλα, διαγράφονται από το χάρτη όλες οι απαγορευμένες και ακατάλληλες περιοχές, σύμφωνα με τους περιορισμούς που έχουν οριστεί στο Stg 2.

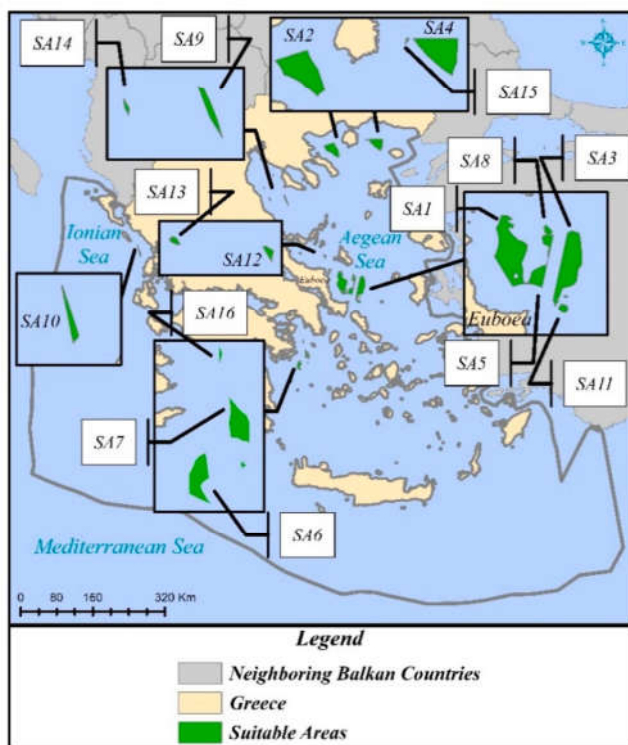
Ο αριθμός των SA είναι δεκαέξι (16). Ορισμένες πολύ μικρές περιοχές, μικρότερες από 2,5 km², δεν λαμβάνονται υπόψη, δεδομένου ότι η εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε αυτές τις μικρές περιοχές δεν εκπληρώνει κανένα οικονομικό σκοπό. Μεταξύ των κριτηρίων αποκλεισμού που εξετάστηκαν, το βάθος του νερού και η έλλειψη δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής τάσης αποτελούν τους δύο πιο περιοριστικούς παράγοντες. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά το τελευταίο κριτήριο αποκλεισμού, υπάρχουν πολύ λίγα κέντρα υψηλής τάσης 400 kV στα νότια της χώρας, τα οποία μάλιστα βρίσκονται κοντά στην ακτή. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι για όλες τις Σ.Α., το βάθος του νερού είναι μεγαλύτερο από 50 μέτρα, γεγονός που συνηγορεί υπέρ της χρήσης πλωτών κατασκευών στήριξης.



Σχήμα 2.3. Θεματικοί χάρτες των: (α) ταχύτητα ανέμου (EC.2), (β) θαλάσσιες προστατευόμενες περιοχές (EC.11), καταφύγια άγριας ζωής και διάδρομοι μετανάστευσης (EC.12), (γ) βάθος νερού (EC.3) και (δ) ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας (EC.5).

Προσδιορισμός των κατάλληλων περιοχών

Πραγματοποιείται η χαρτογράφηση των 16 OWFs, χρησιμοποιώντας τα "Advanced Editor Tools" του ArcGIS, και υπολογίζεται ο ακριβής αριθμός των ανεμογεννητριών 5 MW, καθώς και η δυναμικότητα κάθε OWF (Πίνακας 3). Ενδεικτικά, η διαμόρφωση της μικρο-τοποθέτησης των OWF15 και OWF4 παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.

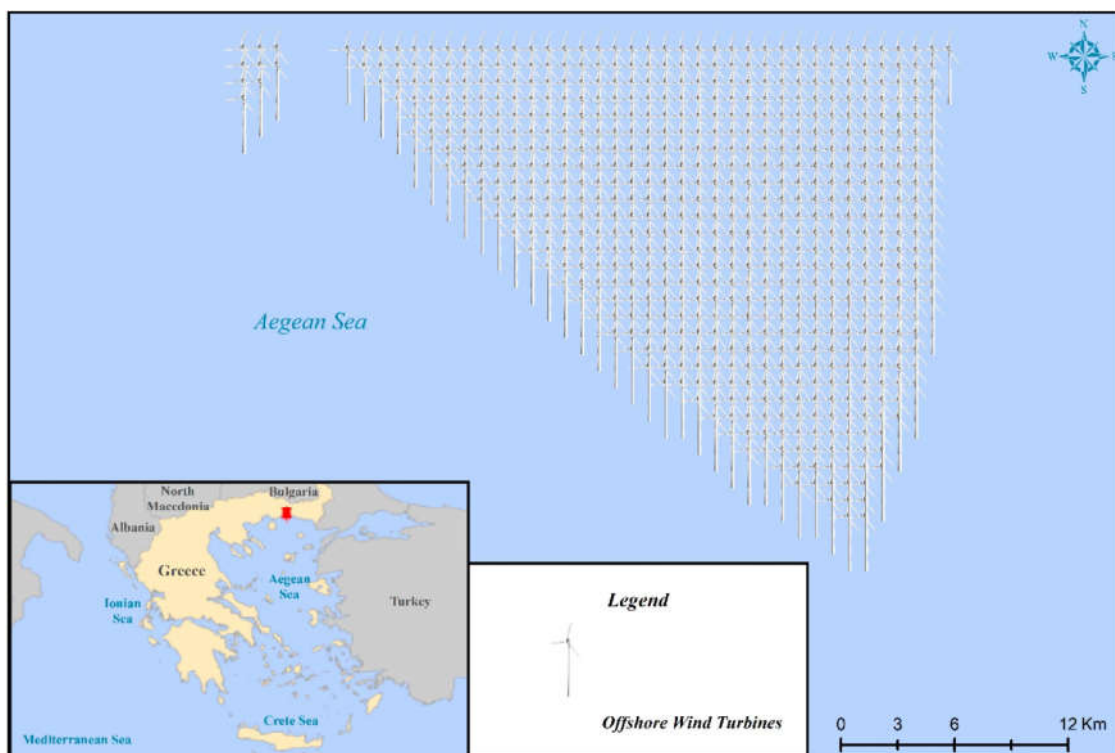


Σχήμα 2.4. Κατάλληλες περιοχές για τη χωροθέτηση ΥΗΣ στην Ελλάδα.

Πίνακας 3. Βασικά χαρακτηριστικά των 16 OWF.

χι.	Όνομα του OWF	Τοποθεσία	Έκταση (km ²)	Ανεμογεννήτρια Δομή υποστήριξης	Έργο Χωρητικότητα (MW)
1	"Εολοσ"	Νοτιοανατολικά της Εύβοιας	67 7.43	TLB και Hywind	4310
2	"Αφροδίτη"	Νοτιοδυτικά της Θάσου	55 2.07	TLB και Hywind	3500
3	"Ποσειδών"	Νοτιοανατολικά της Εύβοιας/Βόρεια της Άντρος	54 2.6	TLB και Hywind	3430
4	"Απόλλων"	Νοτιοανατολικά της Θάσος/Βορειοδυτικά της Σαμοθράκη	47 7.46	TLB	3095

5	"Zeus"	Νοτιοανατολικά της Εύβοιας	5.63	12	TLB και Hywind	785
6	"Ηρα"	Νότια της Ύδρας	0.29	11	TLB και Hywind	680
7	"Άρης"	Ανατολικά της Ύδρας	4.46	10	TLB και Hywind	600
8	"Αθηναία"	Νοτιοανατολικά της Εύβοιας	.03	82	Hywin d	485
9	"Ηφαίστος"	Βορειοανατολικά του Βόλου	.79	46	Hywin d	280
10	1 "Δήμητρα"	Βορειοδυτικά της Λευκάδας/Δυτικά της Πρέβεζας	.7	42	Hywin d	270
11	1 "Διώνυσος"	Νοτιοανατολικά της Εύβοιας/Βόρεια της Άνδρου	.94	30	Hywin d	205
12	1 "Εστία"	Βορειοδυτικά της Σκύρου	.71	22	Hywin d	150
13	1 "Hermes"	Βορειοανατολικά της Εύβοιας/Νότια της Σκοπέλου	.6	15	Hywin d	100
14	1 "Νέμεσος"	Βόρεια του Βόλου	9	6.	TLB	50
15	1 "Άρτεμις"	Ανατολικά της Θάσου	81	4.	TLB	45
16	1 "Περσεφόνη"	Ανατολικά του Πόρου	45	4.	TLB	40
Σύνολο	Χαρτοφυλάκιο OWFs	ΑΟΖ της Ελλάδας	46.87	28	TLB και Hywind	18,025



Σχήμα 5. Διαμόρφωση μικρο-τοποθέτησης των OWF15 και OWF4.

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Δίκτυο Διαχειριστών Συστημάτων Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (European Network of Transmission System Operators for Electricity), η καθαρή ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα ήταν συνολικά 16.392,43 MW για το 2017 και συγκεκριμένα το ποσό των 8220,02 MW παράχθηκε από ΑΠΕ (25,33% από χερσαία αιολική ενέργεια, 29,78% από ηλιακή ενέργεια, 0,73% από ενέργεια βιομάζας, 41,35% από ανανεώσιμη υδροηλεκτρική ενέργεια και 2,81% από άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας) και το ποσό των 8172,41 MW παράχθηκε από μη ΑΠΕ. Κατά συνέπεια, με την ανάπτυξη και την εφαρμογή του προτεινόμενου στρατηγικού σχεδίου, τα αποτελέσματα της εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας αποκαλύπτουν ότι το 45,34% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από όλα τα έργα του παραπάνω πίνακα θα επαρκούσε για την επίτευξη ενεργειακής ανεξαρτησίας της χώρας.

Προκειμένου να διατηρηθεί το συνολικό κόστος επένδυσης (π.χ. κόστος λειτουργίας και συντήρησης) στο ελάχιστο και να αναπτυχθούν στο μέγιστο οι κατάλληλες θαλάσσιες τοποθεσίες, τα μεγάλα έργα OWF (π.χ. OWF1, OWF2) δεν θα πρέπει να χωριστούν σε μικρότερα έργα. Προτείνεται τα αναφερόμενα μεγάλα έργα να υλοποιούνται σε φάσεις, όπως το "Gode Wind OWF" στη Γερμανία (δυναμικότητα έργου: 582 MW) (Weston,2015).

Κόστος επένδυσης των OWF

Σύμφωνα με (Myhr et al ,2019), το CAPEX των υπεράκτιων ανεμογεννητριών 5 MW με πλατφόρμα TLB και πλατφόρμα Hywind, που βρίσκονται σε απόσταση 200 χλμ. από το λιμάνι και σε βάθος νερού 200 μ., εκτιμάται ίσο με $3,537 \times 10^6$ €/MW και $3,807 \times 10^6$ €/MW αντίστοιχα. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί στο [1] ότι μια αύξηση κατά 10% του βάθους του νερού ή της απόστασης από την ακτή θα οδηγήσει σε αύξηση κατά 1% του

κόστους επένδυσης, που σχετίζεται κυρίως με το κόστος εγκατάστασης και σύνδεσης με το δίκτυο, καθώς και με το κόστος της δομής στήριξης (συμπεριλαμβανομένης της εγκατάστασης). Με τη χρήση αυτού του κανόνα και λαμβάνοντας υπόψη τις προαναφερθείσες τιμές του CAPEX ανά MW ως βάση για τους υπολογισμούς του CAPEX, εκτιμάται τελικά το CAPEX των OWF για δεδομένο βάθος νερού και απόσταση από την ακτή. Για παράδειγμα, για μια ανεμογεννήτρια 5 MW με πλωτή πλατφόρμα TLB που εγκαθίσταται σε βάθος νερού 100 m και σε απόσταση 50 km από την ακτή, το CAPEX εκτιμάται ίσο με $3,095 \times 10^6$ €/MW (έχει υποτεθεί μείωση κατά 12,5% της βασικής τιμής $3,537 \times 10^6$ €/MW, λόγω της μείωσης τόσο του βάθους νερού όσο και της απόστασης από την ακτή). Όσον αφορά το OPEX και το DECEX, τα μεγέθη αυτά εκφράζονται ως ποσοστά του CAPEX και του συνολικού κόστους της επένδυσης αντίστοιχα, όπως εξηγήθηκε στις ενότητες [5.2](#) και [5.3](#) ανωτέρω. Ο πίνακας [4](#) περιλαμβάνει το συνολικό κόστος επένδυσης του

16 OWFs, η οποία χρησιμοποιείται ως δεδομένο στην ανάλυση χαρτοφυλακίου. Τα προτεινόμενα έργα, τα οποία παρουσιάζονται στους πίνακες 3 και 4, θα μπορούσαν να χρηματοδοτηθούν από την Ευρωπαϊκή Τράπεζα Επενδύσεων (ΕΤΕπ), καθώς το Διοικητικό Συμβούλιο της ΕΤΕπ (2015) ενέκρινε τη στήριξη στρατηγικών επενδύσεων σε υποδομές συνολικού ύψους σχεδόν 7 δισεκατομμυρίων ευρώ για νέα OWF στις ακτές του Ηνωμένου Βασιλείου και του Βελγίου (Russell,2015). Επιπλέον, τα προτεινόμενα έργα OWF θα μπορούσαν να χρηματοδοτηθούν τόσο από ιδιωτικά (π.χ. ελληνικές ιδιωτικές τράπεζες) όσο και από δημόσια κεφάλαια (π.χ. ελληνική δημόσια τράπεζα).

A/A επένδυσης	Κόστος	AC.1 (m/s)	AC.2 (m)	AC.3 (%)	AC.4 (km)	AC.5 (km)	AC.6 (km)	AC.7 (km)
OWF1	27.255×10^9	9-9.5 7-7.5	50-500 100-500	73.79 59.92	47.5 51.5	47.0 62.0	33.5 30.0	22.5 46.5

Πίνακας 4. Κόστος επένδυσης και χαρακτηριστικά των ΟΤΔ σε σχέση με το ΑΚ.

(€)

OWF2	20.858×10^9							
OWF3	22.173×10^9	9-9.	5150-50058.		7290.	547.	542.	042.0
OWF4	17.283×10^9		7-850-15052.		9998.	072.	528.	540.5
OWF5	5.092×10^9	9-9.	5150-50013.		4473.	029.	524.	542.0
OWF6	4.375×10^9	8-8.	5150-50011.		6452.	054.	551.	04.5
OWF7	3.573×10^9	8-8.	5100-50010.		2745.	025.	034.	54.0
OWF8	3.338×10^9	9-9.	5450-5008.		3069.	057.	051.	548.5
OWF9	1.799×10^9	7-7.	5200-4004.		7985.	047.	031.	032.5
OWF10	1.720×10^9	7.	5-8250-5004.		6234.	031.	029.	069.5
OWF11	1.382×10^9	9-9.	5150-5003.		5192.	529.	024.	019.5
OWF12	962.336×10^6	8.5-9.	5300-4002.		5735.	081.	017.	548.0
OWF13	664.512×10^6	8-8.	5350-5001.		7139.	029.	520.	577.0
OWF14	272.904×10^6	6-6.	550-1000.		8698.	540.	519.	547.5
OWF15	246.342×10^6	7-7.	550-1500.		7770.	546.	022.	525.5

OWF16 219.871×10^6 8–8. 5100–2000. 6830. 022. 028. 50.5

Αποτελέσματα της ανάλυσης χαρτοφυλακίου

Τα χαρακτηριστικά όλων των OWF σε σχέση με το AC που απαιτείται ως εισροή στην ανάλυση χαρτοφυλακίου παρουσιάζονται στον πίνακα 4.

Λαμβάνοντας υπόψη τα σχετικά βάρη του ΣΕ (Σχήμα 2) και τα δεδομένα του Πίνακα 4, υλοποιείται η ανάλυση χαρτοφυλακίου. Ο Πίνακας 5 παρουσιάζει την ιεράρχηση του χαρτοφυλακίου έργων με βάση την υπολογιζόμενη στρατηγική αξία. Η υλοποίηση ολόκληρου του χαρτοφυλακίου επιτυγχάνει στρατηγική αξία 100%, αφού υλοποιούνται όλα τα προτεινόμενα έργα και το κόστος επένδυσης του συνολικού χαρτοφυλακίου ανέρχεται σε $111,214 \times 10^9$ €.

Πίνακας 5. Στρατηγική αξία των έργων χαρτοφυλακίου.

Κ ατάταξη η	Ο WF	Στρατηγική αξία (%)
1	O	8.46
	WF3	
2	O	8.17
	WF1	
3	O	7.75
	WF5	
4	O	7.44
	WF16	
5	O	7.27
	WF8	
6	O	7.2
	WF7	
7	O	6.69
	WF6	
8	O	6.35
	WF13	
9	O	6.13
	WF11	
10	O	5.84
	WF4	
11	O	5.58
	WF10	
12	O	5.45
	WF2	
13	O	4.84
	WF15	
14	O	4.69
	WF12	
15	O	4.11

5	WF14	
	O	4.03

<u>16</u>	<u>WF9</u>	
-----------	------------	--

Στη συνέχεια, εξετάζονται τρία πιθανά σενάρια για την υλοποίηση των έργων χαρτοφυλακίου. Το πρώτο σενάριο αντιστοιχεί σε επένδυση 50% του συνολικού χαρτοφυλακίου (δηλ. 55.607×10^9 €), το δεύτερο σε επένδυση 60% του συνολικού χαρτοφυλακίου (δηλ. 66.729×10^9 €), ενώ το τρίτο σε επένδυση 75% του συνολικού χαρτοφυλακίου (δηλ. 83.411×10^9 €). Με την εφαρμογή του πρώτου σεναρίου, μπορούν να υλοποιηθούν έντεκα OWF με συνολική στρατηγική αξία 70,08%, συμπεριλαμβανομένων των OWF3, OWF5, OWF16, OWF8, OWF7, OWF13, OWF11, OWF4, OWF15, OWF12 και OWF14 (κατά φθίνουσα σειρά). Τα περισσότερα από αυτά τα OWF βρίσκονται νοτιοανατολικά της Εύβοιας (OWF3, OWF5, OWF8, OWF11, Εικόνα 4) και στο Βόρειο Αιγαίο (OWF4, OWF14, OWF15). Το συνολικό κόστος επένδυσης αυτών των έντεκα OWF είναι ίσο με $55,207 \times 10^9$ €. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση του δεύτερου σεναρίου, υλοποιούνται τα ακόλουθα δώδεκα OWF με στρατηγική αξία 76,92% και συνολικό κόστος επένδυσης $66,181 \times 10^9$ € (Σχήμα 4): OWF3, OWF1, OWF16, OWF8, OWF7, OWF6, OWF13, OWF11, OWF10, OWF15, OWF12 και OWF14 (με φθίνουσα σειρά). Τέλος, το τρίτο σενάριο οδηγεί στην εφαρμογή των ακόλουθων δεκατεσσάρων OWF με στρατηγική αξία 87,79%: OWF3, OWF5, OWF16, OWF8, OWF7, OWF6, OWF13, OWF11, OWF4, OWF10, OWF2, OWF15, OWF12 και OWF14 (με φθίνουσα σειρά). Το συνολικό κόστος επένδυσης των έργων αυτών ανέρχεται σε $82,160 \times 10^9$ €, ενώ τα περισσότερα από αυτά τα ΟΣΔΕ βρίσκονται νοτιοανατολικά της Εύβοιας (ΟΣΔΕ3, ΟΣΔΕ5, ΟΣΔΕ8, ΟΣΔΕ11, Σχήμα 4) και στο Βόρειο Αιγαίο (ΟΣΔΕ2, ΟΣΔΕ4, ΟΣΔΕ14, ΟΣΔΕ15).

Αξίζει να σημειωθεί ότι οποιοδήποτε από τα τρία σενάρια επιλεγεί για εφαρμογή θα είναι ιδιαίτερα επωφελές για τη χώρα, δεδομένου ότι η στρατηγική αξία όλων των σεναρίων υπερβαίνει το 70% και εξασφαλίζεται η εθνική ενεργειακή ανεξαρτησία. Η βέλτιστη επιλογή είναι φυσικά η υλοποίηση του συνόλου του χαρτοφυλακίου, αφού αυτό συνεπάγεται στρατηγική αξία 100% και επιτυγχάνονται όλοι οι στρατηγικοί στόχοι του παρόντος σχεδίου. Ωστόσο, μια τέτοια επένδυση θα ήταν ιδιαίτερα δαπανηρή. Ως εκ τούτου, προτείνεται για υλοποίηση το δεύτερο σενάριο, καθώς απαιτεί λίγο λιγότερο από το 60% του συνολικού επενδυτικού κεφαλαίου, ενώ, ταυτόχρονα, ικανοποιεί πλήρως το όραμα και την αποστολή του παρόντος στρατηγικού σχεδίου (δηλαδή την εθνική ενεργειακή ανεξαρτησία).

Μέσω του στρατηγικού σχεδιασμού που πραγματοποιήθηκε, αποδείχθηκε ότι ο συνδυασμός των ΓΣΠ με το λογισμικό Microsoft Project Server μπορεί, ως εκ τούτου, να θεωρηθεί ως ένα ισχυρό εργαλείο για την επίλυση σύνθετων ζητημάτων χωροθέτησης και λήψης αποφάσεων για τα ΟΣΔ. Επιπλέον, η ενσωμάτωση GIS-Microsoft Project Server θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως ένα εξαιρετικό εργαλείο για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε χρήσιμους χάρτες και, επίσης, σε πρακτικά σενάρια επιλογής χαρτοφυλακίου. Η προτεινόμενη μεθοδολογική προσέγγιση είναι ουσιαστική, καθώς θα μπορούσε να αξιοποιηθεί αποτελεσματικά και εύκολα από ακαδημαϊκούς, επιστημονικούς ερευνητές, σχεδιαστές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, προγραμματιστές, κυβερνητικές υπηρεσίες, συμβούλους και δυνητικούς επενδυτές για την αποτελεσματική και βιώσιμη εκμετάλλευση του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού και τη σχετική ανάπτυξη των OWF σε διαφορετικές κλίμακες χωροταξικού σχεδιασμού. Η ανάγκη και η σημασία ενός τέτοιου στρατηγικού σχεδιασμού αυξάνονται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου, καθώς η αύξηση του πληθυσμού και η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου προκαλούν

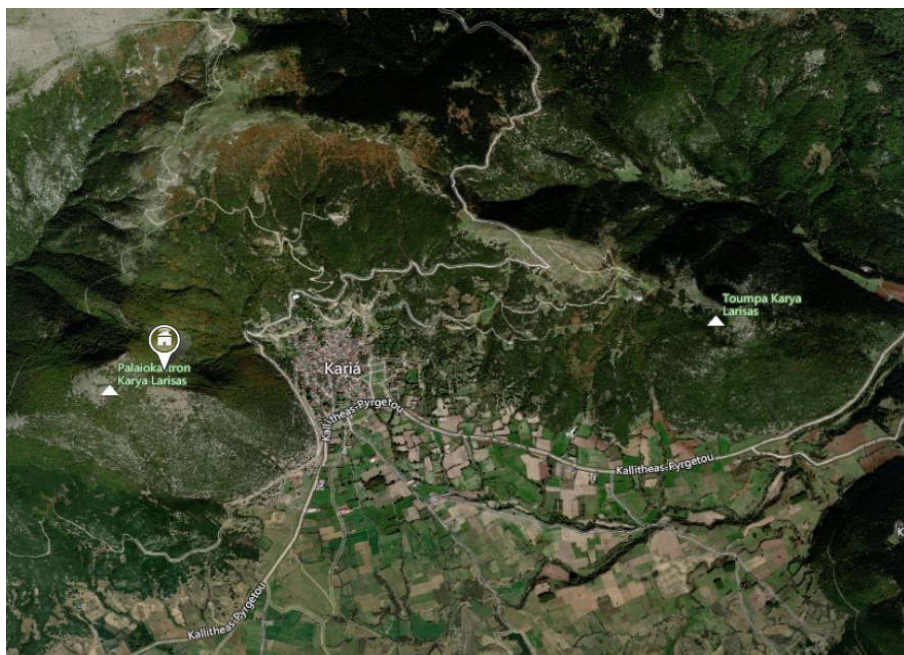
αύξηση της ενεργειακής ζήτησης. Η παρούσα μελέτη θα μπορούσε να επεκταθεί περαιτέρω με μια ανάλυση επιτόπιας έρευνας των προτεινόμενων θέσεων ΟΘΠ, προκειμένου να επαληθευτεί η συνολική καταλληλότητά τους. Έτσι, οι μελλοντικές εργασίες θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν μια ενδελεχή ατομική αξιολόγηση των προτεινόμενων θέσεων σε συνδυασμό με έρευνα πεδίου, προκειμένου να γίνει η τελική επιλογή/προτεραιοποίηση των θέσεων για την εγκατάσταση των OWF. Τέλος, θα ήταν ενδιαφέρον να εξεταστεί η αξιοποίηση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας στο προτεινόμενο στρατηγικό σχέδιο για τη βελτίωση της διείσδυσης των ΑΠΕ στο μείγμα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και τη μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας των έργων OWF ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Προσομοίωση με την χρήση Λογισμικού

3.1 Τοποθεσία και Χαρακτηριστικά Εγκατάστασης

Για την συγκεκριμένη μελέτη επιλέχθηκε η συγκεκριμένη θέση στην τοποθεσία **ΚΑΡΥΑ-ΟΛΥΜΠΟΥ** όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.1**



Σχήμα 3.1 Τοποθεσία Εγκατάστασης

Στο **Σχήμα 3.2** φαίνονται οι γεωγραφικές λεπτομέρειες της περιοχής της εγκατάστασης.

Μονάδα	Θέση κλιματολογικών δεδομένων	Τοποθεσία εγκατάστασης	Πηγή
	39.6	40.0	
	22.4	22.4	
	4A - Μικτό - Υγρό		
m	74	1278	Εδαφος+NASA
°C	-3.2		Εδαφος - Χάρτης
°C	34.4		Εδαφος
°C	22.6		NASA

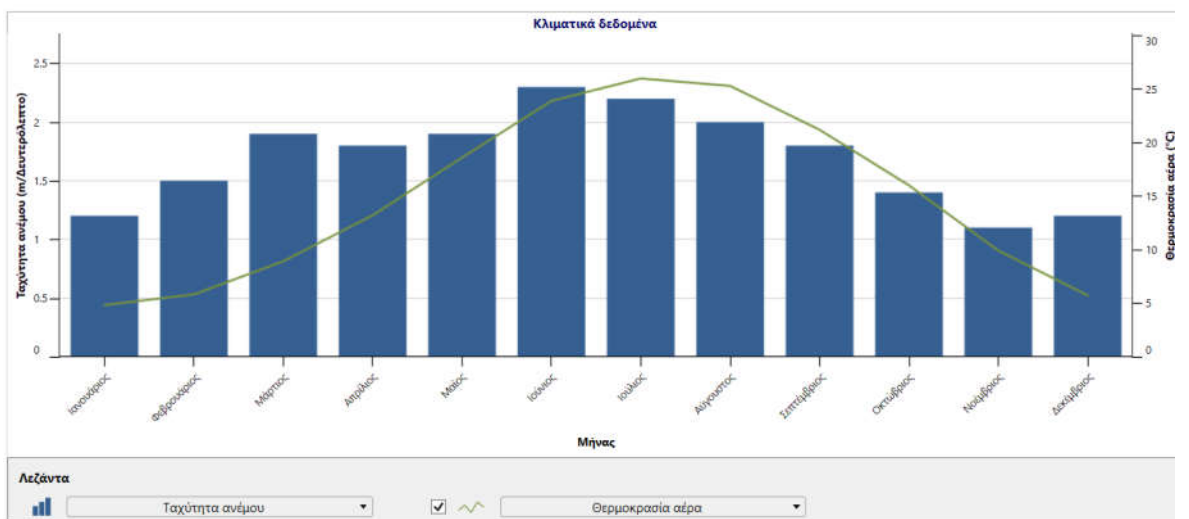
Γεωγραφικό πλάτος
Γεωγραφικό μήκος
Κλιματική ζώνη
Υψόμετρο
Θερμοκρασία θέρμανσης βάσει σχεδιασμού
Θερμοκρασία ψύξης βάσει σχεδιασμού
Πλάτος (διακύμανση) Θερμοκρασίας εδάφους

Σχήμα 3.2 Γενικά Χαρακτηριστικά

Στο **Σχήμα 3.3** και **Σχήμα 3.4** φαίνονται οι θερμοκρασίες και οι υγρασίες που επικρατούν στην περιοχή.

Μήνας	Θερμοκρασία αέρα °C	Σχετική υγρασία %	Κατακρήμνιση mm	Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία - Οριζόντια kWh/m ² /ημ	Ατμοσφαιρική πίεση kPa	Ταχύτητα ανέμου m/Δευτερόλεπτο	Θερμοκρασία εδάφους °C	Βαθμό-ημέρες θέρμανσης 18 °C °C-ημ	Βαθμό-ημέρες ψύξης 10 °C °C-ημ
Ιανουάριος	4.8	81.3%	47.74	1.95	96.6	1.2	3.3	409	0
Φεβρουάριος	5.8	75.8%	43.68	2.67	96.4	1.5	4.3	342	0
Μάρτιος	8.9	73.1%	45.88	3.68	96.4	1.9	7.4	282	0
Απρίλιος	13.2	69.7%	39.60	4.83	96.2	1.8	12.1	144	96
Μάιος	18.6	64.3%	38.44	5.68	96.3	1.9	18.2	0	267
Ιούνιος	23.9	53.4%	22.20	6.91	96.3	2.3	24.2	0	417
Ιούλιος	26.0	52.2%	19.84	6.79	96.2	2.2	27.4	0	496
Αύγουστος	25.3	55.9%	18.29	6.09	96.3	2.0	26.7	0	474
Σεπτέμβριος	21.2	62.0%	31.80	4.76	96.5	1.8	21.5	0	336
Οκτώβριος	16.0	72.3%	56.11	2.99	96.7	1.4	15.2	62	186
Νοέμβριος	9.9	81.3%	66.30	1.95	96.6	1.1	9.1	243	0
Δεκέμβριος	5.7	84.6%	62.31	1.56	96.6	1.2	4.4	381	0
Ετήσιο	15.0	68.8%	492.19	4.16	96.4	1.7	14.5	1,863	2,272
Πηγή	Εδαφος	Εδαφος	NASA	NASA	NASA	Εδαφος	NASA	Εδαφος	Εδαφος
Μετρημένο σε	m		10	0					

Σχήμα 3.3 Θερμοκρασία και Υγρασία



Σχήμα 3.4 Κλιματικά Δεδομένα

3.2 Εγκατάσταση Πάρκου Ανεμογεννητριών

Επιλέξαμε να υλοποιήσουμε ένα πάρκο ανεμογεννητριών με **ηλεκτρική ισχύ 17.5MW** χρησιμοποιώντας 10 ανεμογεννήτριες **VESTAS V66-1.75MW-60M**. Κάποιες από τις αρχικές λεπτομέρειες φαίνονται στο **Σχήμα 3.5**.

Ηλεκτρική ισχύς	kW	17,500		
Κατασκευαστής		Vestas		
Μοντέλο		VESTAS V66-1.75 MW - 60m		
Αριθμός στροβίλων		10		
Συντελεστής ισχύος	%	35.1405%		
Αρχικά κόστη	€/kW	2,100		
	€	36,750,000		
Κόστη Λειτουργίας & Συντήρησης (εξοικονόμηση)	€/kW-έτος	64		
	€	1,120,000		
Τιμή πωλούμενου ηλεκτρισμού		Τιμή πωλούμενου ηλεκτρισμού - ετήσι		
	€/kWh	0.10		
Ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο	MWh	53,870		
Έσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας	€	5,387,036		

Σχήμα 3.5 Αρχικές Λεπτομέρειες

3.3 Κόστη Εγκατάστασης

3.3.1 Αρχικά Κόστη

Τα αρχικά κόστη αφορούν την μελέτη σκοπιμότητας , την ανάπτυξη του έργου ,τα χαρακτηριστικά του συστήματος παραγωγής καθώς και άλλα διάφορα κόστη που περιλαμβάνουν τα ανταλλακτικά , τα μεταφορικά και την εκπαίδευση τα οποία ανέρχονται στα **26.496.000** ευρώ όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3.6**

Μελέτη σκοπιμότητας					
-	Μελέτη σκοπιμότητας	κόστος	1	€ 20,000	20,000
				€	20,000
Υπο-σύνολο:				€	20,000 0.1%
Ανάπτυξη					
-	Ανάπτυξη	κόστος	1	€ 100,000	100,000
				€	100,000
Υπο-σύνολο:				€	100,000 0.4%
Μηχανολογικά					
-	Μηχανολογικά	κόστος	1	€ 40,000	40,000
				€	40,000
Υπο-σύνολο:				€	40,000 0.2%
Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας					
	Ανεμογεννήτρια - 100000 kW (5.9m/Δευτερόλεπτο @'	kW	17,500	€ 1,000	17,500,000
	Εργα οδοποιίας	km	10	€ 25,000	250,000
	Γραμμή μεταφοράς ηλεκτρισμού	km	10	€ 200,000	2,000,000
	Υποσταθμός	έργο	1	€ 500,000	500,000
	Μέτρα ενεργειακής απόδοσης		1	€ 100,000	100,000
-	Οριζόμενο από τον χρήστη	κόστος		€	-
				€	-
Υπο-σύνολο:				€	20,350,000 76.8%
Ισοζύγιο συστήματος & διάφορα					
	Ανταλλακτικά	%	30.0%	€ 17,500,000	5,250,000
	Μεταφορά	έργο	1	€ 700,000	700,000
	Εκπαίδευση & θέση σε λειτουργία	ανά ημέρα	180	€ 200	36,000
-	Οριζόμενο από τον χρήστη	κόστος		€	-
				€	-
	Απρόβλεπτα	%		€ 26,496,000	-
	Τόκος κατά την κατασκευή			€ 26,496,000	-
Υπο-σύνολο:				€	5,986,000 22.6%
Συνολικά αρχικά κόστη				€	26,496,000 100.0%

Σχήμα 3.6 Αρχικά Κόστη

3.3.2 Ετήσια Κόστη

Στα ετήσια κόστη περιλαμβάνονται τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης τα οποία ανέρχονται σε **1.425.600** ευρώ. (Σχήμα 3.7)

Ετήσια κόστη (πιστώσεις)	Μονάδα	Ποσότητα	Μονάδα κόστους	Ποσό	
Λειτουργία & Συντήρηση					
Δείτε δεδομένα					
	Τμήματα & Εργασία	έργο	5	€ 40,000	200,000
-	Οριζόμενο από τον χρήστη	κόστος		€	-
				€	-
	Απρόβλεπτα	%	8.0%	€ 1,320,000	105,600
Υπο-σύνολο:				€	1,425,600
Ετήσια εξοικονόμηση					
-	Οριζόμενο από τον χρήστη	κόστος	1	€ 400,000	400,000
				€	400,000
Υπο-σύνολο:				€	400,000

Σχήμα 3.7 Ετήσια Κόστη

3.3.3 Περιοδικά Κόστη

Τέλος παρουσιάζονται τα περιοδικά κόστη τα οποία αφορούν διάφορες προγραμματισμένες εργασίες όπως παραδείγματος χάριν η αλλαγή του συστήματος μετάδοσης της ανεμογεννήτριας όπου το κόστος ανέρχεται στα **500.000** ευρώ. (Σχήμα 3.8)

Περιοδικά κόστη (πιστώσεις)	Μονάδα	Ετος	Μονάδα κόστους	Ποσό	
-	Περιοδικά κόστη	κόστος	10	€ 500,000	500,000
				€	500,000
	Τέλος διάρκειας ζωής έργου	κόστος		€	-

Σχήμα 3.8 Περιοδικά Κόστη

3.4 Χρηματοοικονομική Ανάλυση

Στο Σχήμα 3.9 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι οικονομικοί παράμετροι ενώ στο Σχήμα 3.10 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα ετήσια έσοδα από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας και την μείωση εκπομπών άνθρακα.

Οικονομικοί Παράμετροι			
Γενικά			
Κυλιόμενος φόρος κόστους καυσίμου			2%
Τιμή πληθωρισμού	%		12%
Επιτόκιο αναγωγής	%		9%
Ποσοστό επανεπένδυσης	%		9%
Διάρκεια ζωής έργου	έτος		20
Χρηματοδότηση			
Κίνητρα και επιχορηγήσεις	€		0
Τοκοχρεολύσιο	%		70%
Χρέος	€	18,547,200	
Μετοχή	€	7,948,800	
Επιτόκιο δανεισμού	%		7%
Περίοδος χρέους	έτος		15
Πληρωμές χρέους	€/έτος		2,036,383
Ανάλυση φόρου εισοδήματος <input type="checkbox"/>			

Σχήμα 3.9 Οικονομικοί Παράμετροι

Ετήσια έσοδα			
Έσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας			
Ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο	MWh		53,870
Τιμή πωλούμενου ηλεκτρισμού	€/kWh		0.10
Έσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας	€		5,387,036
Κυλιόμενος φόρος πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας	%		2%
Έσοδα από τη μείωση εκπομπών ΑΤΘ			
Μικτή μείωση ΑΤΘ	tn CO ₂ /έτος		25,478
Μικτή μείωση ΑΤΘ - 20 έτη	tn CO ₂		509,558
Έσοδα από τη μείωση εκπομπών ΑΤΘ	€		0
Λοιπά έσοδα (έξοδα) <input type="checkbox"/>			
Έσοδα παραγωγής Καθαρής Ενέργειας (ΚΕ) <input type="checkbox"/>			

Σχήμα 3.10 Ετήσια Έσοδα

Στο Σχήμα 3.11 φαίνονται τα οικονομικά στοιχεία από τα διάφορα κόστη τις διάφορες αποταμιεύσεις και τα έσοδα.

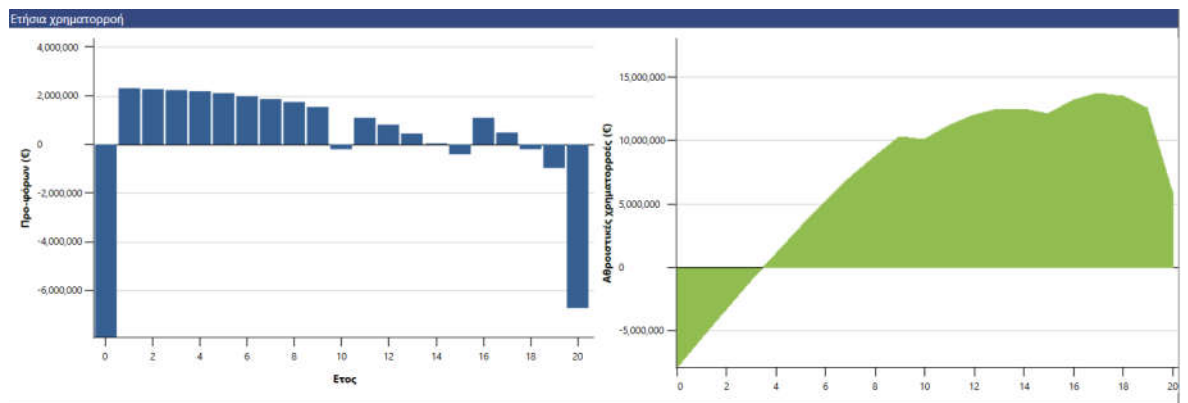
Κόστος Αποθηκεύσεις Έσοδο			
Αρχικά κόστη			
Μελέτη σκοπιμότητας	0.08%	€	20,000
Ανάπτυξη	0.38%	€	100,000
Μηχανολογικά	0.15%	€	40,000
Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	76.8%	€	20,350,000
Ισοζύγιο συστήματος & διάφορα	22.6%	€	5,986,000
Συνολικά αρχικά κόστη	100%	€	26,496,000
Ετήσια χρηματοροή - Ετος 1			
Ετήσια κόστη και πληρωμές χρέους			
Λειτουργία & Συντήρηση		€	1,425,600
Πληρωμές χρέους - 15 έτη		€	2,036,383
Συνολικά ετήσια κόστη		€	3,461,983
Ετήσιες αποταμιεύσεις και έσοδα			
Οριζόμενο από τον χρήστη		€	400,000
Έσοδα από πώληση ηλεκτρικής ενέργειας		€	5,387,036
Έσοδα από τη μείωση εκπομπών ΑΤΘ		€	0
Λοιπά έσοδα (έξοδα)		€	0
Έσοδα παραγωγής ΚΕ		€	0
Συνολικές ετήσιες αποταμιεύσεις και έσοδα		€	5,787,036
Καθαρή ετήσια ταμειακή ροή - Ετος 1		€	2,325,053
Περιοδικά κόστη (πιστώσεις)			
Περιοδικά κόστη - 10 έτη		€	500,000

Σχήμα 3.11 Κόστη Αποταμίευσης

Στο Σχήμα 3.12 , Σχήμα 3.13 φαίνονται λεπτομέρειες σχετικά με την ετήσια χρηματοροή. Συγκεκριμένα στο Σχήμα 3.12 φαίνονται τα ποσά και στο Σχήμα 3.13 φαίνεται μία σχηματική αναπαράσταση.

Ετήσια χρηματοροή		
Ετος	Προ-φόρων	Αθροιστικά
#	€	€
0	-7,948,800	-7,948,800
1	2,309,721	-5,639,079
2	2,281,776	-3,357,302
3	2,239,488	-1,117,814
4	2,180,916	1,063,102
5	2,103,882	3,166,985
6	2,005,942	5,172,926
7	1,884,353	7,057,279
8	1,736,040	8,793,319
9	1,557,554	10,350,873
10	-207,899	10,142,975
11	1,094,118	11,237,093
12	799,968	12,037,060
13	457,124	12,494,184
14	59,474	12,553,658
15	-399,831	12,153,827
16	1,107,914	13,261,740
17	501,339	13,763,079
18	-192,816	13,570,264
19	-985,355	12,584,909
20	-6,711,533	5,873,376

Σχήμα 3.12 Χρηματοροή



Σχήμα 3.13 Διάγραμμα Χρηματοροής

3.5 Βιωσιμότητα Επένδυσης

Η επένδυση γίνεται αποδεκτή όταν **IRR**(εσωτερικός συντελεστής απόδοσης)

είναι μεγαλύτερος του **WACC**(κόστος ευκαιρίας κεφαλαίου). Αν υπάρχει ισότητα μεταξύ των 2 παραπάνω συντελεστών η επένδυση θεωρείται οριακή και στην περίπτωση όπου το κόστος ευκαιρίας κεφαλαίου είναι μεγαλύτερο του εσωτερικού συντελεστή απόδοσης τότε η επένδυση απορρίπτεται. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε πολλές επενδύσεις εμφανίζονται πολλά **IRR** και έτσι δημιουργείται το πρόβλημα ορθής επιλογής εσωτερικού συντελεστή απόδοσης για την επένδυση. Η λύση στο πρόβλημα δίνεται από τον υπολογισμό του **MIRR**(τροποποιημένος συντελεστής απόδοσης) του προεξοφλητικού επιτοκίου όπου η παρούσα αξία κόστους **ΚΠΑ** είναι ίση με την μελλοντική αξία. Η επένδυση γίνεται αποδεκτή με τον τρόπο με το **MIRR** όπως αναφέρθηκε και με το **IRR**. Στην προκειμένη μελέτη η **ΚΠΑ** είναι **4.190.282** ευρώ και η αναλογία οφέλους - κόστους είναι **1.5** οπότε η επένδυση θεωρείται βιώσιμη καθώς ικανοποιεί τις προϋποθέσεις.

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αποσκοπεί στην ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης μεθοδολογίας στρατηγικού σχεδιασμού για τα ΑΠΕ στην Ελλάδα, όπου η ανάλυση χαρτοφυλακίου χρησιμοποιείται για πρώτη φορά σε σχέση με τη χωροθέτηση των ΑΠΕ. Πιο συγκεκριμένα, εστιάζει σε ένα στρατηγικό σχέδιο που θα εξασφαλίσει την εθνική ενεργειακή ανεξαρτησία για 25 χρόνια μετά τη μερική εφαρμογή του, με σημαντικά οικονομικά, κοινωνικοπολιτικά και περιβαλλοντικά οφέλη για την Ελλάδα.

Χρησιμοποιούνται συνολικά είκοσι κριτήρια (αποκλεισμού και αξιολόγησης) για τη χωροθέτηση των ΑΠΕ, τα οποία καλύπτουν σχεδόν πλήρως τα οικονομικά, κοινωνικοπολιτικά, τεχνικά και περιβαλλοντικά ζητήματα που σχετίζονται με τέτοιου είδους εγκαταστάσεις και εφαρμογές. Η πλειονότητα των κριτηρίων συνάδει με τη διεθνή βιβλιογραφία, ωστόσο υπάρχουν και κριτήρια που προτείνονται και εφαρμόζονται για πρώτη φορά σε σχέση με θέματα χωροθέτησης, όπως οι "ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας" (κριτήριο αποκλεισμού-σε θέματα ΑΠΕ) και η "ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας" (κριτήριο αξιολόγησης-σε θέματα ΑΠΕ). Επιπλέον, εισάγεται το κριτήριο "προστασία του τοπίου/οπτική και ακουστική όχληση", διευκολύνοντας τη συνδυασμένη χρήση δύο συναφών κριτηρίων χωροθέτησης που είχαν προταθεί προηγουμένως ("απόσταση από την ακτή" και "οπτικές και ακουστικές επιπτώσεις").

Λαμβάνονται υπόψη ανεμογεννήτριες ισχύος 5 MW, ενώ οι τύποι των κατασκευών στήριξης που επιλέγονται είναι οι TLB για βάθη 50-200 m και οι Hywind για βάθη 200-500 m. Για κάθε ΟΣΥ πραγματοποιείται ακριβής χαρτογράφηση των ανεμογεννητριών με τον καθορισμό συγκεκριμένων ενδιάμεσων αποστάσεων σε κατευθύνσεις παράλληλες και κάθετες προς την επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου. Στη συνέχεια, υπολογίζεται το συνολικό κόστος επένδυσης για κάθε έργο με την εκτίμηση των CAPEX, OPEX και DECEX.

Για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση χαρτοφυλακίου, τα επτά επιλεγμένα ΑΚ αξιολογούνται από ένα EG. Η μεγαλύτερη βαρύτητα αποδίδεται στα κριτήρια "ταχύτητα ανέμου" και "απόσταση από δίκτυο υψηλής τάσης". Επομένως, σύμφωνα με τους διάφορους συμμετέχοντες εμπειρογνώμονες, ο προσανατολισμός της στρατηγικής πολιτικής του τρέχοντος σχεδίου επικεντρώνεται στην τεχνική και οικονομική διάσταση του ζητήματος του σχεδιασμού, με βάση τη δική τους υψηλή εμπειρία. Στη συνέχεια, αξιολογείται ο στρατηγικός αντίκτυπος κάθε ΟΤΣ σε κάθε ΣΕ και υλοποιούνται τρία διαφορετικά σενάρια διαχείρισης που περιλαμβάνουν οικονομικούς περιορισμούς (επένδυση 50%, 60% και 75% του συνολικού χαρτοφυλακίου). Μετά την εφαρμογή των οικονομικών περιορισμών στα τρία σενάρια, επιλέγονται για υλοποίηση 11, 12 και 14

έργα OWF αντίστοιχα. Και στα τρία σενάρια, το OWF3 παρουσιάζει την υψηλότερη στρατηγική αξία από τα επιλεγμένα έργα και το OWF14 τη χαμηλότερη, ενώ τα συνήθως επιλεγμένα έργα και στα 3 χαρτοφυλάκια είναι τα OWF7, OWF8, OWF11, OWF12, OWF13, OWF14, OWF15 και OWF16. Αξίζει να σημειωθεί ότι και στις τρεις περιπτώσεις επιτυγχάνεται η ενεργειακή ανεξαρτησία της χώρας. Το δεύτερο σενάριο συνιστάται για εφαρμογή, καθώς απαιτεί λιγότερο από το 60% του συνολικού επενδυτικού κεφαλαίου και ικανοποιεί πλήρως το όραμα και την αποστολή του παρόντος στρατηγικού σχεδίου, που διασφαλίζει την εθνική ενεργειακή ανεξαρτησία.

Ο προτεινόμενος στρατηγικός σχεδιασμός για τους ΥΗΣ στην Ελλάδα λειτουργεί ως οδηγός για την ανάπτυξη των ΥΗΣ στην Ελλάδα, σύμφωνα με κριτήρια που βασίζονται: (i) στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης και τα επιμέρους χαρακτηριστικά κάθε κατάλληλης περιοχής, (ii) στις σχετικές διατάξεις του ΣΧΣ-ΕΠΕ-ΠΕ,

(iii) στην αδιαμφισβήτητη παγκόσμια εμπειρία, (iv) στη γνώμη των εμπειρογνομόνων και (v) σε εκτενή διεθνή βιβλιογραφική ανασκόπηση, η οποία εξειδικεύεται σε τέτοια θέματα. Για το λόγο αυτό, το παρόν έγγραφο δεν προτείνει απλώς ορισμένες περιοχές για την εγκατάσταση ΟΣΔΕ, αλλά περιοχές που έχουν εξεταστεί σύμφωνα με διάφορες παραμέτρους στο πλαίσιο ενός ευρύτερου πεδίου μελέτης, το οποίο βασίζεται σε μια κατευθυντήρια γραμμή με σαφείς στρατηγικούς στόχους. Κατά συνέπεια, το παρόν πλαίσιο στρατηγικού σχεδιασμού μπορεί να γεφυρώσει σημαντικά κενά μεταξύ έρευνας, ανάπτυξης και εφαρμογής στα πολύπλοκα ζητήματα χωροθέτησης και ανάπτυξης των ΑΠΕ. Η σχετική μεθοδολογία περιλαμβάνει διακριτά στάδια και μπορεί να εφαρμοστεί σε σχέση με διάφορες περιοχές μελέτης και ποικίλες κλίμακες χωροταξικού σχεδιασμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνόφωνη Βιβλιογραφία:

Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας. Διαθέσιμο στο : <http://www.admie.gr/> (έγινε πρόσβαση στις 07 Μαΐου 2022).

Ελληνική Ορνιθολογική Υπηρεσία. Διαθέσιμο στο : <http://www.ornithologiki.gr/> (έγινε πρόσβαση στις 05 Ιουνίου 2022)

Ευρωπαϊκή Στατιστική Υπηρεσία: Eurostat. Διαθέσιμο στο : <https://ec.europa.eu/eurostat/> (έγινε πρόσβαση στις 05 Ιουνίου 2022).

Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας: Επίσημος Χάρτης Σεισμικής Επικινδυνότητας .Διαθέσιμο στο : http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC_WORK/ARTICLES/033/%D7%C1%D1%D4%C7%D3%20%D3%C5%C9%D3%CC%C9%CA%C7%D3%20%C5%D0%C9%CA%C9%CD%C4%D5%CD%CF%D4%C7%D4%C1%D3.htm/ (έγινε πρόσβαση στις 02 Ιουνίου 2022).

Υδρογραφική Υπηρεσία Πολεμικού Ναυτικού. Διαθέσιμο στο : https://www.hnhs.gr/el/?option=com_opencart&Itemid=269&route=common/home/ (έγινε πρόσβαση στις 18 Απριλίου 2022).

Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (ΥΠΕΚΑ). Ειδικό πλαίσιο χωροταξικού σχεδιασμού και βιώσιμης ανάπτυξης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ΠΙΝ 49828/2008, ΦΕΚ Β' 2464/3-12-08; ΥΠΕΚΑ : Αθήνα Ελλάδα, 2008.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία:

4C Offshore. Global offshore wind farms database. Διαθέσιμο στην σελίδα:<https://www.4c offshore.com/windfarms/> (έγινε πρόσβαση στις 05 Μαΐου 2022).

Argin, M.; Yerci, V. (2015)The assessment of offshore wind power potential of Turkey. In Proceedings of the 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkey, 26–28 November.

Argin, M.; Yerci, V.; Erdogan, N.; Kucuksari, S.; Cali, U. (2019)Exploring the offshore wind energy potential of Turkey based on multicriteria site selection. Energy Strateg. Rev., 23, 33–46.

Beacham, J.L.; Jensen, J.R.; Wang, Z. (2009) A Feasibility Analysis of South Carolina Wind Resources for Electric Power Generation; Institute for Public Service and Policy Research, University of South Carolina: Columbia, SC, USA,.

Bjerkseter, C.; Agotnes, A. (2013) Levelised costs of energy for offshore floating wind turbine concepts. Master Thesis, Norwegian University of Life Sciences (NMBU), Oslo, Norway,.

Brigham, E.F.; Houston, J.F (2015). Fundamentals of Financial Management, Concise 8th ed.; Cengage Learning: Mason, OH, USA,.

BVG Associates (2016) Oil and Gas “Seize the Opportunity” Guides: Offshore Wind; Scottish Enterprise: Glasgow, UK,.

Castro-Santos, L. (2016) Decision variables for floating offshore wind farms based on life-cycle cost: The case study of Galicia (North-West of Spain). *Ocean Eng*, 127, 114–123.

Castro-Santos, L.; Martins, E.; Soares (2017), C.G. Economic comparison of technological alternatives to harness offshore wind and wave energies. *Energy*, 140, 1121–1130.

Chaouachi, A.; Covrig, C.F.; Ardelean, M. (2017) Multi-criteria selection of offshore wind farms: Case study for the Baltic States. *Energy Policy*, 103, 179–192.

Christidis, T.; Law, J. (2012) Review: The use of Geographic Information Systems in wind turbine and wind energy research. *J. Renew. Sustain. Energy*, 4, 012701.

Christoforaki, M.; Tsoutsos, T. (2017) Sustainable siting of an offshore wind park a case in Chania, Crete. *Renew. Energy*, 109, 624–633.

Concrete Wind Towers. (2007); Διαθέσιμο στο : www.concretecentre.com.

Costoya, X.; deCastro, M.; Santos, F.; Sousa, M.C.; Gomez-Gesteira, M. (2019) Projections of wind energy resources in the Caribbean for the 21st century. *Energy*, 178, 356–367.

Deign J. (2017) An Illustrated Guide to the Growing Size of Wind Turbines [Internet]. Διαθέσιμο στο : <https://www.greentechmedia.com/articles/read/an-illustrated-guide-to-the-growing-size-of-wind-turbines>.

Deutsche WindGuard GmbH (2018) Capacity Densities of European Offshore Wind Farms; Federal Maritime and Hydrographic Agency: Hamburg, Germany.

EMODnet: Your gateway to marine data in Europe Διαθέσιμο στο : <http://www.emodnet-humanactivities.eu/view-data.php/> (έγινε πρόσβαση στις 01 Ιουνίου 2022).

European Network of Transmission System Operators for Electricity: Net Electricity Generating Capacity. Διαθέσιμο στο : <https://www.entsoe.eu/data/power-stats/net-gen-capacity/> (έγινε πρόσβαση στις 03 Ιουνίου 2022).

Fetanat, A.; Khorasaninejad, E. (2015) A novel hybrid MCDM approach for offshore wind farm site selection: A case study of Iran. *Ocean Coast. Manage*, 109, 17–28.

Fischer, T.; de Vries, W.; Schmidt, B. (2010) Upwind WP4 Design Basis; Institute of Aircraft Design Universität Stuttgart: Stuttgart, Germany.

Fred, D.; Forest, D. (2017) Strategic Management: A Competitive Advantage Approach, Concepts and Cases, 16th ed.; Pearson Education: Edinburgh, UK,.

GEODATA: Digital data. Available online: <https://web.archive.org/web/20180315103323/http://geodata.gov.gr/> (έγινε πρόσβαση στις 07 Ιουνίου 2022).

Georgopoulou, E.; Mirasgedis, S.; Sarafidis, Y.; Koutentaki, D.; Lalas, D.; Gakis, N. (2014). National Energy Plan: Roadmap to 2050; Institute for Environmental Research and Sustainable Development, National Observatory of Athens: Athens, Greece,

Glauert, H. (1935). Airplane propellers. In W. F. Durand (Ed.), Aerodynamic Theory (Vol. 4, pp. 169-360). Berlin: Julius Springer.

Global Wind Energy Council. Annual Market Update 2017 - Global Wind Report. Διαθέσιμο στο : www.gwec.net.

Gode Wind 1 and 2—4C Offshore. Διαθέσιμο στο : <https://www.4coffshore.com/windfarms/gode-wind-1-and-2-germany-de13.html> (έγινε πρόσβαση στις 03 Ιουνίου 2022).

Gonzalez-Rodriquez, A.G. (2017) Review of offshore wind farm cost components. Energy Sustain. Dev., 37, 10–19.

Hansen, M. O. (2008). Aerodynamics of Wind Turbines (2nd Edition ed.). London: Earthscan.

Hellenic Centre for Marine Research. Διαθέσιμο στο : <http://www.hcmr.gr/el/> (έγινε πρόσβαση στις 20 Απριλίου 2022).

Hellenic Wind Energy Association (2018) Wind energy statistics—First semester of 2018; Hellenic Wind Energy Association (HWEA): Athens, Greece,.

Hong, L.; Möller, B. (2011) Offshore wind energy potential in China: Under technical, spatial and economic constraints. Energy, 36, 4482–4491.

Hywind Scotland Pilot Park—4C Offshore. Διαθέσιμο στο : <https://www.4coffshore.com/windfarms/hywind-scotland-pilot-park-united-kingdom-uk76.html/> (έγινε πρόσβαση στις 28 Μαΐου 2022).

Hywind: The world's leading floating offshore wind solution. Διαθέσιμο στο : <https://www.equinor.com/en/what-we-do/hywind-where-the-wind-takes-us.html/> (έγινε πρόσβαση στις 31 Μαΐου 2022).

International Renewable Energy Agency. (2012) Renewable Energy Cost Analysis - Wind Power. 1: Power Sector. Διαθέσιμο στο : <http://www.irena.org/publications/2012/Jun/Renewable-Energy-Cost-Analysis---Wind-Power>.

Ioannou, A.; Angus, A.; Brennan, F. (2018) A lifecycle techno-economic model of offshore wind energy for different entry and exit instances. Appl. Energy, 221, 406–424.

Jalbi, S., & Bhattacharya, S. (2020). Concept design of jacket foundations for offshore wind turbines in 10 steps. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 139, 106357.1

Jonkman, J.; Butterfield, S.; Musial, W.; Scott, G. (2009) Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development; National Renewable Energy Laboratory: Golden, CO, USA,.

Kaldellis JK, Zafirakis D.(2011) The Wind Energy (r)evolution: A Short Review of a Long History. Renewable Energy [Internet]. 36. Διαθέσιμο στο: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148111000085>.

Kim, C.-K.; Jang, S.; Kim, T.Y (2018.) Site selection for offshore wind farms in the southwest coast of South Korea. *Renew. Energy*, 120, 151–162.

Kim, J.Y.; Kang, K.S.; Oh, K.Y.; Lee, J.S.; Ryu, M.S. A study on the site selection of offshore wind farm around Korean Peninsula. In Proceedings of the 3rd International Conference on Ocean Energy, Bilbao, Spain, 6–8 October 2010.

Kim, T.; Park, J.-I.; Maeng, J (2016.) Offshore wind farm site selection study around Jeju Island, South Korea. *Renew. Energy*, 94, 619–628.

Lahtinen, T.; Hämäläinen, R.; Liesiö, J. (2017) Portfolio decision analysis methods in environmental decision making. *Environ. Modell. Softw.*, 94, 73–86.

Lee, K.-H.; Jun, S.-O.; Pak, K.-H.; Lee, D.-H.; Lee, K.-W.; Park, J.-P. (2010) Numerical optimization of site selection for offshore wind turbine installation using genetic algorithm. *Curr. Appl. Phys.*, 10, S302–S306.

Leishman, J. G. (2006). *Principles of Helicopter Aerodynamics*. New York: Cambridge University Press.

Lynch, K.; Murphy, J. ,(2012) Overview of Offshore Wind and Ocean Energy Technologies; Hydraulics and Maritime Research Centre: Ireland, UK.

Lynch, K.; Murphy, J.; Serri, L.; Airoidi, D. Site selection methodology for combined wind and ocean energy technologies in Europe. In Proceedings of the 4th International Conference on Ocean Energy, Dublin, Ireland, 17–19 October 2012.

Mahdy, M.; Bahaj, A.S. (2018) Multi criteria decision analysis for offshore wind energy potential in Egypt. *Renew. Energy*, 118, 278–289.

Malhotra S. (2011) Selection, Design and Construction of Offshore Wind Turbine Foundations. In: Al-Bahadly I, editor. *Wind Turbines* [Internet]. Rijeka: IntechOpen;. Available from: <https://doi.org/10.5772/15461>.

MarineTraffic: Global Ship Tracking Intelligence | AIS Marine Traffic. Διαθέσιμο στο : <https://www.marinetraffic.com/en/ais/home/centerx:25.7/centery:36.3/zoom:11>

McGowan, J. G. (2000). *Windpower: A Turn of the Century Review*. *Annual Review of Energy and the Environment* , 25, 147-197.

Mekonnen, A.D.; Gorsevski, P.V. (2015) A web-based participatory GIS (PGIS) for offshore wind farm suitability within Lake Erie, Ohio. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 41, 162–177.

Möller, B. (2011) Continuous spatial modelling to analyse planning and economic consequences of offshore wind energy. *Energy Policy*, 39, 511–517.

Myhr, A.(2016) Developing offshore floating wind turbines: The Tension-Leg-Buoy design. *Philosophiae Doctor (PhD) Thesis*, Norwegian University of Life Sciences

(NMBU), Oslo, Norway, 2016. Ph.D. Thesis, Norwegian University of Life Sciences (NMBU), Oslo, Norway.

Myhr, A.; Bjerkseter, C.; Ågotnes, A.; Nygaard, T.A. (2014) Levelised cost of energy for offshore floating wind turbines in a life cycle perspective. *Renew. Energy*, 66, 714–728.

Ng, C.; Ran, L. (2016) *Offshore Wind Farms: Technologies, Design and Operation*; Woodhead Publishing: Duxford, UK,.

Nygaard, T.A.; Myhr, A.; Karl, J.M. (2009) A comparison of two conceptual designs for floating wind turbines. In *Proceedings of the 3rd European Offshore Wind Conference & Exhibition*, Stockholm, Sweden, 14–16 September.

Onshore Wind [Internet]. Διαθέσιμο στο : <https://www.iea.org/tcep/power/renewables/onshorewind/>.

Ou, L.; Xu, W.; Yue, Q.; Ma, C.L.; Teng, X.; Dong, Y.E. (2018) Offshore wind zoning in China: Method and experience. *Ocean Coast. Manage.*, 151, 99–108.

Pillai, A.C.; Chick, J.; Khorasanchi, M.; Barbouchi, S.; Johanning, L. (2017) Application of an offshore wind farm layout optimization methodology at Middelgrunden wind farm. *Ocean Eng.*, 139, 287–297.

Ruccell, T. *Floating Wind: Changing Gear*. 2019. Διαθέσιμο στο : <https://www.4coffshore.com/news/floating-wind--changing-gear-nid13899.html> (έγινε πρόσβαση στις 17 Μαΐου 2022).

Russell, T. *OWFs supported by EIB's €17 billion*; 2015. Διαθέσιμο στο : <https://www.4coffshore.com/news/owfs-supported-by-eib27s-8017-billion-nid2431.html> (έγινε πρόσβαση στις 05 Ιουνίου 2022)

Schallenberg-Rodríguez, J.; Montesdeoca, N.G. (2018) Spatial planning to estimate the offshore wind energy potential in coastal regions and islands. Practical case: The Canary Islands. *Energy*, 143, 91–103.

Shrestha S. (2015) *Design and Analysis of Foundation for Onshore Tall Wind Turbines*.

Stefanakou, A.-A.; Nikitakos, N. A decision support model for site selection of offshore wind farms. In *Proceedings of the 9th International Scientific Conference on Energy and Climate Change*, Athens, Greece, 12–14 October 2016.

Stehly, T.; Heimiller, D.; Scott, G. (2016) *Cost of Wind Energy Review*; National Renewable Energy Laboratory: Denver, CO, USA, 2017.

Sun, H.; Yang, H.; Gao, X. (2017) Study on offshore wind farm layout optimization based on decommissioning strategy. *Energy Procedia*, 143, 566–571.]

Svensson H. (2010) *Design of Foundations for Wind Turbines*. Lund University, Sweden

USDOE. (2008). *20% Wind Energy By 2030*. United States Department of Energy.

Vagiona, D.G.; Kamilakis, M. (2018) Sustainable site selection for offshore wind farms in the South Aegean-Greece. *Sustainability*, 10, 749.

Vagiona, D.G.; Karanikolas, N.M. (2012) A multicriteria approach to evaluate offshore wind farms siting in Greece. *Glob. NEST J.*, 14, 235–243.

Vasileiou, M.; Loukogeorgaki, E.; Vagiona, D.G (2017). GIS-based multi-criteria decision analysis for site selection of hybrid offshore wind and wave energy systems in Greece. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 73, 745–757.

Waewsak, J.; Landry, M.; Gagnon, Y. (2015) Offshore wind power potential of the Gulf of Thailand. *Renew. Energy* , 81, 609–626.

Weston, D. (2012), Public health and climate change. *Australian and New Zealand Journal of Public Health*, 36: 104-106. <https://doi.org/10.1111/j.1753-6405.2011.00818.x> 1

Weston, D.(2015)Gode . Wind construction starts. Διαθέσιμο στο : https://www.windpoweroffshore.com/article/1342947?utm_source=website&utm_medium=social (έγινε πρόσβαση στις 07 Ιουνίου 2022).

Wind Europe Business Intelligence; Remy, T.; Mbistrova, (2018)A. Offshore Wind in Europe: Key Trends and Statistics 2017; Wind Europe: Brussels, Belgium,.

Wind Europe Business Intelligence; Selot, F.; Fraile, D.; Brindley, G. Offshore Wind in Europe: Key Trends and Statistics 2018; Wind Europe: Brussels, Belgium, 2019.

Wind Power [Internet]. Wikipedia. Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Wind_power&oldid=865191201.

Wind Turbine Tower [Internet]. Διαθέσιμο στο : <http://www.steelwindtower.com/wind-turbine-tower/>.

Windmill [Internet]. Wikipedia. Διαθέσιμο στο : <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Windmill&oldid=867607700>.

Wu, B.; Yip, T.L.; Xie, L.; Wang, Y. (2018) A fuzzy-MADM based approach for site selection of offshore wind farm in busy waterways in China. *Ocean Eng*, 168, 121–132.

Yue, C.-D.; Yang, M.-H. (2009)Exploring the potential of wind energy for a coastal state. *Energy Policy*, 37, 3925–3940.

Retscreen Expert Official Website (Government of Canada) - [RETScreen \(nrcan.gc.ca\)](https://www.nrcan.gc.ca/retscreen)