



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Διεπιστημονικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη

Μεταπτυχιακή Εργασία

«Μελέτη σκοπιμότητας ανάπτυξης υπεράκτιου αιολικού πάρκου στην
περιοχή της Λήμνου»

Φοιτήτρια: Κόττα Ευαγγελία
Α.Μ:08120812

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Σουκισιάν Τακβόρ

Αθήνα, 2022



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών: Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών.

Η ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας δεν θα ήταν δυνατή χωρίς την καθοδήγηση και υποστήριξη του επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Σουκισιάν Τακβόρ διευθυντή ερευνών του Ελληνικού Κέντρου Θαλάσσιων Ερευνών. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την παρούσα εργασία όσο και για την υπομονή και επιμονή του. Οι γνώσεις που μεταλαμπάδευσε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, είμαι σίγουρη ότι θα με ακολουθούν στη μετέπειτα επαγγελματική μου εξέλιξη. Στο πλαίσιο ευγνωμοσύνης θα ήθελα ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος, για την συμβολή τους στην γνωσιακή μου εξέλιξη.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την άμεση υποστήριξη, συμπαράσταση και βοήθεια σε όλη μου αυτή την προσπάθεια.

ΑΦΙΕΡΩΣΗ

Στους γονείς μου Βασίλη και Μαρία.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Πριν από περισσότερο από έναν αιώνα, εμφανίστηκαν οι πρώτες ανεμογεννήτριες. Μετά την ανάπτυξη της ηλεκτρικής γεννήτριας στη δεκαετία του 1830, οι μηχανικοί άρχισαν να πειραματίζονται με την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας για τη δημιουργία ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, η σύγχρονη αιολική ενέργεια θεωρείται ότι εφευρέθηκε στη Δανία, όπου οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα κατασκευάστηκαν το 1891 και μια ανεμογεννήτρια 22,8 μέτρων άρχισε να λειτουργεί το 1897.

Χρησιμοποιώντας την κινητική ενέργεια που παρέχεται από τον κινούμενο αέρα, η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιώντας ανεμογεννήτριες ή άλλες τεχνολογίες μετατροπής αιολικής ενέργειας, αυτό μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο άνεμος χτυπά πρώτα τα πτερύγια μιας τουρμπίνας, στρέφοντάς τα και η τουρμπίνα προσαρτάται σε αυτά. Περιστρέφοντας έναν άξονα που είναι συνδεδεμένος σε μια γεννήτρια, αυτό μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε περιστροφική ενέργεια, παρέχοντας ηλεκτρική ενέργεια μέσω ηλεκτρομαγνητισμού.

Το μέγεθος της τουρμπίνας και το μήκος των πτερυγίων της καθορίζουν πόση ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να παραχθεί από τον άνεμο. Η έξοδος σχετίζεται αντιστρόφως με το μέγεθος του ρότορα και με το τετράγωνο της ταχύτητας του ανέμου. Θεωρητικά, το δυναμικό για αιολική ενέργεια αυξάνεται κατά έναν παράγοντα όταν διπλασιάζεται η ταχύτητα του ανέμου.

Η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές συνεχίζει να αυξάνεται, λόγω της ανάγκης της κοινωνίας να καταπολεμήσει την κλιματική αλλαγή. Το 16% της ευρωπαϊκής παραγωγής παράγεται πλέον αποκλειστικά από αιολική ενέργεια. Οι πιο προσιτές τεχνολογίες νέας γενιάς σήμερα είναι συχνά η αιολική και η ηλιακή. Ολόκληρο το ενεργειακό σύστημα εξελίσσεται και μια από τις πιο σημαντικές πηγές ενέργειας για την επιτάχυνση της απανθρακοποίησης είναι η αιολική ενέργεια.

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια είναι η καθαρή, ανανεώσιμη ενέργεια που παράγεται με τη χρήση της δύναμης του ανέμου καθώς δημιουργείται στον ανοιχτό ωκεανό, όπου δεν υπάρχουν εμπόδια και φτάνει σε υψηλότερη και πιο σταθερή ταχύτητα από ό,τι στην ξηρά. Μεγάλες δομές που βρίσκονται στον βυθό της θάλασσας και είναι εξοπλισμένες με τις πιο πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις έχουν δημιουργηθεί για να μεγιστοποιήσουν αυτόν τον πόρο.

Είναι απαραίτητο, λοιπόν, να μελετηθούν και να ερευνηθούν διεξοδικά τα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Προκειμένου να δοθεί μια διεξοδική πρόταση για τη θέση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων στην Ελλάδα, η παρούσα διπλωματική εργασία προχωρά στην περαιτέρω αξιοποίηση των δεδομένων σχετικά με τις δυνατότητες της περιοχής του Αιγαίου και πιο συγκεκριμένα της Λήμνου για αιολική ενέργεια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μία τεχνοοικονομική μελέτη σκοπιμότητας ανάπτυξης υπεράκτιου αιολικού πάρκου στην περιοχή της Λήμνου, η οποία θεωρείται η επικρατέστερη υποψήφια περιοχή χωροθέτησης του πρώτου ελληνικού υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν επτά διαφορετικά μοντέλα ανεμογεννήτριας με ισχύ μεγαλύτερη των 5MW που βρίσκονται διαθέσιμα στην αγορά την προκείμενη χρονική στιγμή. Τα μοντέλα που επιλέχθηκαν είναι η Aerodyn scd 8.0MW/168, η Multibrid M5000, η Haliade 150-6MW, η Gamesa G128-5.0MW, η Gamesa G128-8.0MW, η Vestas V164 8 MW και η Vestas V164 9.5 MW.

Αρχικά, στην εργασία γίνεται μία εισαγωγή στον άνεμο και την αιολική ενέργεια και αναλύονται διάφορα χαρακτηριστικά τους όπως το φαινόμενο τύρβης αλλά και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αιολικής ενέργειας. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, τα πολλαπλά πλεονεκτήματά τους αλλά και τα κριτήρια για την χωροθέτησή τους. Γίνεται μία σύντομη αναφορά στα βήματα που ακολουθούνται κατά τη δημιουργία τους αλλά και στους διάφορους τύπους θεμελίων που υπάρχουν διαθέσιμα στην αγορά. Έπειτα, γίνεται εκτενής παρουσίαση των διάφορων μοντέλων ανεμογεννητριών και παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους που παρέχονται από τους κατασκευαστές.

Στη συνέχεια, αναλύεται η σημασία και χρήση των καμπύλων ισχύος και αναφέρονται τα διάφορα μοντέλα που υπάρχουν για την αριθμητική τους προσομοίωση. Χρησιμοποιώντας τα διάφορα παραμετρικά μοντέλα και με τη βοήθεια του προγράμματος MATLAB δημιουργήθηκαν για κάθε μοντέλο ανεμογεννήτριας οι καμπύλες ισχύος.

Στο επόμενο Κεφάλαιο αναφέρεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων. Προκειμένου να ελεγχθεί η καταλληλότητα της περιοχής υπολογίστηκαν μέσω του προγράμματος MATLAB το ετήσιο, εποχικό και μηνιαίο διαθέσιμο αιολικό δυναμικό της περιοχής, ο δείκτης Mean Annual Variability (MAV), ο οποίος αφορά την εποχικότητα και ο δείκτης Inter-annual Variability (IAV), ο οποίος αφορά τη διαχρονική μεταβλητότητα του ανέμου. Υπολογίστηκαν ο συντελεστής ισχύος C_p , ο παράγοντας αξονικής επαγωγικής ροής a και ο συντελεστής ώσης C_T , η μέση ταχύτητα ανά μοντέλο, η μέση ισχύς ανά μοντέλο και τέλος τα ποσοστά λειτουργίας των ανεμογεννητριών ανά έτος.

Το τελευταίο Κεφάλαιο αφιερώθηκε στον υπολογισμό του δείκτη Διαβαθμισμένου Κόστους Ενέργειας (LCOE). Ο δείκτης αυτός προσφέρει τη δυνατότητα μετατροπής των διαφορετικών μοντέλων ανεμογεννητριών σε οικονομικά στοιχεία προκειμένου να γίνει η πιο κερδοφόρα επιλογή. Πρώτα, χρειάστηκε να υπολογισθούν το κόστος επενδυτικού κεφαλαίου (CAPEX), το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του έργου (OPEX), τα κόστη ασφάλειας και απεγκατάστασης του έργου, καθώς και το Σταθμικό Κόστος Κεφαλαίου (WACC). Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από τους παραπάνω υπολογισμούς και εξηγείται αναλυτικά η καταλληλότητα των μοντέλων στη συγκεκριμένη τοποθεσία.

Λέξεις κλειδιά: Υπεράκτιο αιολικό πάρκο, Δείκτης Διαβαθμισμένου Κόστους Ενέργειας (LCOE), Τεχνοοικονομική Ανάλυση, Αιολική Ενέργεια, Καμπύλη Ισχύος.

ABSTRACT

This thesis is a techno-economic study of the feasibility of developing an offshore wind farm in the area of Lemnos, which is considered the main candidate area for the first Greek offshore wind farm. For the calculations, seven different wind turbine models with a power greater than 5MW that are currently on the market were used. The models selected are Aerodyn scd 8.0MW/168, Multibrid M5000, Haliade 150-6MW, Gamesa G128-5.0MW, Gamesa G128-8.0MW, Vestas V164 8 MW and Vestas V5.

Initially, the paper provides an introduction to wind and wind energy and analyzes their various characteristics such as the turbulence effect as well as the advantages and disadvantages of wind energy. Then, the offshore wind farms are described, their multiple advantages as well as the criteria for their siting. A brief reference is made to the steps followed during their creation as well as to the various types of foundations available on the market. Then, there is an extensive presentation of the various models of wind turbines and their technical characteristics provided by the manufacturers are listed.

Then, the importance and use of power curves is analyzed and the various models that exist for their numerical simulation are mentioned. Using the various parametric models and with the help of the MATLAB program, the power curves were created for each wind turbine model.

The next Chapter mentions the methodology used to calculate the results. In order to check the suitability of the area, the annual, seasonal and monthly available wind potential of the area, the Mean Annual Variability (MAV) index, which concerns seasonality, and the Inter-annual Variability (IAV) index, were calculated through the MATLAB program which concerns the intertemporal variability of the wind. The power factor CP, the axial induction flux factor α and the thrust factor CT, the average speed per model, the average power per model and finally the operation rates of the wind turbines per year were calculated.

The last Chapter was dedicated to the calculation of the Levelized Cost of Energy (LCOE). This index offers the ability to convert the different models of wind turbines into economic figures in order to make the most profitable choice. First, the capital investment costs (CAPEX), project operation and maintenance costs (OPEX), project security and decommissioning costs, and the WACC needed to be calculated. Finally, the conclusions drawn from the above calculations are listed and the appropriateness of the models in the specific location is explained in detail.

Key Words: Offshore Wind Farm (OWF), Levelized Cost of Energy (LCOE), Techno-economic Analysis, Wind Energy, Power Curve.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	- 1 -
1.1	Σκοπός.....	- 1 -
1.2	Δομή	- 1 -
2.	ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ	- 2 -
2.1	Άνεμος	- 2 -
2.2	Ταξινόμηση Αιολικής Ενέργειας και Κατηγορίες Στροβίλων IEC	- 2 -
2.3	Φαινόμενο Τύρβης	- 3 -
2.4	Εκτίμηση διάτμησης ανέμου	- 4 -
2.5	Νόμος ισχύος.....	- 4 -
2.6	Συνάρτηση Κατανομής Πιθανοτήτων Weibull	- 5 -
2.7	Συνάρτηση κατανομής Rayleigh.....	- 5 -
2.8	Αεροδυναμική Ανεμογεννήτριας.....	- 6 -
3.	ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	- 8 -
3.1	Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Αιολικής Ενέργειας	- 8 -
3.2	Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα	- 11 -
3.2.1	Πλεονεκτήματα Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων	- 11 -
3.3	Κριτήρια Χωροθέτησης	- 12 -
3.4	Δημιουργία Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου	- 14 -
3.5	Ταξινόμηση Υπεράκτιων Ανεμογεννητριών	- 14 -
3.6	Εγκατάσταση Θεμελίων.....	- 16 -
3.6.1	Θεμέλια Monopile.....	- 16 -
3.6.2	Θεμέλια Jacket.....	- 18 -
3.6.3	Θεμέλια βασιζόμενα στη βαρύτητα (Gravity-based foundation-GBF).....	- 19 -
3.6.3	Τρίποδα Θεμέλια.....	- 20 -
3.7	Πλωτοί Τύποι Θεμελίων	- 21 -
3.7.1	Θεμέλια Spar.....	- 21 -
3.7.2	Ημι-υποβρύχια Θεμέλια.....	- 21 -
3.7.3	Tension leg platform (TLP).....	- 22 -
3.8	Μέρη που απαρτίζουν μία ανεμογεννήτρια.....	- 23 -
4.	ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	- 25 -
4.1	Aerodyn SCD 8.0/168	- 25 -

4.2 Multibrid M5000 - 5,00 MW	- 28 -
4.3 Haliade 150-6MW	- 32 -
4.4 Gamesa G128-5.0MW Offshore.....	- 35 -
4.5 Gamesa G128-8.0MW	- 38 -
4.6 Vestas v164-8 MW	- 41 -
4.7 Vestas v164-9.5 MW	- 43 -
5. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ	- 45 -
5.1 Μοντελοποίηση ταχύτητας ανέμου	- 46 -
5.1.1 Διακριτά Μοντέλα	- 48 -
5.1.2 Ντετερμινιστικά και Πιθανολογικά Μοντέλα	- 48 -
5.1.3 Παραμετρικά και μη Παραμετρικά Μοντέλα	- 48 -
5.1.4 Μοντέλα που βασίζονται σε υποτιθέμενο σχήμα, προσαρμογή καμπύλης και σε πραγματικά δεδομένα	- 48 -
5.2 Μοντελοποίηση Καμπύλης Ισχύος	- 49 -
5.2.1 Παραμετρικά Μοντέλα	- 49 -
5.2.2 Προσέγγιση Πολυωνυμικής Συνάρτησης.....	- 49 -
6. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	- 52 -
6.1 Επιλογή Βόρειας Λήμνου για Εγκατάσταση Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου .	- 52 -
6.2 Επεξεργασία Δεδομένων.....	- 53 -
6.3 Δείκτες Mean Annual Variability (MAV) - Inter-annual Variability (IAV)	- 57 -
6.4 Υπολογισμοί με μετατροπή.....	- 59 -
6.5 Ποσοστά Λειτουργίας Ανεμογεννητριών ανά Έτος και Συνολικά.....	- 70 -
7. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	- 72 -
7.1 Υπολογισμός Διαβαθμισμένου Κόστους Ενέργειας (LCOE)	- 72 -
7.2 LCOE Απώλειες	- 75 -
7.2.1. Υπολογισμός των απωλειών (Losses)	- 76 -
7.3 Υπολογισμός κεφαλαίου δαπανών (CAPEX)	- 77 -
7.3.2. Υπολογισμός του CAPEX.....	- 78 -
7.4 Υπολογισμός δείκτη ECP	- 79 -
7.5 Υπολογισμός λειτουργικών δαπανών (OPEX).....	- 81 -
7.6 Υπολογισμός Σταθμισμένου Μέσου Κόστους Κεφαλαίου (WACC)	- 82 -
7.7 Παρουσίαση των τελικών αποτελεσμάτων του LCOE για κάθε μοντέλο τουρμπίνας	- 82 -
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	- 85 -

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	- 87 -
------------------------------	---------------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	- 89 -
------------------------	---------------

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Απεικόνιση των αεροδυναμικών δυνάμεων που ασκούνται στην αεροτομή (Πηγή: External lightning protection system for wind turbine blades - aerodynamics) ..	- 6 -
Εικόνα 2: Αναπαράσταση τμημάτων αιολικού πάρκου (Πηγή: https://www.dnv.de/news/dnv-gl-launches-world-s-most-comprehensive-service-specification-for-wind-power-plants-58040) ..	- 8 -
Εικόνα 3: Το πρώτο ολλανδικό υπεράκτιο αιολικό πάρκο της εταιρείας Ørsted (Πηγή: Borssele 1 & 2) ..	- 11 -
Εικόνα 4: Gravity Based Foundation (Πηγή: Seatower AS) ..	- 15 -
Εικόνα 5: Τύποι πλωτών θεμελίων (Πηγή: Seatower AS).....	- 16 -
Εικόνα 6: Εγκατάσταση Monopiles (Πηγή: Seatower AS).....	- 17 -
Εικόνα 7: Εγκατάσταση Jacket (Πηγή: Seatower AS).....	- 18 -
Εικόνα 8: Απεικόνιση της μεταφοράς και εγκατάστασης Gravity Based Foundation (a.) Μεταφορά των GBF με φορηγίδα (b.) Τοποθέτηση GBF με γερανοφόρο σκάφος (Πηγή: https://www.paris-normandie.fr) ..	- 19 -
Εικόνα 9: Απεικόνιση της μεταφοράς των Gravity Based Foundation με τη μέθοδο float and submerged (Πηγή: rechargenews) ..	- 20 -
Εικόνα 10: Απεικόνιση ανεμογεννήτριας με θεμέλια tripod (Πηγή: https://cathwell.com/tech-categories/need-design/wind-turbines/wind-turbine-design/).....	- 20 -
Εικόνα 11: Απεικόνιση πρώτης πλατφόρμας Spar στη Νορβηγία (Πηγή: https://stainless-steel-world.net/first-spar-platform-for-norwegian-waters/).....	- 21 -
Εικόνα 12: Συμβατική ημι-υποβρύχια πλατφόρμα (Marine 7000 4ης γενιάς) (Πηγή: Response Analysis of a Truss-Pontoon Semisubmersible With Heave-Plates, Nagan Srinivasan) ..	- 22 -
Εικόνα 13: Απεικόνιση Θεμελίων υπεράκτιας ανεμογεννήτριας Tension Leg Platforms (TLPs) (Πηγή: https://www.modec.com/business/floater/tlp/).....	- 23 -
Εικόνα 14: Η βάση σε σχήμα Υ περίπου 18 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας (Πηγή: windtech-aerodyn-two-blade-floating-8mw-scd) ..	- 26 -
Εικόνα 15: Παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών για την ανεμογεννήτρια Aerodyn SCD 8.0/168. (Πηγή: wind-turbine-models-aerodyn-scd-8.0-168) ..	- 27 -
Εικόνα 16: Καμπύλη ισχύος για την ανεμογεννήτρια Aerodyn SCD 8.0/168. (Πηγή //en.wind-turbine-models.com/turbines/1116-aerodyn-scd-8.0-168).....	- 28 -
Εικόνα 17: Αναπαράσταση του κιβωτίου ταχυτήτων και του ρόταρα της ανεμογεννήτριας Multibrid M5000 - 5,00 MW. (Πηγή: Areva- Multibrid M5000 - 5,00 MW).....	- 29 -

Εικόνα 18: Αναπαράσταση του συστήματος ελέγχου του αέρα της γεννήτριας και του μετασχηματιστή της ανεμογεννήτριας Multibrid M5000 - 5,00 MW. (Πηγή: Areva-Multibrid M5000 - 5,00 MW).....	- 29 -
Εικόνα 19: Παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών για την ανεμογεννήτρια Multibrid M5000 - 5,00 MW. (Πηγή: thewindpower /turbine_en_90_multibrid_m5000)..	- 31 -
Εικόνα 20: Καμπύλη ισχύος για την ανεμογεννήτρια Multibrid M5000 - 5,00 MW. (Πηγή: thewindpower /turbine_ Multibrid M5000 - 5,00 MW)	- 31 -
Εικόνα 21: Αναπαράσταση των στοιχείων του ρότορα για την ανεμογεννήτρια Haliade 150-6MW. (Πηγή: GE-Haliade 150-6MW)	- 32 -
Εικόνα 22: Παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών για την ανεμογεννήτρια HaliadeTM 150-6MW. (Πηγή: thewindpower /turbine_ HaliadeTM 150-6MW).....	- 34 -
Εικόνα 23: Καμπύλη ισχύος για την ανεμογεννήτρια Haliade 150-6MW. (Πηγή: thewindpower /turbine_Haliade 150-6MW)	- 34 -
Εικόνα 24: Μοντέλο Ανεμογεννήτριας Gamesa G128-5.0MW Offshore (Πηγή: wind-turbine-models gamesa-g128-5.0mw).....	- 35 -
Εικόνα 25: Παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών για την ανεμογεννήτρια Gamesa G128-5.0MW Offshore. (Πηγή: thewindpower /turbine_ Gamesa G128-5.0MW Offshore)	- 37 -
Εικόνα 26: Καμπύλη ισχύος για την ανεμογεννήτρια Gamesa G128-5.0MW Offshore. (Πηγή: thewindpower /turbine_en_1558_siemens-gamesa_sg-8.0-167-dd)	- 37 -
Εικόνα 27: Ο μεγαλύτερος ρότορας εξοπλισμένος με νέες αεροδυναμικές λεπίδες B81 μήκους 81,4 μέτρων επιτρέπει στο SG 8.0-167 DD να παράγει έως και 20% περισσότερη ενέργεια ετησίως από τον προκάτοχό του (Πηγή: wind-turbine-sg-8-0-167-dd)-	38
-	-
Εικόνα 28: Αναλυτική παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών και προδιαγραφών, για την ανεμογεννήτρια Gamesa 8,0 MW. (Πηγή: wind-turbine-models-siemens-gamesa-sg-8.0-167-dd)	- 40 -
Εικόνα 29: Καμπύλη ισχύος για την ανεμογεννήτρια Gamesa G128-8.0MW Offshore. (Πηγή: the wind power turbine_en_1558_siemens-gamesa_sg-8.0-167-dd)	- 40 -
Εικόνα 30: Αναλυτική παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών και προδιαγραφών, για την ανεμογεννήτρια Vestas V164-8,0MW. (Πηγή: wind-turbine-models-Vestas V164-8,0MW)	- 42 -
Εικόνα 31: Καμπύλη ισχύος για την ανεμογεννήτρια Vestas V164-8,0MW. (Πηγή: thewindpower /turbine_ Vestas V164-8,0MW)	- 42 -
Εικόνα 32: Αναλυτική παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών και προδιαγραφών, για την ανεμογεννήτρια Vestas V164-8,0MW. (Πηγή: wind-turbine-models-Vestas V164-9.5MW)	- 43 -
Εικόνα 33: Καμπύλη ισχύος για την ανεμογεννήτρια Vestas V164-9,5MW. (Πηγή: thewindpower /turbine_ Vestas V164-9,5MW)	- 44 -
Εικόνα 34: Τυπική καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας με ρύθμιση βήματος (Πηγή: A Critical Review on Wind Turbine Power Curve Modelling Techniques and Their Applications in Wind Based Energy Systems- Vaishali Sohoni, S. C. Gupta, and R. K. Nema)	- 46 -

Εικόνα 35: Μοντέλα καμπύλης ισχύος ανεμογεννητριών (Πηγή: A Critical Review on Wind Turbine Power Curve Modelling Techniques and Their Applications in Wind Based Energy Systems- Vaishali Sohoni, S. C. Gupta, and R. K. Nema)	47 -
Εικόνα 36: Παρουσίαση των εξισώσεων των παραμετρικών μοντέλων (Πηγή: A Critical Review on Wind Turbine Power Curve Modelling Techniques and Their Applications in Wind Based Energy Systems- Vaishali Sohoni, S. C. Gupta, and R. K. Nema).....	50 -
Εικόνα 37: Σύγκριση των καμπυλών ισχύος που προέκυψαν από την παραμετρική μέθοδο Weibull για όλα τα μοντέλα ανεμογεννήτριας	51 -
Εικόνα 38: Απεικόνιση της ακριβούς θέσης χωροθέτησης, καθώς και του μεγέθους ενός Υπεράκτιου αιολικού πάρκου, στην περιοχή βόρεια της Λήμνου. (Πηγή: ΚΑΠΕ)....	53 -
Εικόνα 39: Παρουσίαση τυπικών τιμών της μέσης ετήσιας μεταβλητότητας της ταχύτητας του ανέμου (MAV), στη λεκάνη της Μεσογείου. (Πηγή: Satellite Based Offshore Wind Resource Assessment in the Mediterranean Sea.).....	58 -
Εικόνα 40: Παρουσίαση τυπικών τιμών της διαχρονικής μεταβλητότητας της ταχύτητας του ανέμου (IAV), στη λεκάνη της Μεσογείου. (Πηγή: Satellite Based Offshore Wind Resource Assessment in the Mediterranean Sea.).....	58 -
Εικόνα 41: Γραμμική απεικόνιση της μεταβολής των συντελεστών C_p , C_t , σε σχέση με τον παράγοντα επαγωγής a . (Πηγή: Wind Energy Handbook).....	61 -
Εικόνα 42: Levelized cost of energy (LCOE) ως συνάρτηση της ενδιάμεσης απόστασης των ανεμογεννητριών και της διαμέτρου του ρότορα που πρέπει να συμμορφώνονται με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρώπης για $E = 3500$ TWh/έτος. (Πηγή: Towards_the_North_Sea_wind_p	73 -
Εικόνα 43: Σχηματική απεικόνιση που δείχνει τις περιοχές ροής που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση μιας ανεμογεννήτριας και του εισερχόμενου τυρβώδους οριακού στρώματος. Απεικονίζονται τα πιο σημαντικά, στιγμιαία (επάνω) και χρονικά μέσα (κάτω) χαρακτηριστικά ροή	75 -

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Ταξινόμηση ανέμου σε κλάσεις ανάλογα με την πυκνότητα ανέμου στα 10m, 50m, 80m, 100m, 120m. (Πηγή: Wind resource assessment around Korean Peninsula for feasibility study on 100MW class offshore wind farm).....	3 -
Πίνακας 2: Κατηγορίες ανεμογεννητριών που καθορίζονται από το IEC (Πηγή: Assessment of Wind Characteristics and Wind Power Potential of Gharo, Pakistan)	3 -
Πίνακας 3: Μέση διαθέσιμη ισχύς στην περιοχή της Λήμνου ανά έτος.....	55 -
Πίνακας 4: Μηνιαίος μέσος όρος διαθέσιμης ισχύος στην περιοχή της Λήμνου	56 -
Πίνακας 5: Μέσος όρος ετήσιας διαθέσιμης ισχύος στην περιοχή της Λήμνου.....	57 -
Πίνακας 6: Παρουσίαση των δεικτών (MAV) και (IAV), ως κριτήρια αξιολόγησης της εκάστοτε περιοχής χωροθέτησης.....	59 -
Πίνακας 7: Παρουσίαση των χαρακτηριστικώς τιμών ισχύος ανά μέτρο ταχύτητας για κάθε μοντέλο ανεμογεννήτριας.....	59 -

Πίνακας 8: Παρουσίαση του συντελεστή ισχύος (power coefficient C_p), του συντελεστή ώσης (thrust coefficient CT) και του συντελεστή αξονικής επαγωγικής ροής για το μοντέλο Aerodyn SCD 8.0/168.....	- 62 -
Πίνακας 9: Παρουσίαση του συντελεστή ισχύος (power coefficient C_p), του συντελεστή ώσης (thrust coefficient CT) και του συντελεστή αξονικής επαγωγικής ροής για το μοντέλο Multibrid M5000.....	- 63 -
Πίνακας 10: Παρουσίαση του συντελεστή ισχύος (power coefficient C_p), του συντελεστή ώσης (thrust coefficient CT) και του συντελεστή αξονικής επαγωγικής ροής για το μοντέλο Gamesa G128-5.0MW.....	- 64 -
Πίνακας 11: Παρουσίαση του συντελεστή ισχύος (power coefficient C_p), του συντελεστή ώσης (thrust coefficient CT) και του συντελεστή αξονικής επαγωγικής ροής για το μοντέλο Gamesa G128-8.0MW.....	- 65 -
Πίνακας 12: Παρουσίαση του συντελεστή ισχύος (power coefficient C_p), του συντελεστή ώσης (thrust coefficient CT) και του συντελεστή αξονικής επαγωγικής ροής για το μοντέλο Haliade 150-6MW.....	- 66 -
Πίνακας 13: Παρουσίαση του συντελεστή ισχύος (power coefficient C_p), του συντελεστή ώσης (thrust coefficient CT) και του συντελεστή αξονικής επαγωγικής ροής για το μοντέλο Vestas V164-8.0.....	- 67 -
Πίνακας 14: Παρουσίαση του συντελεστή ισχύος (power coefficient C_p), του συντελεστή ώσης (thrust coefficient CT) και του συντελεστή αξονικής επαγωγικής ροής για το μοντέλο Vestas V164-9.5.....	- 68 -
Πίνακας 15: Παρουσίαση της μέσης ετήσιας ταχύτητας και της μέσης ετήσιας ισχύος για κάθε μοντέλο ανεμογεννήτριας.....	- 69 -
Πίνακας 16: Παρουσίαση ποσοστών λειτουργίας ανά έτος για κάθε μοντέλο ανεμογεννήτριας..	- 70 -
Πίνακας 17: Παρουσίαση του μέσου όρου ωρών λειτουργίας ανά έτος, της πιθανότητας, της ισχύος, αλλά και της παραγόμενης ενέργειας για την ανεμογεννήτρια Aerodyn SCD 8.0/168.....	- 74 -
Πίνακας 18: Παρουσίαση των τιμών για τους διαφορετικούς δείκτες απωλειών, στον υπολογισμό του τελικού LCOE.....	- 76 -
Πίνακας 19: Παρουσίαση των τιμών για τα βάρη των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών, με βάση την παροχή ισχύος της καθεμίας.....	- 78 -
Πίνακας 20: Τιμές κοστολόγησης των επιμέρους τμημάτων μιας ανεμογεννήτριας.....	- 78 -
Πίνακας 21: Τιμές κοστολόγησης για την εγκατάσταση των διάφορων τμημάτων της ανεμογεννήτριας, καθώς και το κόστος σύνδεσής τους.....	- 79 -
Πίνακας 22: Παρουσίαση των τιμών για τα κόστη ορισμένων στοιχείων του EPC.....	- 80 -
Πίνακας 23: Κόστη λειτουργίας και συντήρησης του έργου.....	- 81 -
Πίνακας 24: Παρουσίαση του δείκτη μείωσης WACC (Weighted Average Cost of Capital).....	- 82 -
Πίνακας 25: Παρουσίαση των τελικών τιμών του κόστους LCOE - Levelized Cost of Energy....	- 84 -

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Σκοπός

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την εις βάθος μελέτη και αξιολόγηση μίας πιθανούς εγκατάστασης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου στα ανοιχτά της νήσου Λήμνου. Αν και για τον Ελλαδικό θαλάσσιο χώρο έχουν προταθεί αρκετές υποψήφιες περιοχές χωροθέτησης, η συγκεκριμένη περιοχή στα βόρειο ανατολικά του νησιού θεωρήθηκε η καταλληλότερη στην συγκεκριμένη εργασία. Η επιλογή αυτή πραγματοποιήθηκε λόγω ενός πλήθους παραγόντων όπως το υψηλό αιολικό δυναμικό της περιοχής, το βάθος και το είδος του πυθμένα, η απόσταση από τη στεριά, η δυνατότητα εύκολης σύνδεσης με το δίκτυο τροφοδοσίας και η έλλειψη συνθηκών που θα καθιστούσαν την εγκατάσταση στην περιοχή απαγορευτική.

Μέσω ανεμολογικών δεδομένων της περιοχής για τα τελευταία 20 χρόνια, τα οποία λήφθηκαν από το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων ερευνών (ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε.) καθίσταται δυνατή η λεπτομερής αξιολόγηση της περιοχής. Αρχικά, υπολογίσθηκαν το μηνιαίο, εποχιακό και ετήσιο αιολικό δυναμικό της περιοχής αλλά και οι δείκτες MAV (Mean) και IAV. Στη συνέχεια, στους υπολογισμούς εισήχθησαν διάφορα μοντέλα ανεμογεννητριών, προκειμένου να επιλεγεί το πιο αποδοτικό. Τα μοντέλα που επιλέχθηκαν είναι τα εξής: Aerodyn scd 8.0MW/168, η Multibrid M5000, η Haliade 150-6MW, η Gamesa G128-5.0MW, η Gamesa G128-8.0MW, η Vestas V164 8 MW και η Vestas V164 9.5 MW. Τέλος, υπολογίσθηκαν το ετήσιο και υπερετήσιο ποσοστό λειτουργίας κάθε μοντέλου στην συγκεκριμένη περιοχή.

Δεδομένου ότι τα διάφορα μοντέλα ανεμογεννήτριας έχουν διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά, προκειμένου να γίνει εφικτή η σύγκρισή τους χρειάστηκε να υπολογισθεί για κάθε ένα από αυτά το Διαβαθμισμένο Κόστος Ενέργειας- Levelized Cost of Energy (LCOE). Έτσι, μπόρεσε να μελετηθεί πιο μοντέλο θα αποτελούσε την καλλήτερη επιλογή για τη συγκεκριμένη περιοχή.

1.2 Δομή

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από επτά Κεφάλαια. Το πρώτο είναι το παρών εισαγωγικό Κεφάλαιο. Στο δεύτερο και τρίτο Κεφάλαιο αναλύονται οι βασικές έννοιες του ανέμου και της αιολικής ενέργειας οι οποίες κρίθηκαν απαραίτητες για την κατανόηση της σημασίας ανάπτυξης ενός αιολικού πάρκου αλλά και του τρόπου λειτουργίας του. Στο τέταρτο Κεφάλαιο παρουσιάζονται όλα τα υποψήφια μοντέλα ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και παρατίθενται τεχνικές τους λεπτομέρειες που παρέχονται από τους κατασκευαστές. Στο πέμπτο Κεφάλαιο αναλύονται οι καμπύλες ισχύος και η σημασία τους, αναφέρονται τα διάφορα μοντέλα για την αριθμητική τους μοντελοποίηση και τέλος μέσω των παραμετρικών μοντέλων κατασκευάζονται οι καμπύλες ισχύος με τη χρήση του προγράμματος MATLAB. Στο έκτο Κεφάλαιο αναλύεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού της περιοχής, την παραγόμενη ισχύ των ανεμογεννητριών και τα ετήσια ποσοστά λειτουργίας τους. Στο έβδομο Κεφάλαιο γίνεται ο υπολογισμός του δείκτη LCOE προκειμένου να γίνει δυνατή οι σύγκριση των μοντέλων ανεμογεννήτριας και να επιλεγεί το πλέον κερδοφόρο. Το όγδοο Κεφάλαιο περιλαμβάνει τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την μελέτη.

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

2.1 Άνεμος

Σχεδόν κάθε άνεμος στη Γη οφείλει την ύπαρξή του στον Ήλιο. Καθώς ο Ήλιος θερμαίνει άμεσα την επιφάνεια της Γης, ο αέρας ανεβαίνει και βυθίζεται, με αποτέλεσμα υψηλές και χαμηλές περιοχές ατμοσφαιρικής πίεσης. Καθώς ο αέρας ανεβαίνει, η πίεση μειώνεται και ο περιβάλλοντα αέρας μετακινείται για να τον αντικαταστήσει, προκαλώντας άνεμο. Όσο περισσότερο αλλάζει η πίεση σε μια δεδομένη απόσταση, συνήθως τόσο πιο γρήγορος θα είναι ο άνεμος. Αυτό ονομάζεται δύναμη κλίσης πίεσης. Εάν υπάρχει μεγάλη διαφορά πίεσης μεταξύ δύο σημείων που είναι μακριά, οι ταχύτητες του ανέμου θα είναι χαμηλότερες από ό,τι εάν αυτές οι τοποθεσίες είναι πιο κοντά μεταξύ τους.

Οι περισσότεροι άνεμοι κινούνται οριζόντια, δηλαδή κατά μήκος του εδάφους. Δεν υπάρχει συνήθως τόσο πολύς άνεμος που κινείται προς τα πάνω και προς τα κάτω, εκτός από τα καθοδικά ρεύματα σε καταιγίδες. Όλα αυτά οφείλονται στη βαρύτητα, η οποία είναι η κινητήρια δύναμη στον έλεγχο της κατακόρυφης κίνησης του αέρα. Μια πιο σημαντική δύναμη που επηρεάζει τα μοτίβα του ανέμου, ωστόσο, είναι η δύναμη Coriolis. Λόγω της περιστροφής της Γης, τα αντικείμενα, συμπεριλαμβανομένων των αεροπλάνων, των πτηνών και των πυραύλων, εκτρέπονται από μια ευθεία γραμμή. Ο άνεμος δεν αποτελεί εξαίρεση και εκτρέπεται προς τα δεξιά στο βόρειο ημισφαίριο και προς τα αριστερά στο νότιο ημισφαίριο. Το μέγεθος της εκτροπής είναι το μικρότερο γύρω από τον ισημερινό και το μεγαλύτερο γύρω από τους πόλους.

Άλλες δυνάμεις επηρεάζουν επίσης τη συμπεριφορά των ανέμων. Μια ευρέως γνωστή, η τριβή, επηρεάζει έντονα τους ανέμους κοντά στο έδαφος. Η τριβή δρα πάντα σε αντίθεση με την ταχύτητα του ανέμου και τη ροή του αέρα γενικότερα. Αυτό μειώνει επίσης τις επιπτώσεις της δύναμης Coriolis και η ατμόσφαιρα προσαρμόζεται σε αυτό στρέφοντας τον άνεμο προς τη χαμηλή πίεση. Η δύναμη Coriolis και η τριβή σε συνδυασμό και εξισορροπημένες με την οριζόντια δύναμη βαθμιδωτής πίεσης, προκαλούν μια ισορροπία στην ατμόσφαιρα που εξηγεί τη σπειροειδή κίνηση, αντί για μια ευθεία κίνηση προς τα μέσα ή προς τα έξω, γύρω από συστήματα χαμηλής και υψηλής πίεσης.

2.2 Ταξινόμηση Αιολικής Ενέργειας και Κατηγορίες Στροβίλων IEC

Για να απλοποιηθεί η πυκνότητα της αιολικής ενέργειας, ο αιολικός πόρος χωρίζεται σε επτά κατηγορίες ανέμου. Η κάθε κατηγορία ανέμου βασίζεται στην ενέργεια που παράγεται από μια συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου. Ο Πίνακας 1 δείχνει την ταξινόμηση της παραγωγής αιολικής ενέργειας από διάφορα Εθνικά Εργαστήρια Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Οι κλάσεις ανέμου άνω του 4 θεωρούνται γενικά ως επαρκείς για την εγκατάσταση των σταθμών αιολικής ενέργειας. Αντίθετα, οι κλάσεις ανέμου 1 και 2 γενικά δεν θεωρούνται επαρκείς για την παραγωγή αιολικής ενέργειας. Οι κατηγορίες αιολικής ενέργειας παρέχουν επίσης το απαραίτητο γνωστικό πλαίσιο σχετικά με την οικονομική βιωσιμότητα των ανεμογεννητριών. Ο Πίνακας 2 παρέχει το σημαντικό κατασκευαστικό πλαίσιο για τις ανεμογεννήτριες όπως προτείνεται από τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC-61400).

Πίνακας 1: Ταξινόμηση ανέμου σε κλάσεις ανάλογα με την πυκνότητα ανέμου στα 10m, 50m, 80m, 100m, 120m. (Πηγή: Wind resource assessment around Korean Peninsula for feasibility study on 100MW class offshore wind farm)

Wind classification.

Wind class	10 m		50 m		80 m		100 m		120 m	
	Density (W/m ²)	Speed (m/s)	Density (W/m ²)	Speed (m/s)	Density (W/m ²)	Speed (m/s)	Density (W/m ²)	Speed (m/s)	Density (W/m ²)	Speed (m/s)
1	<100	<4.4	<200	<5.6	<240	<5.9	<260	<6.1	<290	<6.3
2	100/150	4.4/5.1	200/300	5.6/6.4	240/380	5.9/6.9	260/420	6.1/7.1	290/450	6.3/7.3
3	150/200	5.1/5.6	300/400	6.4/7.0	380/490	6.9/7.5	420/560	7.1/7.8	450/600	7.3/8.0
4	200/250	5.6/6.0	400/500	7.0/7.5	490/620	7.5/8.1	560/670	7.8/8.3	600/740	8.0/8.6
5	250/300	6.0/6.4	500/600	7.5/8.0	620/740	8.1/8.6	670/820	8.3/8.9	740/880	8.6/9.1
6	300/400	6.4/7.0	600/800	8.0/8.8	740/970	8.6/9.4	820/1060	8.9/9.7	880/1160	9.1/10.0
7	>400	>7.0	>800	>8.8	>970	>9.4	>1060	>9.7	>1160	>10.0

Πίνακας 2: Κατηγορίες ανεμογεννητριών που καθορίζονται από το IEC (Πηγή: Assessment of Wind Characteristics and Wind Power Potential of Gharo, Pakistan)

Wind turbine class	I	II	III	S
V_{ref} (m/s)	50	42.5	37.5	
$A I_{ref}$	—	0.16	—	Values specified by designer
$B I_{ref}$	—	0.14	—	
$C I_{ref}$	—	0.12	—	

2.3 Φαινόμενο Τύρβης

Οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις είναι το σύνολο των φαινομενικά τυχαίων και συνεχώς μεταβαλλόμενων κινήσεων του αέρα που υπερτίθενται στη μέση κίνηση του ανέμου. Οι ατμοσφαιρικές αναταράξεις επηρεάζουν την αιολική ενέργεια με διάφορους τρόπους, ειδικά μέσω των επιδράσεων απόδοσης ισχύος, των επιπτώσεων στα φορτία του στροβίλου, των επιδράσεων κόπωσης και αφύπνισης και της διάδοσης θορύβου.

Οι μεμονωμένες τυρβώδεις κινήσεις είναι ουσιαστικά απρόβλεπτες, αλλά ορισμένες ιδιότητες της τύρβης μπορούν να αναλυθούν επικερδώς με στατιστική έννοια. Κατά συνέπεια, οι κατάλληλοι χαρακτηρισμοί των αναταράξεων μπορούν να βοηθήσουν στην πρόβλεψη της παραγωγής ισχύος των ανεμογεννητριών. Τα στατιστικά στοιχεία αναταράξεων μπορούν επίσης να εξαχθούν από προσομοιώσεις όπως λεπτής κλίμακας, αριθμητικά μοντέλα πρόβλεψης καιρού ή μεγάλες προσομοιώσεις στροβιλισμού.

Στη βιομηχανία αιολικής ενέργειας, οι αναταράξεις ποσοτικοποιούνται με μια μέτρηση που ονομάζεται ένταση αναταράξεων - η τυπική απόκλιση της οριζόντιας ταχύτητας ανέμου διαιρεμένη με τη μέση ταχύτητα ανέμου για κάποια χρονική περίοδο, συνήθως 10 λεπτά. Εάν ο άνεμος αυξομειώνεται απότομα, τότε η ένταση των αναταράξεων θα είναι υψηλή. Αντίθετα, οι σταθεροί άνεμοι έχουν μικρότερη ένταση αναταράξεων. Οι τυπικές τιμές της οριζόντιας έντασης αναταράξεων, που μετρούνται με ανεμόμετρο κυπέλλου, κυμαίνονται από 3% έως 20%.

Μπορεί να είναι δύσκολο να συγκριθούν οι εντάσεις των αναταράξεων σε διαφορετικές τοποθεσίες ή από ένα όργανο σε ένα άλλο. Μια πρόκληση είναι ότι ορισμένοι τύποι ανεμόμετρων μετρούν μια οριζόντια ταχύτητα ανέμου, ενώ άλλοι μετρούν τις δύο οριζόντιες συνιστώσες της ροής. Όταν μετρούνται δύο συνιστώσες των διακυμάνσεων της οριζόντιας ροής, δεν μπορούν απλώς να προστεθούν μαζί για να εκτιμηθεί η συνολική οριζόντια διακύμανση. Επιπλέον, εστιάζοντας μόνο στην οριζόντια τυπική απόκλιση, η κατακόρυφη συμβολή των αναταράξεων αγνοείται. Η κατακόρυφη συνιστώσα μπορεί να είναι πολύ ισχυρή, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της ημέρας, και πιθανότατα επηρεάζει την παραγωγικότητα της ανεμογεννήτριας.

Για αυτούς τους λόγους, η κινητική ενέργεια στροβιλισμού είναι συχνά μια πιο χρήσιμη μέτρηση. Ακριβώς όπως η κινητική ενέργεια είναι το μισό του γινόμενου της μάζας και της ταχύτητας στο τετράγωνο, βασίζεται στα τετράγωνα των διακυμάνσεων των ταχυτήτων. Οι τυπικές αποκλίσεις και των τριών συνιστωσών της ροής τετραγωνίζονται, αθροίζονται και διαιρούνται με δύο. Οι τυπικές τιμές κυμαίνονται από 0,05 m²/s² τη νύχτα έως 4 m²/s² ή μεγαλύτερες κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επομένως, τόσο η οριζόντια όσο και η κατακόρυφη συνιστώσα της ροής αντιπροσωπεύονται στην κινητική ενέργεια στροβιλισμού.

2.4 Εκτίμηση διάτμησης ανέμου

Λαμβάνοντας υπόψη την ατμόσφαιρα, το τυρβώδες μείγμα μπορεί να ληφθεί με παρόμοιο τρόπο με τη μοριακή ανάμιξη. Επίσης, αυτό είναι γνωστό ως Κ θεωρία. Ας υποθέσουμε ότι η τυρβώδης ανάμιξη που αποτελείται από δυνάμεις διάτμησης μπορεί να προκύψει από τη σχέση της ταχύτητας του ανέμου που δίνεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$u = \frac{U}{k} * \ln\left(\frac{Z - D}{Z_0}\right)$$

όπου U είναι η τριβή, k είναι η σταθερά von Karman, Z₀ είναι το μήκος τραχύτητας και D είναι το ύψος μετατόπισης.

Η ταχύτητα του ανέμου υπολογίζεται για ένα ύψος αναφοράς που εκφράζεται στην ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{U}{U_R} = \left(\frac{\ln(Z/Z_0)}{\ln(Z_R/Z_0)}\right)$$

όπου το U_R αναφέρεται στην ταχύτητα ανέμου στο ύψος αναφοράς Z_R.

2.5 Νόμος ισχύος

Γενικά, ο νόμος ισχύος αναφέρεται στην αύξηση της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος λόγω της ευκολότερης αξιολόγησης. Μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\frac{U}{U_R} = \left(\frac{Z - D}{Z_R}\right)^a$$

όπου a είναι ο εκθέτης του νόμου ισχύος.

Ο εκθέτης του νόμου ισχύος μπορεί να είναι μεταξύ 0,1 και 0,32 ανάλογα με το τοπίο της τοποθεσίας. Ο εκθέτης μπορεί να υπολογιστεί από το μήκος τραχύτητας.

$$a = \frac{\ln(\ln(Z/Z_0)/(Z_R/Z_0))}{\ln(Z/Z_R)} \approx \frac{1}{\ln \sqrt{(Z * Z_R)/Z_0}}$$

2.6 Συνάρτηση Κατανομής Πιθανοτήτων Weibull

Η συνάρτηση κατανομής Weibull χρησιμοποιείται για την επίτευξη της αποτελεσματικότητας του αιολικού δυναμικού. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $f(V)$ και η αθροιστική συνάρτηση κατανομής δίνονται ως εξής:

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k \right]$$

$$F(V) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k \right]$$

2.7 Συνάρτηση κατανομής Rayleigh

Η κατανομή Rayleigh είναι μια διαφορετική πρακτική της συνάρτησης διανομής Weibull. Σε μια τέτοια περίπτωση, η τιμή της παραμέτρου k θεωρείται 2. Οι συναρτήσεις πιθανότητας και αθροιστικής κατανομής δίνονται ως εξής:

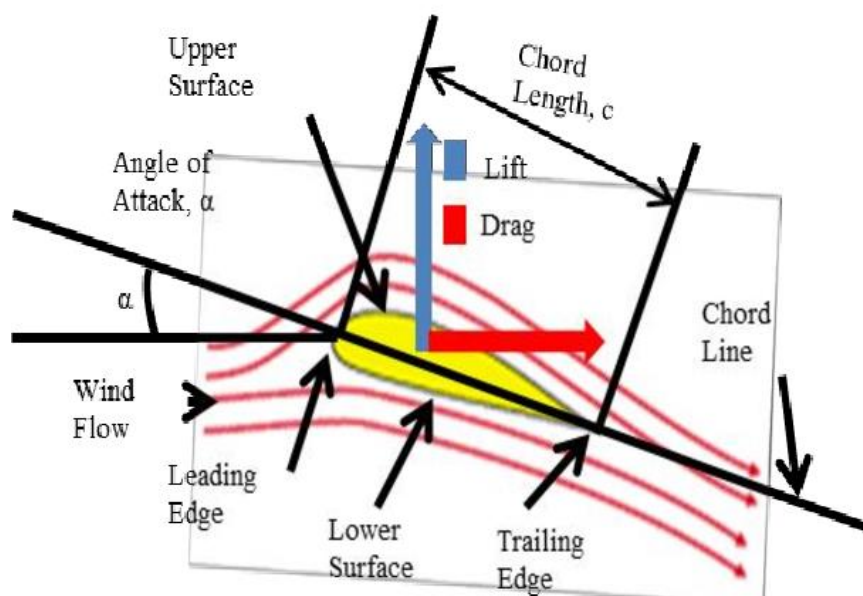
$$f(V) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{V}{V_{avg}}\right) \exp - \left[\left(\frac{\pi}{4}\right) \left(\frac{v}{V_{avg}}\right)^2 \right],$$

$$F(V) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{\pi}{4}\right) \left(\frac{v}{V_{avg}}\right)^2 \right]$$

2.8 Αεροδυναμική Ανεμογεννήτριας

Η αεροδυναμική είναι ένα από τα κύρια θέματα στην έρευνα ανεμογεννητριών. Στην αεροδυναμική, ο σχεδιασμός ενός μηχανισμού ελέγχου ροής θέτει τα θεμέλια για μια αποτελεσματική απόδοση ισχύος. Παραγωγή ανύψωσης στο τμήμα αεροτομής που οδηγεί σε περιστροφική κίνηση της λεπίδας και μεταφορά της παραγωγής μηχανικής σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του συγκροτήματος κιβωτίου ταχυτήτων. Ο πρωταρχικός στόχος ενός μηχανισμού ελέγχου ροής σε πτερύγια ανεμογεννητριών είναι να καθυστερήσει το σταμάτημα και να αυξήσει την ανύψωση, με αποτέλεσμα την αποδοτική παραγωγή ενέργειας. Ο έλεγχος ροής ταξινομείται σε ενεργητικούς και παθητικούς μηχανισμούς ελέγχου ροής. Ο ενεργός έλεγχος ροής λειτουργεί σε έναν μηχανισμό ενεργοποίησης που τίθεται σε λειτουργία όταν απαιτείται σε διάφορες συνθήκες λειτουργίας. Οι συσκευές παθητικού ελέγχου ροής σχεδιάζονται, αναπτύσσονται και στερεώνονται στην επιφάνεια για να εξάγουν την απαιτούμενη έξοδο μέσω αποτελεσματικού ελέγχου ροής. Οι γεννήτριες Vortex είναι οι απλούστερες, πιο οικονομικές και αποδοτικές συσκευές παθητικού ελέγχου ροής. Αυτές οι συσκευές επηρεάζουν την ισχύ των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας με διάφορους τρόπους, όπως η τοποθέτηση της γεννήτριας κατά μήκος της χορδής, η απόσταση μεταξύ των ζευγών μιας γεννήτριας, η γωνία κλίσης μιας γεννήτριας με την επιφάνεια του πτερυγίου, το ύψος της γεννήτριας. Η συσκευή ελέγχου ροής πρέπει να βελτιστοποιηθεί με τις προαναφερθείσες παραμέτρους για αποτελεσματική καθυστέρηση ακινητοποίησης και παραγωγή ενέργειας.

Οι δυνάμεις και οι ροπές στο σώμα οφείλονται στην κατανομή της πίεσης και της διατμητικής τάσης (Εικόνα 1). Η πίεση δρα κάθετα στην επιφάνεια, η οποία λειτουργεί ως φορτίο στην ανεμογεννήτρια και η διατμητική τάση είναι η εφαπτόμενη δύναμη τριβής στην επιφάνεια. Η διαφορά πίεσης μεταξύ του πυθμένα του πτερυγίου και του πάνω μέρους του πτερυγίου δημιουργεί τη δύναμη ανύψωσης (κάθετη στην ταχύτητα ελεύθερης ροής) το πτερύγιο της ανεμογεννήτριας παράγει την ισχύ περιστρέφοντας τη γεννήτρια.



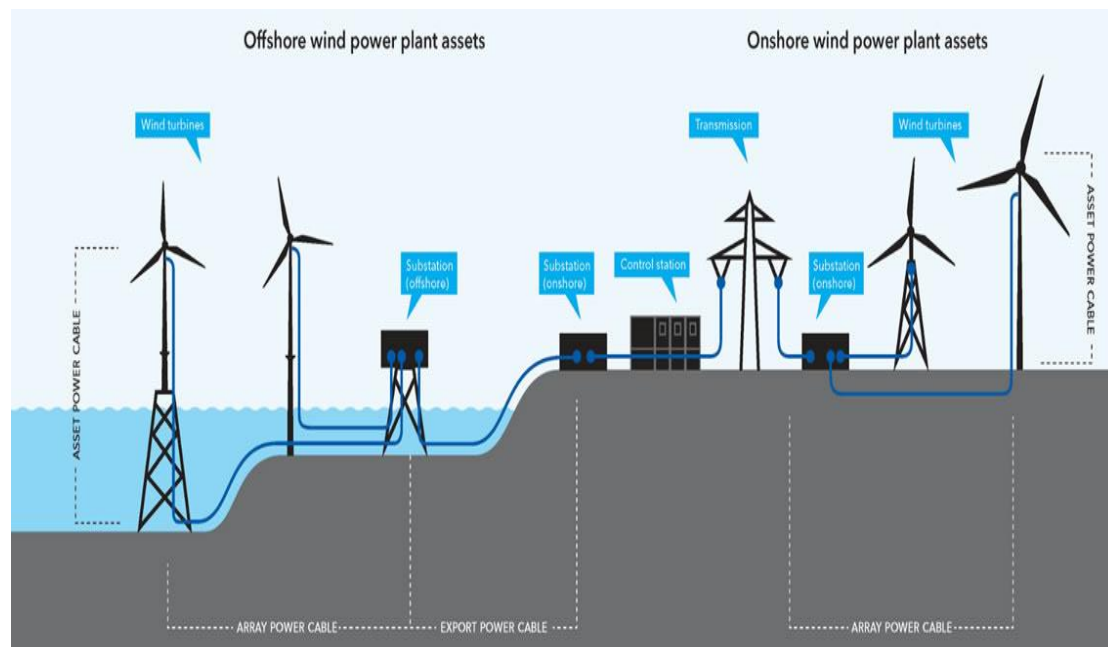
Εικόνα 1: Απεικόνιση των αεροδυναμικών δυνάμεων που ασκούνται στην αεροτομή (Πηγή: External lightning protection system for wind turbine blades - aerodynamics)

Το 1904, ο Ludwig Prandtl ανέπτυξε το οριακό στρώμα της θεωρίας, το πεδίο ροής γύρω από το σώμα είχε δύο περιοχές όπου η ροή είναι τριβής και μη τριβής. Το οριακό στρώμα είναι η περιοχή όπου λαμβάνεται υπόψη η τριβή της ροής λόγω των ιξωδών χαρακτηριστικών. Το πάχος του οριακού στρώματος είναι μια απόσταση μεταξύ της επιφάνειας και της ταχύτητας ροής ελεύθερης ροής, η ταχύτητα στην επιφάνεια είναι μηδέν ($V = 0$) λόγω διατμητικής τάσης με την επιφάνεια και τον αέρα. Η ταχύτητα θα αυξηθεί με την αύξηση του πάχους στο οριακό στρώμα και θα φτάσει την ταχύτητα ελεύθερης ροής στο σημείο και έξω από το οριακό στρώμα. Η ροή θεωρείται καθεστώς ροής χωρίς τριβή. Το στρωτό οριακό στρώμα είναι λιγότερο παχύ από το τυρβώδες οριακό στρώμα και το τυρβώδες οριακό στρώμα θα έχει υψηλή κινητική ενέργεια και ρυθμό ανάμειξης.

3. ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Ο άνεμος είναι μια από τις ελάχιστες άφθονες πηγές ενέργειας του πλανήτη μας και είναι επίσης διαθέσιμος δωρεάν. Με τη χρήση των ανεμογεννητριών αρκεί πλέον απλά η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε κινητική και τέλος σε ηλεκτρική. Ως αποτέλεσμα, η αιολική ενέργεια προσφέρει μια ελκυστική απάντηση στη μεγάλη πρόκληση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε σύγκριση με παραδοσιακές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιούν καύσιμα, η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας έχει χαμηλό περιβαλλοντικό αντίκτυπο αλλά είναι και προσοδοφόρα για την οικονομία μιας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας. Θεωρείται η πλέον οικονομική μορφή ενέργειας συγκρινόμενη με τους σταθμούς που λειτουργούν με κάρβουνο ή πυρηνικά ενώ η τεχνολογική πρόοδος των αιολικών πάρκων οδηγεί την αιολική ενέργεια σε άμεσο ανταγωνιστικό κόστος.



Εικόνα 2: Αναπαράσταση τμημάτων αιολικού πάρκου (Πηγή: <https://www.dnv.de/news/dnv-gl-launches-world-s-most-comprehensive-service-specification-for-wind-power-plants-58040>)

3.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Αιολικής Ενέργειας

Πλεονεκτήματα:

1. Η αιολική ενέργεια είναι μια «καθαρή» πηγή ενέργειας. Σε αντίθεση με τον άνθρακα ή το πετρέλαιο, η αιολική ενέργεια δεν καταστρέφει τον αέρα ούτε απαιτεί τη χρήση επιβλαβών χημικών ουσιών. Ως αποτέλεσμα, η αιολική ενέργεια μειώνει την εξάρτησή μας από ορυκτά καύσιμα που εισάγονται από άλλες χώρες, ενισχύοντας την εθνική μας οικονομία και παρέχοντας μια σειρά από άλλα οφέλη.
2. Ο άνεμος είναι απεριόριστος. Ο άνεμος, ως ανανεώσιμος πόρος, δεν μπορεί ποτέ να εξαντληθεί όπως άλλοι μη ανανεώσιμοι πόροι. Οι άνεμοι προκαλούνται από την

περιστροφή της γης, τη θέρμανση της ατμόσφαιρας από τον ήλιο και τις ανωμαλίες στην επιφάνεια της γης. Όσο ο ήλιος λάμπει και υπάρχει άνεμος, μπορούμε να αξιοποιήσουμε την αιολική ενέργεια και να τη χρησιμοποιήσουμε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

3. Δεν υπάρχει ανάγκη για καύσιμα γιατί οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν μόνο με την ισχύ που παρέχεται από τον άνεμο. Για να συνεχίσει να λειτουργεί, η τουρμπίνα δεν χρειάζεται να τροφοδοτηθεί με καύσιμο ή να συνδεθεί στην τροφοδοσία αφού ολοκληρωθεί και τοποθετηθεί. Σε σύγκριση με άλλα είδη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, που μπορεί να απαιτούν κάποια ενεργειακή δαπάνη, αυτό μειώνει το συνολικό κόστος συντήρησης αιολικών πάρκων μεγάλης κλίμακας. Η αιολική ενέργεια έχει τεράστιες δυνατότητες. Αρκετές ανεξάρτητες ερευνητικές ομάδες κατέληξαν στο ίδιο συμπέρασμα: η αιολική ενέργεια έχει παγκόσμιο δυναμικό άνω των 400 TW (terawatt). Η αιολική ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί σχεδόν οπουδήποτε.
4. Η εγχώρια αγορά ενδιαφέρεται ιδιαίτερα για την αιολική ενέργεια. Οι άνθρωποι μπορούν να δημιουργήσουν τη δική τους ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιώντας την αιολική ενέργεια με παρόμοιο τρόπο που μπορούν με τα μεγαλύτερα ηλιακά πάνελ (φωτοβολταϊκά). Ο άνεμος είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροφοδοσία των σπιτιών. Επιπλέον, τα σπίτια που λειτουργούν με αιολική ενέργεια έχουν πρόσβαση σε ένα χαρακτηριστικό γνωστό ως net metering. Με λίγα λόγια, το net metering πιστώνει τους λογαριασμούς ηλεκτρικής ενέργειας για τυχόν πλεονάζουσα ενέργεια που παράγεται κατά τη διάρκεια ενός δεδομένου μήνα. Οι ιδιοκτήτες σπιτιού αποζημιώνονται πραγματικά για την παραγωγή πρόσθετης ενέργειας, η οποία μπορεί να τους προστατεύσει από διακοπές ρεύματος και απρόβλεπτους ρυθμούς ενέργειας.
5. Οι τουρμπίνες δεν εκπέμπουν σωματίδια, τα οποία συμβάλλουν στη ρύπανση με υδράργυρο σε λίμνες και ρέματα. Η αιολική ενέργεια βοηθά επίσης στην εξοικονόμηση νερού. Η πυρηνική ενέργεια χρησιμοποιεί περίπου 600 φορές περισσότερο νερό από τον άνεμο για να παράγει την ίδια ποσότητα ενέργειας, ενώ ο άνθρακας χρησιμοποιεί περίπου 500 φορές περισσότερο νερό από τον άνεμο.
6. Από τότε που οι ανεμογεννήτριες έγιναν εμπορικά βιώσιμες, η επιχείρηση αιολικής ενέργειας έχει εκραγεί. Ως αποτέλεσμα, η επιχείρηση έχει δημιουργήσει θέσεις εργασίας σε όλο τον κόσμο. Οι εργασίες κατασκευής, εγκατάστασης και συντήρησης ανεμογεννητριών, καθώς και θέσεις συμβούλων αιολικής ενέργειας είναι πλέον διαθέσιμες.
7. Τα προκαταρκτικά σχέδια ανεμογεννητριών έχουν εξελιχθεί σε απίστευτα αποδοτικές μηχανές συγκομιδής ενέργειας λόγω των πρόσφατων τεχνολογικών εξελίξεων. Οι τουρμπίνες διατίθενται σε διάφορα μεγέθη, επιτρέποντάς τους να χρησιμοποιούνται από διάφορες επιχειρήσεις και ιδιώτες για οικιακή χρήση σε μεγαλύτερες ή μικρότερες εκτάσεις. Καθώς η τεχνολογία προχωρά, το ίδιο κάνουν και οι δομικές δυνατότητες, με αποτέλεσμα σχέδια που παράγουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια, απαιτούν λιγότερη συντήρηση και λειτουργούν πιο αθόρυβα και με ασφάλεια.
8. Ως πόρος ανανεώσιμης ενέργειας είναι βιώσιμος, απεριόριστος και δωρεάν.

Μειονεκτήματα:

1. Οι μεταβολές στην ένταση του ανέμου, αφού το γεγονός ότι παρουσιάζει χαμηλή πυκνότητα ως μορφή ενέργειας, με αποτέλεσμα την χρήση μεγάλου αριθμού ανεμογεννητριών για την παραγωγή αξιόλογης ισχύος, ότι απαιτείται σχετικά υψηλό κόστος έρευνας κι εγκατάστασης, χρειάζεται αρκετός χρόνος για την έρευνα και την χαρτογράφηση

του αιολικού δυναμικού μεγάλων περιοχών, ώστε να εντοπιστούν τα κατάλληλα σημεία, οι έμμεσες επιπτώσεις που έχουν στο περιβάλλον, όπως αλλοίωση τοπίου, ηχορύπανση κλπ.

2. Η άγρια ζωή έχει βρεθεί ότι βλάπτεται από τις ανεμογεννήτριες. Ιπτάμενα πτηνά και νυχτερίδες των οποίων τα ενδιαιτήματα ή οι μεταναστευτικές οδοί έρχονται σε επαφή με τα πτερύγια που ενεργοποιούν τη δομή που μοιάζει με βεντάλια των ανεμογεννητριών όταν περιστρέφονται μπορεί να υποστούν βλάβη ή να σκοτωθούν. Οι θάνατοι πτηνών και νυχτερίδων σε εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων είναι ένα αμφιλεγόμενο ζήτημα που έχει ανησυχήσει τις ομάδες διατήρησης των ψαριών και των ζώων. Εκτός από την άγρια ζωή που πετάει στον αέρα, η ηχορύπανση από τις στροβιλιζόμενες λεπίδες μπορεί να έχει αντίκτυπο στην άγρια ζωή στο έδαφος. Ενώ οι ανεμογεννήτριες μπορεί να είναι επιβλαβείς για την άγρια ζωή, άλλες κατασκευές όπως οι ουρανοξύστες και τα τεράστια παράθυρα είναι εξίσου επικίνδυνα και συνεχίζουν να κατασκευάζονται παρά τη δημόσια οργή.
3. Επειδή οι ανεμογεννήτριες μπορεί να είναι μάλλον θορυβώδεις, βρίσκονται γενικά σε απομακρυσμένα μέρη με μικρό πληθυσμό. Ο θόρυβος δεν είναι ανησυχητικός, ανάλογα με το πού βρίσκεται το πάρκο, όπως στην ανοικτή θάλασσα. Τα νεότερα σχέδια έχει αποδειχθεί ότι μειώνουν τα παράπονα για το θόρυβο και έχουν πολύ πιο αθόρυβη παρουσία καθώς προχωρά η τεχνολογία.
4. Αυτές οι πανύψηλες κατασκευές μπορούν να φτάσουν εκατοντάδες μέτρα σε ύψος και απαιτούν σημαντικές προκαταβολικές δαπάνες. Η εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε αγροτικές περιοχές απαιτεί πρόσθετες επενδύσεις σε υπόγειες γραμμές για τη μεταφορά ενέργειας σε πιο κατοικημένες περιοχές, όπως πόλεις. Το αρχικό στάδιο εγκατάστασης και κατασκευής αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο μέρος της δαπάνης, αλλά μετά από αυτό, όσο υπάρχει άνεμος, η αιολική ενέργεια αποτελεί μια ατελείωτη πηγή ενέργειας.
5. Η αιολική ενέργεια υπόκειται σε αυτό που είναι γνωστό ως διάλειψη, η οποία είναι μια διαταραχή που προκαλείται από την ασυνέπεια του ανέμου. Επειδή ο άνεμος μπορεί να φυσά με διαφορετικές ταχύτητες, είναι δύσκολο να προβλεφθεί πόση ενέργεια μπορεί να συλλεχθεί σε οποιαδήποτε συγκεκριμένη στιγμή. Αυτό σημαίνει ότι οι προμηθευτές και οι πόλεις πρέπει να διαθέτουν ενεργειακό απόθεμα ή εναλλακτικές πηγές ενέργειας σε περίπτωση που οι άνεμοι σταματήσουν να πνέουν για μεγάλο χρονικό διάστημα.
6. Η ανταγωνιστικότητα κόστους της αιολικής ενέργειας είναι ένα θέμα που συζητείται έντονα. Τα οικονομικά κίνητρα γενικά χρησιμοποιούνται ουσιαστικά τόσο σε αιολικά πάρκα κλίμακας κοινής ωφέλειας όσο και σε μικροσκοπικές οικιακές ανεμογεννήτριες. Τα οικονομικά κίνητρα είναι κρίσιμα για να δοθεί στην αιολική ενέργεια μια δίκαιη ευκαιρία στον έντονο αγώνα ενάντια σε καθιερωμένες πηγές ενέργειας όπως τα ορυκτά καύσιμα και ο άνθρακας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι ανεμογεννήτριες είναι μια ιδανική λύση για έναν ιδιοκτήτη σπιτιού που επιθυμεί να γίνει παραγωγός ενέργειας, αλλά το να είναι παραγωγός καθαρής ενέργειας θα απαιτούσε ανεμογεννήτριες χωρητικότητας 10 κιλοβάτ και κόστους 40.000 έως 70.000 €. Αυτός ο τύπος επένδυσης συνήθως αποδίδει μετά από 10 έως 20 χρόνια, που είναι μεγάλος χρόνος.
7. Οι ανεμογεννήτριες πρέπει να εγκατασταθούν σε σημείο όπου μπορούν να παράγουν αρκετή ηλεκτρική ενέργεια για να είναι οικονομικά βιώσιμες. Τα αιολικά πάρκα ταιριάζουν περισσότερο σε παράκτιες περιοχές, κορυφές λόφων και απέραντες πεδιάδες - με άλλα λόγια, οπουδήποτε με ισχυρό, σταθερό άνεμο. Η πλειονότητα αυτών των κατάλληλων τοποθεσιών βρίσκονται εκτός πόλεων και κωμοπόλεων, σε περισσότερες αγροτικές περιοχές ή σε υπεράκτιες περιοχές. Για να συνδεθεί ένα αιολικό πάρκο με το ηλεκτρικό δίκτυο, πρέπει να δημιουργηθούν νέες υποδομές, όπως τα ηλεκτροφόρα καλώδια, λόγω της απόστασης.

3.2 Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα

Ο αέρας της ξηράς θερμαίνεται και ψύχεται πιο γρήγορα από τον αέρα πάνω από το νερό, επειδή η γη και το νερό απορροφούν τη θερμότητα του ήλιου με διαφορετικούς τρόπους. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, ο ξηρός αέρας διαστέλλεται, ανεβαίνει και αντικαθίσταται από τον ψυχρότερο θαλάσσιο αέρα. Κατά τη διάρκεια της νύχτας οι άνεμοι αντιστρέφουν την κατεύθυνση τους.

Η ενέργεια του ανέμου αυξάνεται όσο απομακρύνεται από την ακτή και όσο αυξάνεται το ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας. Λόγω των μεγαλύτερων ταχυτήτων του αλλά και της ανεμπόδιστης ροής του, ο υπεράκτιος άνεμος περικλείει γενικά περισσότερη ενέργεια από αυτόν στη ξηρά. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά τα πλεονεκτήματα εγκατάστασης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου:



Εικόνα 3: Το πρώτο ολλανδικό υπεράκτιο αιολικό πάρκο της εταιρείας Ørsted (Πηγή: Borssele 1 & 2)

3.2.1 Πλεονεκτήματα Υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων

1. Οι ταχύτητες των υπεράκτιων ανέμων είναι γενικά υψηλότερες από ό,τι στην ξηρά. Μικρές βελτιώσεις στην ταχύτητα του ανέμου έχουν ως αποτέλεσμα σημαντικά κέρδη στην παραγωγή ενέργειας. Επιπλέον, παρουσιάζονται εντονότερα τις απογευματινές ώρες όταν η ανάγκη του δικτύου για ενέργεια είναι μεγαλύτερη.
2. Οι ταχύτητες των υπεράκτιων ανέμων έχουν μικρότερη τύρβη και είναι γενικά πιο σταθερές από ό,τι στην ξηρά. Μια πιο συνεπής παροχή αιολικής ενέργειας παρέχει μια πιο αξιόπιστη πηγή ενέργειας.
3. Η τοπογραφία του εδάφους παρουσιάζει ανωμαλίες, γεγονός που προκαλεί διαταραχές στη ροή του ανέμου, με αποτέλεσμα απώλειες στην αιολική ενέργεια.

4. Δεν συναντώνται οι εδαφικοί περιορισμοί που υπάρχουν στη στεριά, όπου οι κατάλληλες τοποθεσίες είναι λιγότερες και οι διαδικασίες αδειοδότησης και απαλλοτρίωσης πιο χρονοβόρες.
5. Προβλήματα όπως η οπτική όχληση και ο θόρυβος ελαχιστοποιούνται σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις από την ακτή.

Τα τελευταία χρόνια γίνονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση πολλές προσπάθειες προκειμένου να γίνει εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας από τη θάλασσα, καθώς έτσι αυξάνονται οι περιοχές που πληρούν τα κριτήρια για να φιλοξενήσουν τα αιολικά πάρκα. Σε μία χώρα όπως η Ελλάδα που το μεγαλύτερο μέρος της ηπειρωτικής χώρας αποτελείται από βουνά, οι περιοχές για εγκατάσταση χερσαίων αιολικών πάρκων είναι περιορισμένες. Αντίθετα όμως, οι τεράστιες θαλάσσιες εκτάσεις που διαθέτει θεωρούνται ιδανικές για εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση προσκοπεί σε αύξηση της θαλάσσιας αιολικής ισχύος από 12 GW σήμερα σε 60 GW έως το 2030 και 300 GW έως το 2050. Η θαλάσσια αιολική ενέργεια αναμένεται να είναι η σημαντικότερη πηγή παραγωγής του ηλεκτρισμού που θα καταναλώνει η Ευρώπη περί το 2040. Η κατά 25 φορές αύξηση των θαλάσσιων αιολικών πάρκων στην Ευρώπη απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές. Η θαλάσσια αιολική ενέργεια είναι μια σημαντική ευκαιρία για την Ελλάδα και ειδικά για το Αιγαίο Πέλαγος. Εκτός από τα αναπτυξιακά, ενεργειακά και περιβαλλοντικά οφέλη, μπορεί να καταστήσει τη χώρα εξαγωγό καθαρής ενέργειας, να ενδυναμώσει τη γεωστρατηγική της θέση και να συμβάλει στην εμπέδωση της ασφάλειας και της ειρήνης στην ευρύτερη περιοχή.

Το γεγονός ότι οι θαλάσσιες εκτάσεις είναι πολύ μεγάλες και χωρίς εμπόδια περιβάλλον δίνει περισσότερες επιλογές ως προς την εύρεση κατάλληλης περιοχής για εγκατάσταση αιολικού πάρκου δεν σημαίνει ότι η επιλογή της περιοχής γίνεται αυθαίρετα. Για να επιλεγεί κάποια περιοχή πρέπει να πληρεί κάποια βασικά κριτήρια. Συνήθως τα κριτήρια αυτά είναι το βάθος (συνήθως έως 50 μέτρα), την απόσταση από την ακτή (συνήθως μέχρι 10 χιλ.), την οπτική όχληση από την ακτή, αν η περιοχή είναι προστατευόμενη, ικανοποιητική ταχύτητα ανέμου κ.ά.

Λόγω των αυξημένων δυνατοτήτων του θαλάσσιου Ελλαδικού χώρου έχουν διεξαχθεί μακροχρόνιες έρευνες και μελέτες σχετικά με τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες που επικρατούν σε αυτόν. Έχουν τοποθετηθεί σε όλο τον Ελλαδικό θαλάσσιο χώρο 1665 σημαντήρες, οι οποίοι σχηματίζουν τετράγωνα πλευράς 25km το καθένα. Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων αποτελεί μία σπουδαία πηγή πληροφορίας, καθώς πρόκειται για μακροχρόνια και μεθοδική καταγραφή, η οποία οδηγεί σε σχετικά ασφαλή συμπεράσματα.

3.3 Κριτήρια Χωροθέτησης

- ❖ Η αύξηση της ποσότητας της παραγόμενης ενέργειας είναι ο κύριος στόχος του εκάστοτε έργου. Έτσι, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη και να αξιολογηθούν οι συνθήκες καιρού και οι προβλέψεις ανέμου στην ευρύτερη περιοχή όπου θα τοποθετηθούν οι ανεμογεννήτριες. Για να προσδιοριστούν τα ιδανικά μέρη για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών, γίνεται η χρήση δεδομένων από ανεμολογικούς υπεράκτιους χάρτες, ιστούς καιρού, δορυφορικά αρχεία και τοπικά δεδομένα που έχουν ενημερωθεί κατάλληλα. Η ενέργεια που παράγεται από κάθε ανεμογεννήτρια μπορεί να υπολογιστεί προσομοιώνοντας τις συνθήκες ανέμου σε κάθε σημείο εγκατάστασης στη δεδομένη περιοχή.
- ❖ Πρέπει να λαμβάνονται υπόψη το βάθος αλλά και η φύση του πυθμένα, καθώς παίζουν μείζων ρόλο στην κατασκευή, στη λειτουργία και στο συνολικό κόστος εγκατάστασης του πάρκου.

- ❖ Το υπεράκτιο αιολικό πάρκο θα πρέπει ιδανικά να μην απέχει περισσότερο από 10χλμ. από την ακτή καθώς η απόσταση επηρεάζει το χρόνο και το κόστος κατασκευής αλλά και να βρίσκεται κοντά σε σταθμό εξυπηρέτησης όπου θα μεταφέρεται η ενέργεια. Επιπλέον, θα πρέπει να είναι εύκολα προσβάσιμο για εργασίες επισκευών και συντήρησης του έργου. Σε μεγάλα αιολικά πάρκα με μεγαλύτερη απόσταση από την ακτή προκύπτει η ανάγκη δημιουργίας πλωτής εγκατάστασης εργασιών.
- ❖ Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η έκταση που θα δημιουργηθεί το πάρκο, καθώς υπάρχει ελάχιστη αποδεκτή απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών.
- ❖ Στην περιοχή επιλογής θα πρέπει να ληφθούν υπόψη η χλωρίδα και η πανίδα, καθώς η κατασκευή θα επηρεάσει τις ισοροπίες του οικοσυστήματος.
- ❖ Αν και ο θόρυβος που προκαλούν οι σύγχρονοι τύποι ανεμογεννητριών έχει μειωθεί εξαιρετικά τα επίπεδα θορύβου θα πρέπει να μην υπερβαίνουν τα όρια που θα επηρεάσουν την θαλάσσια ζωή.
- ❖ Ένας δευτερεύον παράγοντας είναι ο οπτικός αντίκτυπος. Αν και στα υπεράκτια πάρκα δεν υπάρχουν τόσες αντιδράσεις όσο στα χερσαία πάρκα, κανείς μπορεί να υπολογίσει εύκολα τη ζώνη που θα επηρεαστεί οπτικά (ZVI) με τη μορφή χάρτη.

Υπόψη πρέπει να λαμβάνονται οι θεσμικοί περιορισμοί που προκύπτουν από την νομοθεσία κάθε κράτους.

Πιο αναλυτικά:

- Περιοχές με λιβάδια Ποσειδωνίας στον πυθμένα θεωρούνται απαγορευτικές για οποιαδήποτε υπεράκτια κατασκευή.
- Περιοχές αρχαιολογικού ενδιαφέροντος δεν μπορούν να διατεθούν προς εκμετάλλευση διότι είναι υπό την προστασία της αρχαιολογικής υπηρεσίας για έρευνα και μελέτη.
- Περιοχές που πραγματοποιούνται ασκήσεις του Πολεμικού Ναυτικού, και γενικά σημεία που υπάρχουν στρατιωτικές βάσεις θεωρούνται άκρως απόρρητα και δεν επιτρέπεται η πρόσβαση σε αυτά.
- Περιοχές που αποτελούν σημαντικούς δρόμους για την ναυτιλία και το εμπόριο.
- Περιοχές σημαντικές για την αναπαραγωγή ψαριών και για την αλιεία.
- Περιοχές προσέλευσης αποδημητικών πουλιών.
- Περιοχές βυθοκόρησης πετρελαίου ή φυσικού αερίου.

3.4 Δημιουργία Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου

Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την επιλογή μιας τοποθεσίας και την ανάπτυξη μιας επίσημης αίτησης συγκατάθεσης. Κατά την αξιολόγηση της τοποθεσίας παράμετροι όπως η ταχύτητα του ανέμου, το βάθος του νερού, οι συνθήκες βυθού κ.α. λαμβάνονται όλα υπόψη.

Η πρόταση θα πρέπει να περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες σχετικά με τις ανεμογεννήτριες καθώς και τις περιβαλλοντικές ανησυχίες. Άλλοι παράγοντες, όπως η εκτίμηση επιπτώσεων, λαμβάνονται επίσης υπόψη. Το δεύτερο στάδιο αφορά το σχεδιασμό και την κατασκευή των τουρμπίνων, αγκυροβολίων και τις καλωδίωσης. Το τρίτο στάδιο περιλαμβάνει την εγκατάσταση πολλών εξαρτημάτων, όπως τα καλώδια, τα θεμέλια, τον πύργο και τις λεπίδες. Έπειτα, απαιτούνται ενέργειες επιθεώρησης και συντήρησης κατά τη διάρκεια ζωής ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου για να διασφαλιστεί η αποτελεσματική λειτουργία του μετά τη θέση σε λειτουργία. Σε γενικές γραμμές, αυτό το στάδιο περιλαμβάνει ενέργειες όπως η μεταφορά από το λιμάνι στην τοποθεσία, η απομάκρυνση των εξαρτημάτων της ανεμογεννήτριας στην τοποθεσία και η συναρμολόγηση εξαρτημάτων.

Η ηλεκτρονική παρακολούθηση κατάστασης, η συλλογή δεδομένων SCADA και οι τακτικές επιθεωρήσεις και επισκευές εξαρτημάτων ανεμογεννητριών, όπως πτερύγια και κιβώτια ταχυτήτων, αποτελούν μέρος του τέταρτου σταδίου. Τέλος, όταν λήξει η διάρκεια ζωής ενός πάρκου, ο προγραμματιστής πρέπει να αποφασίσει εάν πρέπει να παροπλιστεί. Ενώ ο παροπλισμός αναφέρεται στην πλήρη απομάκρυνση ενός πάρκου, η ανατροφοδότηση αναφέρεται στην ενημέρωση των ανεμογεννητριών σε ένα υπάρχον πάρκο είτε με την αντικατάσταση παλαιότερων ανεμογεννητριών με νεότερες είτε με την αλλαγή των εξαρτημάτων των αρχικών ανεμογεννητριών με νεότερες, πιο αποτελεσματικές τεχνολογίες.

3.5 Ταξινόμηση Υπεράκτιων Ανεμογεννητριών

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά κριτήρια για την ταξινόμηση των ανεμογεννητριών. Εάν το κριτήριο είναι η κατεύθυνση του άξονα περιστροφής, τότε μια ανεμογεννήτρια μπορεί να είναι κάθετου ή οριζόντιου άξονα. Οι μεταδόσεις άμεσης μετάδοσης κίνησης και κιβωτίου ταχυτήτων είναι οι δύο κύριες ομάδες εάν το κριτήριο είναι ο μηχανισμός μετάδοσης ισχύος. Ο τύπος θεμελίωσης για μία ανεμογεννήτρια είναι επίσης καθοριστικός παράγοντας στη διαδικασία εγκατάστασης. Οι δύο κύριες ταξινομήσεις των ανεμογεννητριών είναι σταθερές στο κάτω μέρος και πλωτές.

Επί του παρόντος, αυτές με σταθερή βάση κυριαρχούν στην υπεράκτια αγορά αιολικής ενέργειας. Τρεις κοινές ποικιλίες απεικονίζονται στην Εικόνα 4. Το θεμέλιο μπορεί να είναι το απλούστερο από όλα, καθώς αποτελείται από έναν μόνο χαλύβδινο σωλήνα. Οι ανεμογεννήτριες με θεμέλια μπορεί με διάμετρο 3-8 m θεωρούνται οικονομικά αποδοτικές για βάθη νερού 20-40 m και η έρευνα και η ανάπτυξη μπορεί με μεγαλύτερης διαμέτρου και μήκους βρίσκειται σε εξέλιξη.

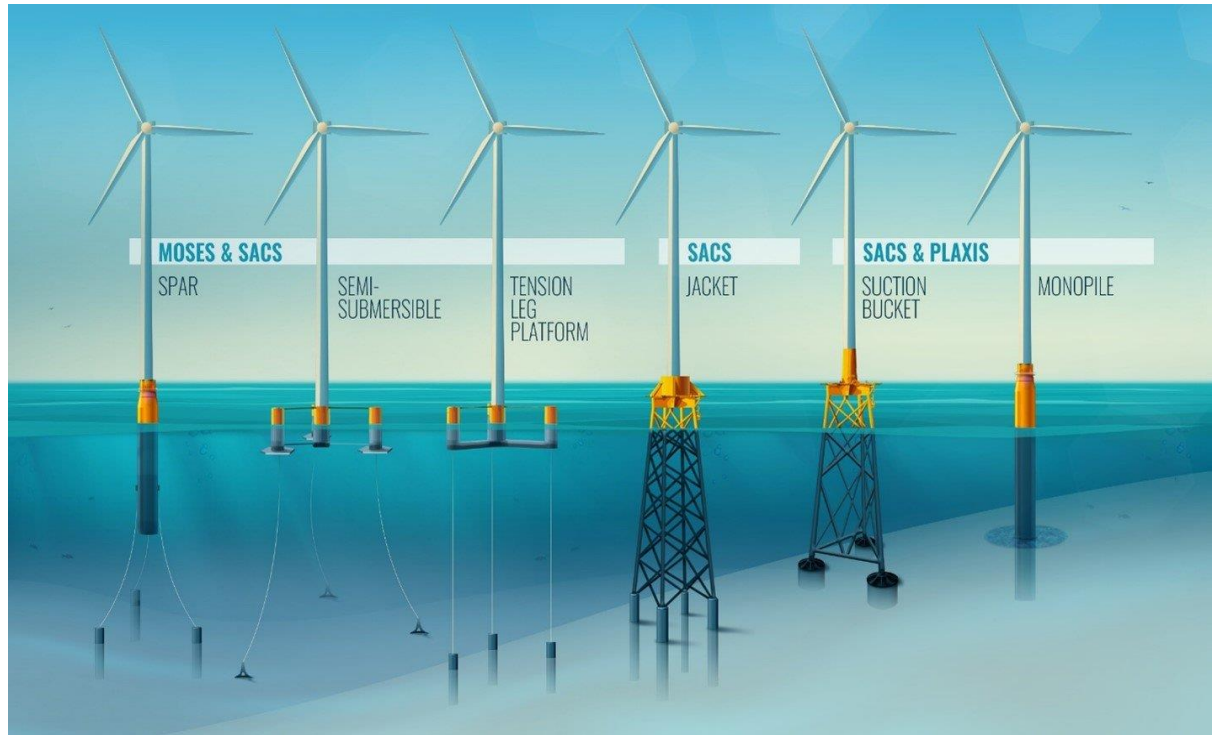
Αποδεδειγμένη τεχνολογία δανεισμένη από τη βιομηχανίες πετρελαίου και φυσικού αερίου αποτελούν τα Gravity Based Foundations (GBF-Θεμέλια με βάση τη βαρύτητα) τα οποία κατασκευάζονται κυρίως από σκυρόδεμα και χρησιμοποιώντας το βάρος τους αποτρέπουν την ανατροπή τους. Είναι κατάλληλα για συνθήκες αργίλου, αμμώδους εδάφους και βράχου και χρησιμοποιούνται σε βάθη <30 μέτρων.



Εικόνα 4: Gravity Based Foundation (Πηγή: Seatower AS)

Τα θεμέλια jacket είναι χαλύβδινα σωληνωτά στοιχεία συγκολλημένα μεταξύ τους για να σχηματίσουν μια δομή διαστημικού πλαισίου. Οι ανεμογεννήτριες που υποστηρίζονται από jackets είναι ανταγωνιστικά για ενδιάμεσα βάθη νερού (50–70 m), παρά τα ζητήματα αποθήκευσης και υλικοτεχνικής υποστήριξης.

Όπως οι πλωτές πλατφόρμες πετρελαίου και φυσικού αερίου, τα πλωτά θεμέλια ανεμογεννητριών βασίζονται στην πρόσδεση και στα συστήματα αγκύρωσης για την εκπλήρωση των σκοπών τους για τη διατήρηση του σταθμού σε βάθος νερό. Αν και η ιδέα των πλωτών θεμελίων μπορεί να εντοπιστεί στη δεκαετία του 1970 έντονα εμπορικά και ακαδημαϊκά ενδιαφέροντα δεν εμφανίστηκαν παρά μόνο το αρχές της δεκαετίας του 2000. Η Εικόνα 5 απεικονίζει τρεις τύπους πλωτών θεμελίων με συστήματα πρόσδεσης. Με βάση τους μηχανισμούς επαναφοράς για την επίτευξη υδροστατικής ισορροπίας, αυτά τα θεμέλια μπορούν είτε να θεωρηθούν ως έρμα-, άνωση- ή σταθεροποίηση πρόσδεσης κατά τη λειτουργία. Στην πραγματικότητα, τα περισσότερα βασίζονται σε συνδυασμό αυτών των μηχανισμών. Ορισμένα πλωτά θεμέλια, π.χ. spar και πλατφόρμα ποδιών τάσης (TLP), παρουσιάζουν αρκετά διαφορετικά χαρακτηριστικά αποκατάστασης κατά τη μεταφορά και την εγκατάσταση. Οι διαφορές μεταξύ τους οδηγούν σε προσαρμοσμένες μεθόδους εγκατάστασης για κάθε περίπτωση.



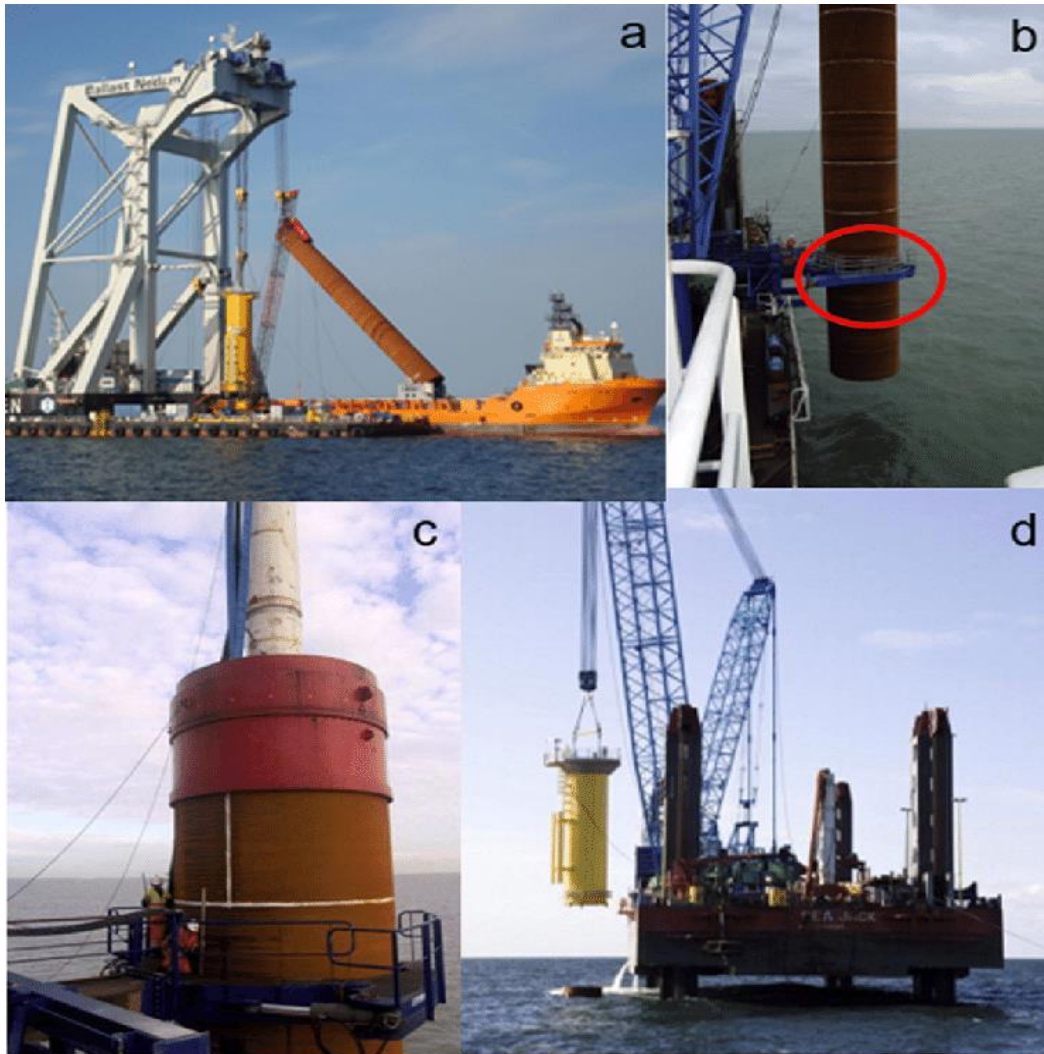
Εικόνα 5: Τύποι πλωτών θεμελίων (Πηγή: Seatower AS)

3.6 Εγκατάσταση Θεμελίων

3.6.1 Θεμέλια Monopile

Ένα monopile χρησιμοποιείται συνήθως σε σκληρές έως ημίσκληρες συνθήκες βυθού και για την μεταφορά του στην τοποθεσία είναι απαραίτητη η χρήση φορτηγίδας. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται είτε ένα σκάφος τύπου jackup είτε ένας γερανός τύπου Heavy lift. Καθώς ένα jackup χρειάζεται χρόνο για να σηκωθεί από το νερό, το Heavy lift σκάφος με δυναμική τοποθέτηση είναι μια πιο αποτελεσματική επιλογή. όπως φαίνεται στην Εικόνα 6, το μονόπυλο θα πρέπει να ανασηκωθεί από τη φορτηγίδα μεταφοράς με τη χρήση ενός πλαισίου. Λόγω της τριβής στα πλάγια το μονόπυλο πρέπει να στέκεται όρθια στον πυθμένα της θάλασσας, έτσι χρησιμοποιείται ένα μεγάλο υδραυλικό σφυρί προκειμένου να οδηγήσει το μονόπυλο στον πυθμένα της θάλασσας.

Πριν και κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πασσαλόπηξης, τα εργαλεία χειρισμού πασσάλων όπως οι συσκευές λαβής λαμβάνονται επίσης υπόψη για να συγκρατούν και να τοποθετούν το μονόπυλο κατακόρυφα. Στη συνέχεια, θα χρησιμοποιηθεί εξοπλισμός αρμολόγησης για την ένωση του μονόπυλου και του μεταβατικού τεμαχίου. Για πρωτοποριακά σύγχρονα θεμέλια χωρίς κομμάτια μετάβασης, το τελευταίο βήμα παραλείπεται.



Εικόνα 6: Εγκατάσταση Monopiles (Πηγή: Seatower AS)

Πρόκληση θεωρείται ο θόρυβος που προκαλείται από την έμπτυξη των πασσάλων, καθώς έχει αποδειχθεί πως προκαλεί προβλήματα στη θαλάσσια ζωή και ιδιαίτερα στα θαλάσσια θηλαστικά. Πιο συγκεκριμένα ο θόρυβος κατά την έμπτυξη είναι ευρυζωνικός και μπορεί να φτάσει ένα επίπεδο έκθεσης στον ήχο 210 υποβρυχία dB. Ένα τέτοιο υψηλό επίπεδο θορύβου προκαλεί αντιδράσεις από θαλάσσια θηλαστικά όπως οι φώκαινες και οι φώκιες. Για να μετριαστεί ο θόρυβος κατά την εγκατάσταση, έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι που στηρίζονται στη θωράκιση, απορρόφηση και διασπορά.

Καθώς, ένα μεγάλο μονότυλο μπορεί να ζυγίζει από ένα έως δύο χιλιάδες τόνους, ο χειρισμός τους στην ανοιχτή θάλασσα αποτελεί μια πρόκληση. Ένα σημαντικό ερώτημα που συχνά τίθεται είναι αν σε περίπτωση εγκατάστασης η εργασία θα πρέπει να συνεχίζεται εάν η προβλεπόμενη ταχύτητα ανέμου ή το σημαντικό ύψος κύματος αυξάνονται σημαντικά. Για να απαντηθεί μια τέτοια ερώτηση, η λήψη αποφάσεων στο πλοίο είναι κρίσιμη. Για τον καθορισμό της επιτρεπόμενης κατάστασης θάλασσας στην αρχική διαδικασία σφυρηλάτησης προσδιορίστηκαν δύο κρίσιμα γεγονότα που θα μπορούσαν να επιφέρουν προβλήματα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Αυτά είναι η αστοχία του υδραυλικού συστήματος ή η υπερβολική κλίση μονότυλου και έτσι προέκυψαν τα λειτουργικά όρια ως προς τις παραμέτρους της κατάστασης της θάλασσας με χρήση αριθμητικών προσομοιώσεων του συστήματος σκάφους-μονότυλο. Στην πραγματικότητα, οι αριθμητικά προερχόμενες επιτρεπόμενες θαλάσσιες καταστάσεις μπορούν να χρησιμεύσουν κυρίως ως αναφορές για πράξεις λόγω των διαφορών μεταξύ των φυσικών συστημάτων και των απλουστευμένων αριθμητικών μοντέλων. Η αληθινή

ψηφιακή τεχνολογία τωπ μπορεί να ταυτοποιήσει το εκάστοτε σύστημα και να ενημερώσει το μοντέλο με χρήση των υπεράκτιων δεδομένων. Αυτή η τεχνολογία υπόσχεται να διευκολύνει την μέτρηση της ακριβούς επιτρεπόμενης κατάστασης θάλασσας κατά τη διάρκεια θαλάσσιων επιχειρήσεων.

3.6.2 Θεμέλια Jacket

Ένα θεμέλιο jacket είναι μια ελαφριά δομή πλέγματος με τρία ή τέσσερα πόδια της οποίας τα δομικά μέλη τοποθετούνται σε γωνιακούς σωλήνες. Τα περισσότερα jackets στέκονται σε πασσάλους άγκυρες - ένα σε κάθε γωνία των θεμελίων. Πρώτα, όλοι οι πυλώνες τοποθετούνται σε ένα πλαίσιο εγκατάστασης. Στη συνέχεια, ξεκινά η διαδικασία σφυρηλάτησης. Αυτή η διαδικασία εμπήγει τους πυλώνες στον πυθμένα της θάλασσας και είναι ανάλογη με αυτή της εγκατάστασης του monopile. Στη συνέχεια, το jacket σηκώνεται από μια φορηγίδα ή έναν γερανό. Κατά την άφιξη στην τοποθεσία, εάν το jacket μεταφερθεί σε οριζόντια θέση θα πρέπει πρώτα να ανατραπεί. Στη συνέχεια, τα jackets κατεβαίνουν και συνδυάζονται με τους προεγκατεστημένους πυλώνες. Οι κώνοι εντοπισμού βοηθούν στην επιτάχυνση της διαδικασίας ένωσης και για να ελεγχθεί η επιτυχία της ένωσης σημαντικά είναι η κλίση, η θέση και η κορυφή των πασσάλων και οι υποβρύχιοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται συνήθως για την παροχή υποστήριξης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο. Στη συνέχεια, ο δακτύλιος μεταξύ των δύο γεμίζεται με σκυρόδεμα το οποίο αφήνεται να στεγνώσει πριν την εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας.

Εκτός από τα jackets που υποστηρίζονται από πέλη, τα θεμέλια του jacket με κάδο αναρρόφησης έχουν επίσης δοκιμαστεί. Τα θεμέλια κυπέλλου μπορούν να εγκατασταθούν με μία μόνο διαδικασία ανύψωσης και συναρμολόγησης, μειώνοντας τόσο τον χρόνο κατασκευής όσο και το σχετικό κόστος. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι ότι ο θόρυβος εγκατάστασης είναι πολύ χαμηλός.



Εικόνα 7: Εγκατάσταση Jacket (Πηγή: Seatower AS)

3.6.3 Θεμέλια βασιζόμενα στη βαρύτητα (Gravity-based foundation-GBF)

Τα GBF είναι ικανά να στέκονται στον βυθό της θάλασσας χάρη στα μεγάλα τους βάρη, που κυμαίνονται από 1500 σε 4500 τόνους και μπορούν να αντιστέκονται στις ακραίες ροπές ανατροπής. Τα GBF έχουν τεθεί σε χρήση από την αρχή της υπεράκτια αιολική βιομηχανίας και συναντώνται σε μικρά βάθη νερού, μικρότερα από 10m. Η εγκατάσταση αυτού του είδους θεμελίων χωρίζεται σε συγκεκριμένα στάδια που αφορούν την προετοιμασία βυθού, κατασκευή δομών στήριξης, δομή στήριξης εγκατάσταση και προστασία από έρμα και κατά της τριβής.

Πριν την εγκατάστασή τους απαραίτητη θεωρείται η προετοιμασία του βυθού. Αυτό το συγκεκριμένο βήμα παραβλέπεται σε περιπτώσεις θεμελίων όπως τα monopiles ή τα jackets, αλλά λόγω του τεράστιου βάρους των GBF το έδαφος θα πρέπει να μπορεί να υποστηρίξει τα τόσο μεγάλα φορτία. Τέτοια θεμέλια είναι πιο κατάλληλα για βυθούς που αποτελούνται από συμπαγή άργιλο, αμμώδες έδαφος και βράχο. Έτσι, λοιπόν με τη βοήθεια συγκεκριμένων εργαλείων και κυρίως πλοίων dredger απομακρύνονται τα εδάφη που δεν έχουν αυτή την ικανότητα. Κατά την προετοιμασία του βυθού, το αφαιρούμενο το πάχος του στρώματος κυμαίνεται από 0,5 έως 10 m.

Καθώς τα GBF χυτεύονται σε σκυρόδεμα οπλισμένο με χάλυβα χρησιμοποιώντας καλούπια η κατασκευή τους είναι αρκετά χρονοβόρα. Η μεταφορά και η εγκατάστασή τους αποτελεί πρόκληση λόγω του μεγάλου μεγέθους και βάρους τους και πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας μια μεγάλη φορτηγίδα, ένα γερανοφόρο σκάφος και ρυμουλκά ελλείπει συστημάτων αυτοπροώθησης για τα πλοία. Η φορτηγίδα μπορεί να μεταφέρει μια σειρά από θεμέλια επί του σκάφους και το γερανοφόρο σκάφος πρέπει να διαθέτει μεγάλη ανυψωτική ικανότητα προκειμένου να ανυψωθούν τα θεμέλια και να τοποθετηθούν στον βυθό της θάλασσας.



(a.)

(b.)

Εικόνα 8: Απεικόνιση της μεταφοράς και εγκατάστασης Gravity Based Foundation (a.) Μεταφορά των GBF με φορτηγίδα (b.) Τοποθέτηση GBF με γερανοφόρο σκάφος (Πηγή: <https://www.paris-normandie.fr>)

Παρ' όλα αυτά οι υπεράκτιες επιχειρήσεις heavy lifting είναι συχνά φέρουν ρίσκο και είναι αρκετά κοστοβόρες. Μία πιο σύγχρονη μέθοδος εγκατάστασης GBF είναι το λεγόμενο «float and submerge» η οποία είναι παρόμοια με τη διαδικασία εγκατάστασης των πλατφορμών βαρύτητας πετρελαίου και αερίου. Αρχικά, με τη συγκεκριμένη μέθοδο το GBF κατασκευάζεται στη στεριά, σε μία αποβάθρα. Στη συνέχεια, το αυτοεπιπλεόμενο GBF ρυμουλκείται στην τοποθεσία εγκατάστασης με τη χρήση ρυμουλκών. Στη συνέχεια, βυθίζεται σταδιακά στον βυθό της θάλασσας και ερματίζεται με νερό και άμμο. Κατά τη διάρκεια του έρματος γίνεται η χρήση ειδικών αισθητήρων και τεχνολογιών ελέγχου προκειμένου να διασφαλιστεί η σωστή κατανομή βάρους του θεμελίου. Αυτή η μέθοδος έχει καλές δυνατότητες περαιτέρω προσαρμογής επιτύχει μείωση του κόστους και τυποποίηση για μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών πύργων που υποστηρίζονται από GBF.



Εικόνα 9: Απεικόνιση της μεταφοράς των Gravity Based Foundation με τη μέθοδο float and submerged (Πηγή: rechargenews)

3.6.3 Τρίποδα Θεμέλια

Ένα τρίποδο αποτελείται από έναν χαλύβδινο σωλήνα ο οποίος βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του νερού και τρεις χαλύβδινους πασσάλους άγκυρες μέσης διαμέτρου διατεταγμένους σε ισόπλευρο τρίγωνο, η κορυφή του οποίου στηρίζει τη δομή του άνω σωλήνα. Μία προκατασκευασμένη μονάδα στήριξης του τριπόδου μπορεί αντέχει τα ανώτερα φορτία που εφαρμόζονται στον πύργο και παρέχει τάσεις και ροπές στους τρεις χαλύβδινους πασσάλους. Το τρίποδο είναι μία σταθερή, ελαφριά βάση κατάλληλη για εφαρμογή σε βάθη νερού από 10 έως 35 m.

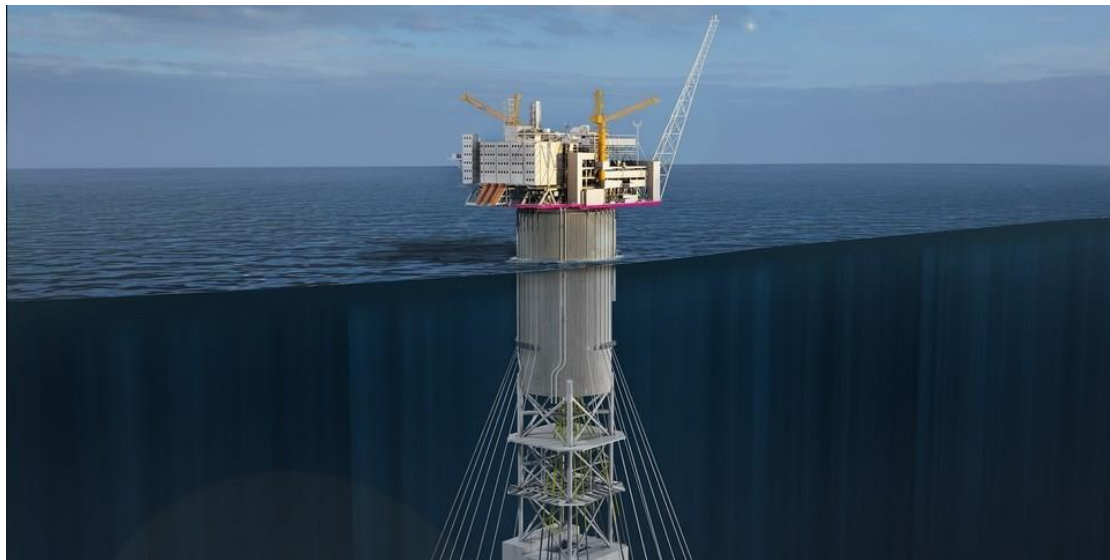


Εικόνα 10: Απεικόνιση ανεμογεννήτριας με θεμέλια tripod (Πηγή: <https://cathwell.com/tech-categories/need-design/wind-turbines/wind-turbine-design/>)

3.7 Πλωτοί Τύποι Θεμελίων

3.7.1 Θεμέλια Spar

Ένα θεμέλιο Spar είναι ένας κατακόρυφος κύλινδρος μεγάλης διαμέτρου με έρμα (στο κάτω άκρο) με βαθύ βύθισμα, που καθιστά τη δομή λιγότερο ευαίσθητη στον άνεμο, τα κύματα αλλά και τα ρεύματα. Παρόμοια με τα ημι-υποβρύχια θεμέλια, η βάση διατηρείται στη θέση της με αλυσίδες ή τεντωμένες γραμμές πρόσδεσης με άγκυρες έλξης ή αναρρόφησης. Το γεγονός ότι έχει βαθύτερο βύθισμα κάνει αυτό το πλωτό θεμέλιο πιο σταθερό σε σχέση με τους άλλους τύπους πλωτών θεμελίων. Επιπλέον, η δομή τους είναι απλούστερη και το κόστος τους χαμηλότερο. Παρόλαυτά, λόγω του μεγάλου ύψους, μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε βάθη μεγαλύτερα από 100 μέτρα. Επιπλέον, η μεταφορά σε ρηχά νερά θα μπορούσε να θεωρηθεί δύσκολη, καθώς χρειάζεται να βρίσκεται όρθιο. Τέλος, η εγκατάσταση του spar συμβαίνει στην ανοικτή θάλασσα, όπως συμβαίνει με τα θεμέλια που είναι σταθερά στον πυθμένα. Το πρώτο πλωτό αιολικό πάρκο στον κόσμο Hywind χρησιμοποιεί θεμέλια spar.



Εικόνα 11: Απεικόνιση πρώτης πλατφόρμας Spar στη Νορβηγία (Πηγή: <https://stainless-steel-world.net/first-spar-platform-for-norwegian-waters/>)

3.7.2 Ημι-υποβρύχια Θεμέλια

Τα ημι-υποβρύχια θεμέλια αποτελούνται συνήθως από πολλούς στύλους και πλωτήρες. Οι στύλοι παρέχουν τη σταθερότητα, ενώ οι πλωτήρες παρέχουν πρόσθετη άνωση. Το κέντρο βάρους βρίσκεται πάνω από το κέντρο άνωσης, η σταθερότητα επιτυγχάνεται με τη ροπή επαναφοράς των στηλών. Η πλωτή κατασκευή διατηρείται στη θέση της μέσω ενός συστήματος πρόσδεσης, που αποτελείται από αλυσίδες ή τεντωμένες γραμμές πρόσδεσης και άγκυρες έλξης ή αναρρόφησης.

Για να βελτιστοποιηθεί η δομή θεμελίωσης και να επιτευχθεί σταθερότητα της ανεμογεννήτριας, έχουν δημιουργηθεί διάφορα καινοτόμα πλωτά αιολικά ημι-υποβρύχια από διαφορετικούς σχεδιαστές πρωτοτύπων πλωτής αιολικής ενέργειας. Η ανεμογεννήτρια μπορεί να τοποθετηθεί στο κέντρο της πλωτής μονάδας ή στην κορυφή ενός στύλου. Στην τελευταία περίπτωση, απαιτείται πρόσθετο έρμα για την εξουδετέρωση του βάρους της τουρμπίνας.

Αν και τα ημι-υποβρύχια έχουν φτωχότερη θεμελιώδη σταθερότητα από τα Spar και TLP, αυτή η ιδέα εξακολουθεί να είναι η πιο δημοφιλής ιδέα μέχρι στιγμής στη βιομηχανία. Μπορεί να

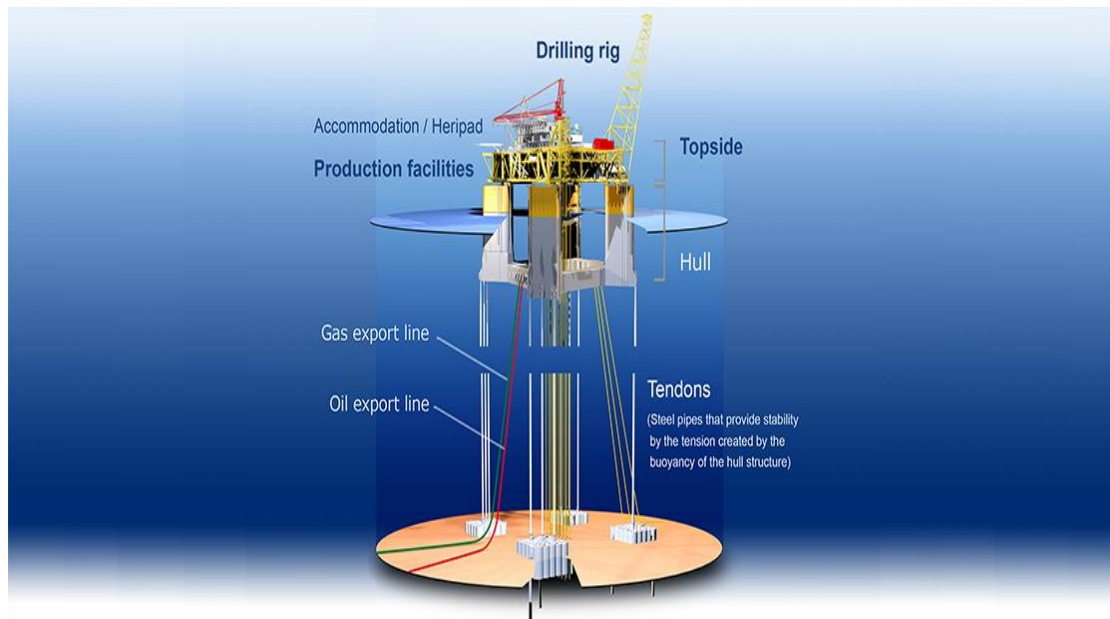
εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα βάθους νερού συνήθως από 40 μέτρα βάθος νερού. Το κόστος του συστήματος αγκύρωσης είναι χαμηλότερο από το TLP. Η μεταφορά και η τοποθέτησή του είναι απλούστερη από τις άλλες δύο έννοιες. Η ανεμογεννήτρια μπορεί να εγκατασταθεί στο ημι-υποβρύχιο στην αποβάθρα και να ρυμουλκηθεί προς την τοποθεσία, αποφεύγοντας την δαπανηρή εγκατάσταση στην υπεράκτια.



Εικόνα 12: Συμβατική ημι-υποβρύχια πλατφόρμα (Marine 7000 4ης γενιάς) (Πηγή: Response Analysis of a Truss-Pontoon Semisubmersible With Heave-Plates, Nagan Srinivasan)

3.7.3 Tension leg platform (TLP)

Η TLP είναι μια κατακόρυφα αγκυροβολημένη πλατφόρμα με υπερβολική άνωση, η οποία αποτελείται από σύλους και πλωτήρες. Στην αγορά υπάρχουν διάφορα μοντέλα TLP τα οποία ποικίλλουν στη δυνατή μετατόπιση πλατφόρμας και τη σταθερότητα, τον αριθμό των τενόντων, το σχήμα και το πλήθος των στηλών. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του TLP είναι το σύστημα πρόσδεσής του το οποίο αποτελείται από κάθετους τεντωμένους τένοντες που κάνουν τη δομή πιο σταθερή. Η δομή TLP έχει περιορισμένο heave (κατακόρυφη κίνηση), pitch και roll (περιστροφικές κινήσεις), όμως συμβαδίζει στις οριζόντιες κινήσεις του κύματος και των ταλαντώσεων. Το TLP μπορεί να θεωρηθεί ως η πιο σταθερή πλωτή δομή μεταξύ των τριών τύπων. Το μέγεθος της δομής ενός TLP μπορεί να είναι πολύ μικρότερο από ένα ημι-υποβρύχιο δεδομένου του πλεονεκτήματός σταθερότητάς του, οδηγώντας σε χαμηλότερο κόστος υλικού. Παρόμοια με το ημι-υποβρύχιο, το TLP μπορεί να εγκατασταθεί σε μεγάλο εύρος βάθους νερού από 40 μέτρα και η ανεμογεννήτρια μπορεί να εγκατασταθεί στο TLP στην αποβάθρα και να ρυμουλκηθεί προς την τοποθεσία.



Εικόνα 13: Απεικόνιση Θεμελίων υπεράκτιας ανεμογεννήτριας Tension Leg Platforms (TLPs) (Πηγή: <https://www.modec.com/business/floater/tlp/>)

3.8 Μέρη που απαρτίζουν μία ανεμογεννήτρια

- **Ρότορας:** Τα πτερύγια του ρότορα των ανεμογεννητριών λειτουργούν σύμφωνα με την αρχή ενός πτερυγίου αεροσκάφους. Η ροή αέρα στην επιφάνειά τους δημιουργεί διαφορά πίεσης. οι λεπίδες περιστρέφονται για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.
- **Άτρακτος:** Σχηματίζει το περίβλημα, το οποίο περιέχει κιβώτιο ταχυτήτων, γεννήτρια, σύστημα μετάδοσης κίνησης, φρένα κ.λπ.
- **Πτερύγια:** Η λεπίδα είναι ένα κρίσιμο μέρος οποιουδήποτε σχεδιασμού ανεμογεννητριών καθώς είναι υπεύθυνες για την ανύψωση και την ισχύ μέσω περιστροφής. Το τμήμα λεπίδας κοντά στον ρότορα είναι η πλήμνη, ενώ το τμήμα μακριά από τον ρότορα είναι η άκρη του πτερυγίου. Η πλήμνη έχει σχεδιαστεί πιο παχιά και η άκρη της λεπίδας είναι πιο λεπτή για να διευκολύνει τη ροή του αέρα.
- **Πύργος:** Έχει σχεδιαστεί για να συγκρατεί τα πτερύγια του ρότορα και ολόκληρο το συγκρότημα από το έδαφος. Συνήθως, ένας πύργος κατασκευάζεται 50–100 m πάνω από την επιφάνεια του εδάφους ή το νερό (στην περίπτωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών).
- **Φρένο:** Το σύστημα πέδησης έχει σχεδιαστεί ειδικά για να σταματά ολόκληρο το μηχανήμα όταν υπάρχει ελάττωμα ή ζημιά σε ένα εξάρτημα του στροβίλου. Το σύστημα πέδησης απαιτεί υψηλότερους ρυθμούς κύκλου και αξιοπιστία. Το τακάκι φρένων της σύγχρονης τουρμπίνας είναι επικαλυμμένο με Kevlar για να εξασφαλίσει μακροζωία και στιβαρότητα.
- **Κιβώτιο ταχυτήτων:** Το κιβώτιο ταχυτήτων χρησιμοποιείται για την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα χαμηλής ταχύτητας σε μια ηλεκτρική γεννήτρια με διάταξη γραναζιών. Η αναλογία του κιβωτίου ταχυτήτων κυμαίνεται από 15:1 έως 30:1, ανάλογα με την ισχύ εξόδου της τουρμπίνας.
- **Ανεμόμετρο:** Όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της ταχύτητας της εισερχόμενης ροής ανέμου και μεταδίδει την ταχύτητα του ανέμου στον ελεγκτή.

- Ελεγκτής: Ένας ελεγκτής ανεμογεννητριών είναι μια σειρά συστημάτων που συνδέονται για την παρακολούθηση της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και των παρακείμενων ανεμογεννητριών (αιολικό πάρκο). Είναι υπεύθυνος για την εκκίνηση και τον τερματισμό λειτουργίας του συστήματος σε αντίξοες συνθήκες.
- Σύστημα εκτροπής: Ο προσανατολισμός της ανεμογεννήτριας προς τον εισερχόμενο άνεμο γίνεται από το σύστημα εκτροπής. Έχει δύο συστήματα. ενεργητικά και παθητικά συστήματα εκτροπής και αποτελείται κυρίως από κίνηση εκτροπής, φρένο εκτροπής και ρουλεμάν εκτροπής.

4. ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Στην παρούσα εργασία έγινε η επιλογή 7 διαφορετικών μοντέλων ανεμογεννητριών προκειμένου να εξετασθεί ποιο θα ήταν καταλληλότερο για εγκατάσταση στη περιοχή της Λήμνου. Όλα τα παρακάτω μοντέλα είναι χωρητικότητας μεγαλύτερης των 5MW και είναι κατάλληλα για υπεράκτια εγκατάσταση. Τα μοντέλα είναι τα εξής: Aerodyn SCD 8.0/168, Multibrid M5000 - 5,00 MW, Haliade 150-6MW, Gamesa 5,0 MW, Gamesa 8,0 MW, Vestas 8MW και Vestas 9,5MW.

Ο κατασκευαστής επιλέγει τις ταχύτητες cut-in και cut-out μίας τουρμπίνας για να την προστατεύσει από πιθανή βλάβη. Η ταχύτητα cut-in είναι απλώς η ταχύτητα με την οποία η τουρμπίνα αρχίζει να στροβιλίζεται και να παράγει ισχύ. Ωστόσο, το σημείο cut-out, το οποίο υποδεικνύει πόσο γρήγορα μπορεί να λειτουργήσει η τουρμπίνα πριν οι ταχύτητες του ανέμου γίνουν επικίνδυνα υψηλές, είναι πιο κρίσιμο. Απαιτείται ένας μηχανισμός ακινητοποίησης ή πέδησης για να σταματήσει η τουρμπίνα πριν εισέλθει στην επικίνδυνη ζώνη, καθώς η υπερβολική ταχύτητα είναι το κύριο μέλημα ασφάλειας με τις ανεμογεννήτριες. Η πλειονότητα των ανεμογεννητριών έχουν ονομαστική ταχύτητα (Rated Power) με την οποία θα παράγουν τη μεγαλύτερη ισχύ. Οι χαμηλότερες και μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου είναι πιθανό να παράγουν λιγότερη ενέργεια από αυτή την ταχύτητα.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι κατά την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη ορισμένες κρίσιμες μεταβλητές, συμπεριλαμβανομένης της τοπικής ταχύτητας ανέμου, του βάθους εγκατάστασης, του μεγέθους του πάρκου (που καθορίζει τη θέση της μεγάλης τοποθεσίας παραγωγής) και της μεθόδου εγκατάστασης (η οποία καθορίζει το συνολικό κόστος).

4.1 Aerodyn SCD 8.0/168

Οι υπεράκτιες τουρμπίνες SCD είναι δύο πτερυγίων, είναι ελεγχόμενες από βήμα και κατάλληλες για σταθερά και πλωτά θεμέλια. Όλες οι τουρμπίνες έχουν εξειδικευμένο σχεδιασμό σε περίπτωση τυφώνα. Τα πλωτά θεμέλια μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βάθη νερού 40 m (SCD nezzzy) και 150 m (SCD deer oats) και βαθύτερα. Οι ανεμογεννήτριες 8 MW για πλωτά θεμέλια δεν έχουν σύστημα εκτροπής επειδή ολόκληρο το σύστημα αυτορυθμίζεται στην κατεύθυνση του ανέμου.

Η φιλοσοφία Nezzzy ενσωματώνει στην τουρμπίνα δύο πτερυγίων, συμπαγή κίνηση (SCD) 8 MW με σταθερή γωνία εκτροπής τοποθετημένη πάνω σε έναν σωληνωτό πύργο από χάλυβα που γέρνει δέκα μοίρες προς τα πίσω στην κατεύθυνση της ροής του ανέμου. Ο λόγος για την κλίση είναι η δημιουργία επαρκούς διάκενου για επαρκή μεταφορά φορτίου.

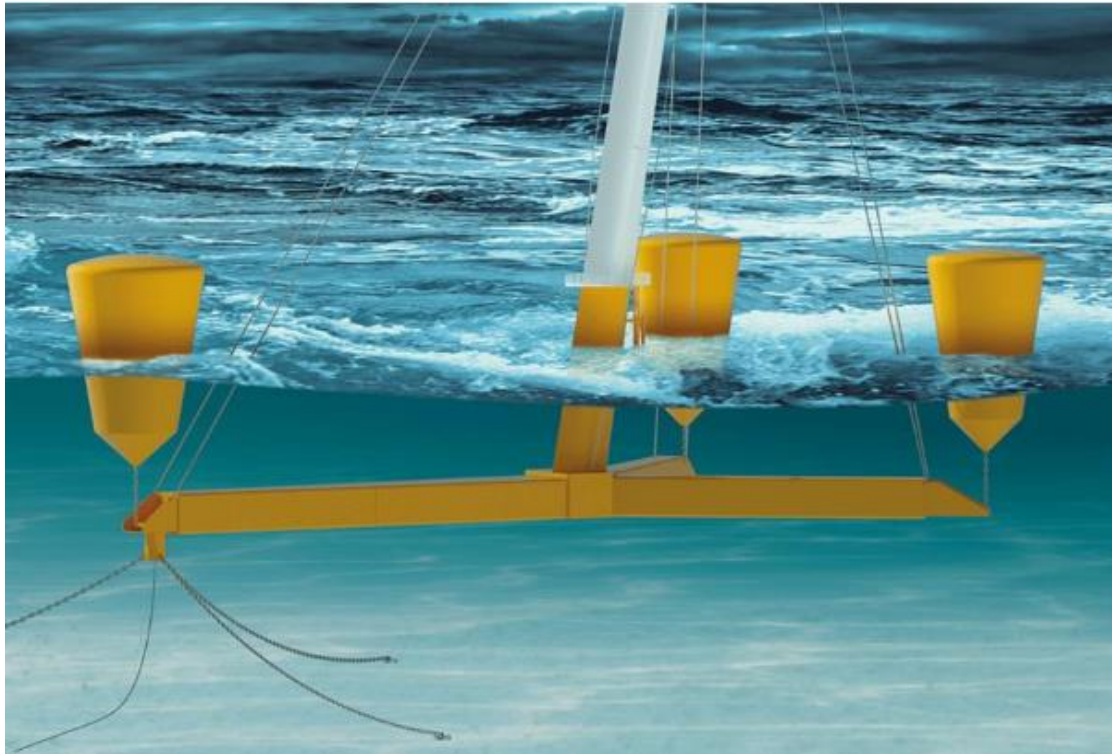
Το βασικό πλεονέκτημα του guyed design είναι ότι ουσιαστικά εξαλείφει τις ροπές κάμψης στον πύργο και τη βάση του πύργου, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα σημαντική εξοικονόμηση μάζας και κόστους. Τα καλώδια, τα οποία πρέπει να αντιμετωπίσουν τη συνεχή έκθεση στο θαλασσινό νερό και τις γενικά σκληρές θαλάσσιες συνθήκες για 20 έως 25 χρόνια, θα κοστίζουν περίπου 200.000 ευρώ, σύμφωνα με τον εφευρέτη του προϊόντος και διευθυντή της Aerodyn, Sonke Siegfriedsen.

Ο ίδιος ο πύργος έχει σχήμα σταγόνας με το στρογγυλεμένο τμήμα στραμμένο προς τον άνεμο, ένα μέτρο που υποστηρίζεται ότι μειώνει την αντίσταση του ανέμου από περίπου συντελεστή οπισθέλκουσας = 1,3 (σωλήνας) σε μόνο $Cd = 0,3-0,4$. Στόχος ήταν η ενίσχυση της συνολικής σταθερότητας της δομής περιορίζοντας την κίνηση της ατράκτου και του ρότορα κατά τη διάρκεια θεμελιωδών καιρικών συνθηκών.

Δομή σε σχήμα Y: Η βάση του πύργου υποστηρίζεται από μια τρίποδη κοίλη δομή στήριξης από σκυρόδεμα σε σχήμα Y. Το πόδι των 60 μέτρων αποτελείται από δύο κομμάτια, με κάθε μικρότερο μονοκόμματο πόδι να έχει μέγεθος 30 μέτρα. Ένα μεταλλικό στήριγμα σφραγίζει τα εξωτερικά άκρα, με το βραχίονα του μακρύτερου ποδιού να έχει περιστρεφόμενο μηχανισμό και αλυσίδες για αγκύρωση και περιστροφή της τομής προς την κατεύθυνση του ανέμου που επικρατεί.

Με τη βοήθεια ειδικών θαλάσσιων καλωδίων από χάλυβα, κάθε μεμονωμένο σκέλος τεντώνεται περαιτέρω. Η κεντρική διεπαφή χρησιμεύει επίσης ως σημείο στήριξης για την κάτω φλάντζα του πύργου.

Τα σκέλη μιας πλήρως ολοκληρωμένης τουρμπίνας SCD Nezzy σφραγίζονται και γεμίζουν με αέρα ενώ ρυμουλκούνται στην τοποθεσία του αιολικού πάρκου. Αυτό αυξάνει την άνωση και τη σταθερότητα. Τα πόδια γεμίζουν με θαλασσινό νερό κατά τη λειτουργία και το κάτω μέρος της δομής κατακάθεται σε περίπου 18 μέτρα βάθος νερού. Με ελάχιστο βάθος νερού περίπου 40 μέτρα, το Nezzy είναι επίσης κατάλληλο για τοποθεσίες στη Βόρεια Θάλασσα σε βαθιά νερά.



Εικόνα 14: Η βάση σε σχήμα Y περίπου 18 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας (Πηγή: windtech-aerodyn-two-blade-floating-8mw-scd)

Κωνικοί πλωτήρες: Οι τρεις κωνικοί πλωτήρες από σύνθετο-πλαστικό, καθένας από τους οποίους έχει οκτώ σφραγισμένα διαμερίσματα και είναι στερεωμένος στη δομή στήριξης μέσω καλωδίων ή αλυσίδων, είναι ένα άλλο ξεχωριστό χαρακτηριστικό σχεδιασμού. Οι συνολικές επενδυτικές δαπάνες για μια δομή στήριξης, αλυσίδες και άγκυρες είναι περίπου 2 εκατομμύρια ευρώ, καθιστώντας την ανταγωνιστική με τα σύγχρονα θεμέλια σταθερού πυθμένα.

Η ανεμογεννήτρια SCD 8.0 έχει διάμετρο ρότορα 168 μέτρα και αποτελεί εξέλιξη του 6MW SCD 6.0 με διάμετρο ρότορα 140 μέτρα. Επιπλέον, το Nezzy των 8 MW είναι οπτικά μεγαλύτερος από αυτόν των 6 MW, αλλά δεν διαθέτει πλατφόρμα προσγείωσης ελικοπτερίου, η οποία έπρεπε να αφαιρεθεί για λόγους επιχειρησιακής ασφάλειας. Στο εσωτερικό, το σύστημα μετάδοσης κίνησης των 6 MW ήταν μηχανικά προσαρμοσμένο στις δυνάμεις επιτάχυνσης που επιβάλλονται από τις δομικές κινήσεις και τις κινήσεις της ατράκτου που προκαλούνται από τα κύματα. Η μεγαλύτερη τροποποίηση SCD 8.0 για το Nezzy ήταν η μετάβαση σε κωνικά ρουλεμάν για τις δύο πλανητικές βαθμίδες του κιβωτίου ταχυτήτων και τη γεννήτρια. Ο σχεδιασμός του ρουλεμάν του ρότορα εξετάζεται ακόμη.

Χωρίς PMG: Η μετατροπή από μια σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMG) σε μια σύγχρονη γεννήτρια με διέγερση ηλεκτρικού πεδίου χωρίς ψήκτρες είναι μια άλλη σημαντική προσαρμογή σχεδιασμού SCD 8.0 που δεν σχετίζεται με την ιδέα του πλωτού στροβίλου.

Η τεχνολογία της ανεμογεννήτριας άλλαξε για διάφορους λόγους. Ο πρώτος σχετίζεται με τα τρέχοντα ζητήματα χειρισμού και συναρμολόγησης των μαγνητών. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι, για να αποφευχθούν δυσκολίες υπερβολικής τάσης, η προθέρμανση του PMG από μη λειτουργική κατάσταση πρέπει να γίνει εξαιρετικά προσεκτικά. Τέλος, αυτή η γεννήτρια είναι σημαντικά λιγότερο ακριβή.

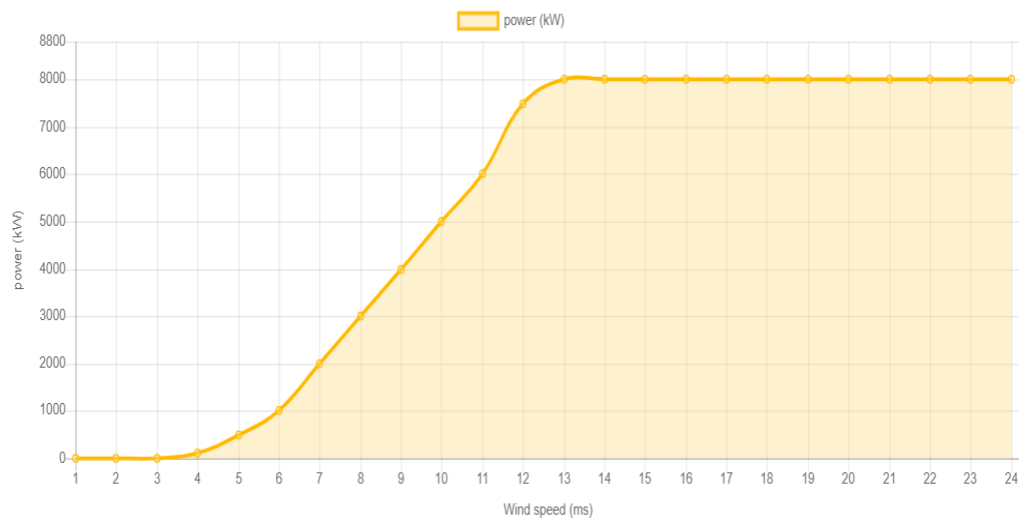
Τα κύρια μειονεκτήματα περιλαμβάνουν μια ελαφρώς μεγαλύτερη και βαρύτερη γεννήτρια, καθώς και απώλειες διέγερσης της γεννήτριας, οι οποίες περιορίζονται στα 20 kW μόνο όταν λειτουργεί με πλήρη ισχύ. Αυτό ανέρχεται σε μόνο 0,25 τοις εκατό για έναν στρόβιλο 8 MW.

Το SCD 8.0 έχει λεπίδες κατασκευασμένες από την Aerodyn με ίνες άνθρακα που περιλαμβάνονται στα καλύμματα φέρουσας ράβδου, γεγονός που συμβάλλει στη μείωση της παραμόρφωσης της λεπίδας. Η μεγαλύτερη χορδή (το πλάτος της λεπίδας στο πλατύτερο σημείο της) είναι σχεδόν 6 μέτρα, καθιστώντας αυτές τις λεπίδες μία από τις ευρύτερες διαθέσιμες αυτήν τη στιγμή. Από πλευράς απόδοσης και κόστους ενεργειακής βελτιστοποίησης, η ειδική ονομαστική ισχύς 361 W/m² του SCD 8.0 αντιπροσωπεύει μια ικανοποιητική αξία για τους στρόβιλους IEC Class I.

Power		Rotor	
Rated power:	8,000.0 kW	Diameter:	168.0 m
Flexible power ratings:	-	Swept area:	22,167.0 m ²
Cut-in wind speed:	3.5 m/s	Number of blades:	2
Rated wind speed:	11.5 m/s	Rotor speed, max:	11.4 U/min
Cut-out wind speed:	25.0 m/s	Tip speed:	100 m/s
Survival wind speed:	-	Type:	-
Wind zone (DIBt):	-	Material:	GFRP
Wind class (IEC):	lb	Manufacturer:	-
		Power density 1:	360.9 W/m ²
		Power density 2:	2.8 m ² /kW

Εικόνα 15: Παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών για την ανεμογεννήτρια Aerodyn SCD 8.0/168. (Πηγή: [wind-turbine-models-aerodyn-scd-8.0-168](#))

Power curve



Εικόνα 16: Καμπύλη ισχύος για την ανεμογεννήτρια Aerodyn SCD 8.0/168. (Πηγή //en.wind-turbine-models.com/turbines/1116-aerodyn-scd-8.0-168)

4.2 Multibrid M5000 - 5,00 MW

Η τουρμπίνα M5000, χωρητικότητας 5 MW, κατασκευάστηκε ειδικά για υπεράκτια αιολική ενέργεια. Σε στενή συνεργασία με την Beckhoff, η Multibrid επανασχεδίασε το σύστημα ελέγχου και το κατασκεύασε σε μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα για τη μαζική κατασκευή αυτών των τουρμπίνων.

Το πρώτο πρωτότυπο της ανεμογεννήτριας Multibrid κατασκευάστηκε το 2004, αλλά χρειάστηκαν άλλα τρία χρόνια για να καταστεί κατάλληλη για μαζική παραγωγή. Στα μέσα του 2007, το εργοστάσιο παραγωγής της Multibrid στο Bremerhaven της Γερμανίας άρχισε να συναρμολογεί το Multibrid M5000 με διάμετρο ρότορα 116 μέτρα και ύψος πλήμνης 90 μέτρα. Παρά την ισχύ του 5 MW, το M5000 είναι ελαφρύ. Μαζί, η άτρακτος και ο ρότορας ζυγίζουν μόνο 349 τόνους. Το μικρό βάρος διευκολύνει την κίνηση και την ανέγερση, κάτι που είναι κρίσιμο για τις εργασίες στην ανοιχτή θάλασσα. Η άτρακτος κατασκευάζεται στη στεριά από εξειδικευμένο προσωπικό, έτσι ώστε να μπορεί να ανυψωθεί στην ανοιχτή θάλασσα ως ολόκληρη μονάδα στον πύργο. Αυτό εξοικονομεί χρόνο και χρήμα, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει υψηλό επίπεδο ασφάλειας. Ωστόσο, το μικρότερο βάρος της άτρακτου επιτρέπει πιο οικονομικά εξαρτήματα πύργου και βάσης.

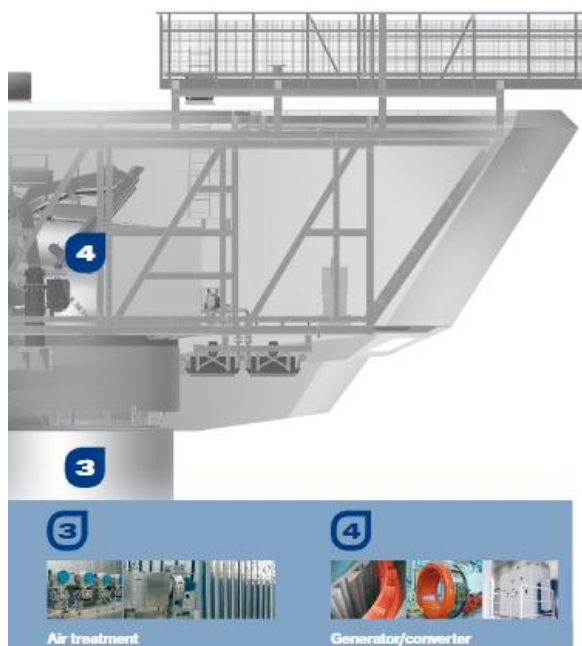
Η M5000 επιχειρεί την εξοικονόμηση χώρου. Ο σχεδιασμός των τεχνολογικών εξαρτημάτων στη σχετικά μικροσκοπική άτρακτο είναι το αποτέλεσμα σημαντικής έρευνας. Η αποτελεσματική ενσωμάτωση του ρουλεμάν ρότορα, του κιβωτίου ταχυτήτων και της γεννήτριας επιτρέπει τον συμπαγή σχεδιασμό του, εξαλείφοντας την ανάγκη για περιβλήματα εξαρτημάτων της εγκατάστασης. Το μικροσκοπικό μέγεθος της εγκατάστασης επιτρέπει σύντομες διαδρομές μετάδοσης φορτίου προς την κεφαλή του πύργου, κάτι που είναι εξαιρετικό για υπεράκτιες εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας.

Το κεντρικό σύστημα μετάδοσης κίνησης του M5000 προστατεύεται από βλάβη λόγω της μέτριας ταχύτητας περιστροφής και του μικρού αριθμού κινούμενων μερών και ρουλεμάν κλινδρών. Επιπλέον, όλα τα κρίσιμα βοηθητικά συσσωματώματα και οι αισθητήρες διπλασιάζονται, έτσι ώστε η αστοχία τους να μην φέρει το σύστημα σε πλήρη ακινητοποίηση. Ένα μοναδικό σύστημα παρακολουθεί συνεχώς την κατάσταση των κρίσιμων στοιχείων και αναφέρει σωστά τυχόν ανωμαλίες. Αυτό καθιστά τις εργασίες συντήρησης πιο διαχειρίσιμες και, ως αποτέλεσμα, πιο αποτελεσματικές.

Για να διασφαλιστεί η εκτεταμένη διάρκεια ζωής των υπεράκτιων μονάδων αιολικής ενέργειας, είναι κρίσιμο να προστατεύεται ο εξοπλισμός του στροβίλου από το διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον. Για να διατηρηθεί η τεχνολογία της εγκατάστασης, το M5000 είναι εξοπλισμένο με ιδιόκτητο σύστημα επεξεργασίας αέρα. Απορροφά τον αέρα του περιβάλλοντος και φιλτράρει τα διαβρωτικά σωματίδια. Σχηματίζεται μια υπερπίεση που περικλείει ολόκληρο το σύστημα και το προστατεύει από εξωτερικές διαβρωτικές δυνάμεις. Το M5000 είναι αδιαπέραστο από το αλάτι και την υγρασία χάρη στην προηγμένη τεχνολογία της AREVA Multibrid.



Εικόνα 17: Αναπαράσταση του κιβωτίου ταχυτήτων και του ρόταρα της ανεμογεννήτριας Multibrid M5000 - 5,00 MW. (Πηγή: Areva- Multibrid M5000 - 5,00 MW)



Εικόνα 18: Αναπαράσταση του συστήματος ελέγχου του αέρα της γεννήτριας και του μετασχηματιστή της ανεμογεννήτριας Multibrid M5000 - 5,00 MW. (Πηγή: Areva- Multibrid M5000 - 5,00 MW)

Ο ρότορας συνδέεται με το περίβλημα του μηχανήματος με ένα ρουλεμάν κυλίνδρου με διπλή κωνικότητα. Το ρουλεμάν του ρότορα και το κιβώτιο ταχυτήτων είναι σχεδιασμένα με τέτοιο τρόπο ώστε οι δυναμικές τάσεις του ρότορα να μην έχουν αρνητικό αντίκτυπο στο πλέγμα του γραναζιού. Το ελικοειδές πλανητικό σύστημα γραναζιών εγγυάται ότι όλοι οι άξονες και οι τροχοί λιπαίνονται σωστά. Το κιβώτιο ταχυτήτων παρέχει λάδι στο ρουλεμάν του ρότορα σε συνεχή βάση, ανεξάρτητα από αυτό.

Τα φέροντα μέρη των πτερυγίων του ρότορα M5000 είναι κατασκευασμένα από ανθρακονήματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολύ υψηλή ακαμψία σε πολύ χαμηλό βάρος. Η μοναδική αεροδυναμική των πτερυγίων του ρότορα εξασφαλίζει εξαιρετική απόδοση απόδοσης, ενώ μειώνει σημαντικά τις εκπομπές θορύβου. Τρία ανεξάρτητα ηλεκτρικά συστήματα βήματος λεπίδας παρέχουν εξαιρετικά δυναμική ρύθμιση γωνίας λεπίδας καθώς και μέγιστη ασφάλεια σε περίπτωση δυσλειτουργίας. Το σύστημα βήματος της λεπίδας περικλείεται πλήρως μέσα στην κλειστή πλήμνη του ρότορα, διασφαλίζοντας ότι προστατεύεται καλά από τα στοιχεία. Το M5000 είναι εξοπλισμένο με μονάδα επεξεργασίας αέρα. Τραβάει έξω αέρα, ο οποίος στη συνέχεια καθαρίζεται από σωματίδια αλατιού και υγρασίας σε διάφορα βήματα. Η αρχή καθαρισμού βασίζεται στις δυνάμεις αδράνειας που προκαλούν την εναπόθεση σταγονιδίων νερού. Στη συνέχεια, ο επεξεργασμένος αέρας διοχετεύεται στον πύργο, διασφαλίζοντας ότι δεν εισέρχεται αλμυρός ατμοσφαιρικός αέρας στην ανεμογεννήτρια.

Το περίβλημα του μηχανήματος στεγάζει τη σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη. Ο ρότορας της γεννήτριας δεν απαιτεί τα δικά του έδρανα επειδή είναι τοποθετημένος στον άξονα εξόδου του κιβωτίου ταχυτήτων. Η τεχνολογία μόνιμου μαγνήτη παρέχει ένα μέγιστο εύρος ταχύτητας περιστροφής όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με μετατροπέα συχνότητας, με αποτέλεσμα έναν τέλειο ηλεκτρικό και αεροδυναμικό ρυθμό απόδοσης. Ένας μετατροπέας 4Q συνδέει τη γεννήτρια με το δίκτυο, επιτρέποντας μέγιστες διακυμάνσεις ταχύτητας και συμμόρφωση με το δίκτυο.

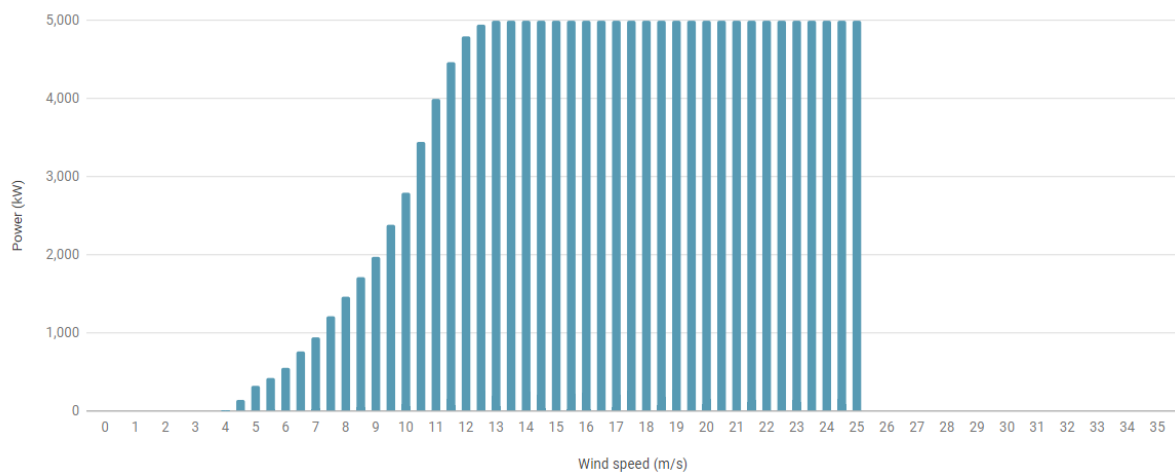
Ο καιρός έχει σημαντικό αντίκτυπο στην προσβασιμότητα ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο δημιουργήθηκε η τεχνολογία Multibrid M5000 με γνώμονα μεγάλα χρονικά διαστήματα μεταξύ της συντήρησης. Ο μόνιμος έλεγχος του στροβίλου εξασφαλίζεται μέσω ενός συστήματος παρακολούθησης υψηλής ποιότητας. Αυτό διασφαλίζει ότι το M5000 παρακολουθείται με αξιόπιστο τρόπο. Επιπλέον, η ολοκληρωμένη παρακολούθηση κατάστασης επιτρέπει τη μελέτη σε πραγματικό χρόνο των εξαρτημάτων του στροβίλου. Ως αποτέλεσμα, οι εργασίες συντήρησης και σέρβις στην ανοιχτή θάλασσα μπορούν να προγραμματιστούν εκ των προτέρων και να ενσωματωθούν για να αυξηθεί η απόδοση. Εάν οι καιρικές συνθήκες εμποδίσουν το σέρβις, η τουρμπίνα θα ανταποκριθεί αυτόματα.

Το M5000 δημιουργήθηκε με γνώμονα τα υπεράκτια έργα. Ως αποτέλεσμα, η τουρμπίνα είναι εξοπλισμένη με δύο τύπους ηλεκτρονικών συστημάτων παρακολούθησης της κατάστασης, που εγγυώνται ότι λειτουργεί αξιόπιστα και με ασφάλεια. Ως αποτέλεσμα, μπορεί να αποφευχθεί η παρατεταμένη και απρογραμμάτιστη διακοπή λειτουργίας. Το ηλεκτρονικό σύστημα παρακολούθησης κατάστασης (CMS) του M5000 για ολόκληρο το σύστημα μετάδοσης κίνησης, από το ρουλεμάν του ρότορα έως τη γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων, έχει προσαρμοστεί στη χαμηλή ταχύτητα περιστροφής του M5000. Η οικονομική βιωσιμότητα του M5000 εξαρτάται από τη μεγάλη διάρκεια ζωής της λεπίδας, γι' αυτό και διαθέτει ένα πρόσθετο σύστημα παρακολούθησης λεπίδων ρότορα. Ο έγκαιρος εντοπισμός της ζημιάς επιτρέπει τον προγραμματισμό μακροπρόθεσμων αντικαταστάσεων.

	<p>General data</p> <ul style="list-style-type: none"> • Manufacturer: Multibrid (Allemagne) • Model: M5000 • Rated power: 5,000 kW • Rotor diameter: 116 m • No more available • Wind class: DIBt 3 • Offshore model: yes • Swept area: 10,569 m² • Specific area: 2.12 m²/kW • Number of blades: 3 • Power control: Pitch • Commissioning: 2009
<p>Gear box</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gear box: yes • Stages: 2 • Gear ratio: 10 • Manufacturer: RENK AG 	<p>Weights</p> <ul style="list-style-type: none"> • Nacelle: 246 tons • Tower: 825 tons • Rotor + hub: 110 tons • Total: 1181 tons
<p>Generator</p> <ul style="list-style-type: none"> • Type: SYNC PM • Number: 1 • Maximum speed: 148,5 rounds/minute • Voltage: 3300 V • Manufacturer: Alstom 	<p>Rotor</p> <ul style="list-style-type: none"> • Minimum rotor speed: 5,9 rd/min • Maximum rotor speed: 14,8 rd/min • Cut-in wind speed: 4 m/s • Rated wind speed: 13 m/s • Cut-off wind speed: 25 m/s • Manufacturer: PN Rotor, Euros
<p>Tower</p> <ul style="list-style-type: none"> • Minimum hub height: 90 m • Maximum hub height: 102 m • Manufacturer: Ambau 	<p>Gear box</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gear box: yes • Stages: 2 • Gear ratio: 10 • Manufacturer: RENK AG

Εικόνα 19: Παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών για την ανεμογεννήτρια Multibrid M5000 - 5,00 MW. (Πηγή: [thewindpower /turbine_en_90_multibrid_m5000](#))

Power curve



Εικόνα 20: Καμπύλη ισχύος για την ανεμογεννήτρια Multibrid M5000 - 5,00 MW. (Πηγή: [thewindpower /turbine_Multibrid M5000 - 5,00 MW](#))

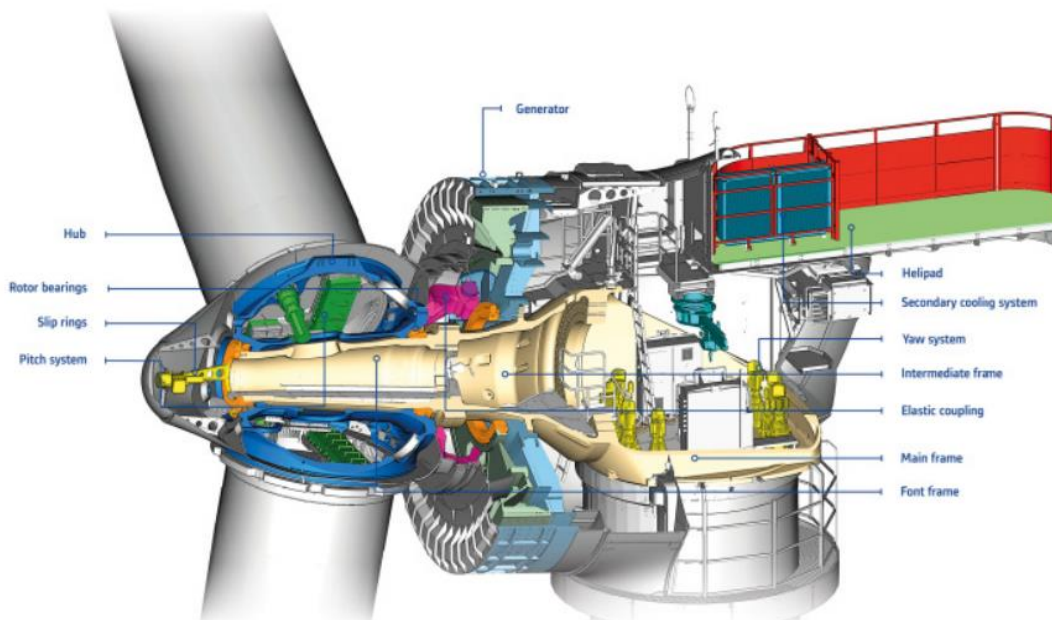
4.3 Haliade 150-6MW

Η Haliade™ 150-6MW είναι μια ανεμογεννήτρια τριών πτερυγίων με διάμετρο ρότορα 150 μέτρα και ονομαστική ισχύ 6 MW. Το συγκεκριμένο μοντέλο σχεδιάστηκε σύμφωνα με τις προδιαγραφές IEC-61400-1 / IEC-61400-3 Class I-B. Είναι κατάλληλο για τοποθεσίες με ταχύτητα ανέμου αναφοράς 50 m/s (μέσος όρος 10 λεπτών) και ακραία ταχύτητα ριπής 50 ετών 70 m/s (μέσος όρος 3 δευτερόλεπτα). Στο Haliade™ 150-6MW περιλαμβάνονται μια γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη απευθείας μετάδοσης κίνησης και τρεις πανομοιότυποι μετατροπείς πλήρους ισχύος που λειτουργούν στα 900 V ο καθένας. Η τάση αυξάνεται χρησιμοποιώντας έναν μετασχηματιστή ενσωματωμένο στον στρόβιλο. Η βάση του πύργου στεγάζει τον μετατροπέα, τον μετασχηματιστή, τον πίνακα διανομής και τον πίνακα διανομής ηλεκτρικού ρεύματος χαμηλής τάσης.

Στην άτρακτο, ένας πίνακας διανομής παρέχει ισχύ και σήματα στους ανεμιστήρες βήματος, εκτροπής και ψύξης, καθώς και συλλέγει σήματα από όλους τους αισθητήρες του συστήματος. Η ανεμογεννήτρια είναι υπό πίεση και αερόψυξη. Τα υπεράκτια υλικά κατασκευής και οι μέθοδοι προστασίας είναι ειδικά κατάλληλες για αυτές τις συνθήκες. Οι εναλλάκτες θερμότητας και τα συστήματα συμπίεσης κρατούν έξω τον αλμυρό αέρα, ενώ οι αφυγραντήρες εμποδίζουν τη διάβρωση των εξαρτημάτων της ανεμογεννήτριας.

Πολλά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά διασφαλίζουν ότι το Haliade™ 150-6MW παράγει τη μεγαλύτερη δυνατή απόδοση σε οποιαδήποτε κατάσταση.

- Συνεχής ανοχή αστοχίας παραγωγής: τρεις ανεξάρτητες γραμμές παραγωγής και μετατροπής παρέχουν συνεχείς λειτουργίες.
- Οι ελεγχόμενες από λογισμικό διαδικασίες υποβάθμισης διασφαλίζουν τη λειτουργία σε περίπτωση μερικών βλαβών του ηλεκτρικού αγωγού ή του συστήματος ψύξης.



Εικόνα 21: Αναπαράσταση των στοιχείων του ρότορα για την ανεμογεννήτρια Haliade 150-6MW. (Πηγή: GE-Haliade 150-6MW)

Για αύξηση της απόδοσης, η Haliade™ 150-6MW διαθέτει ALSTOM PURE TORQUE, μια νέα ιδέα υποστήριξης ρότορα που προστατεύει τη γεννήτρια από φορτία εκτροπής. Ο ρότορας του στροβίλου και η γεννήτρια χωρίζονται σε αυτή τη διάταξη, διασφαλίζοντας ότι μόνο η δύναμη περιστροφής — ροπή — παρέχεται στη γεννήτρια. Αυτό διασφαλίζει ότι το μικρότερο δυνατό διάκενο αέρα υπάρχει ανά πάσα στιγμή μεταξύ του ρότορα της γεννήτριας και του στάτη, με αποτέλεσμα τη μέγιστη δυνατή ηλεκτρική απόδοση.

Η τεχνολογία της Alstom, η οποία περιλαμβάνει μια γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη απευθείας μετάδοσης κίνησης (PMG), διασφαλίζει ότι το σύστημα μετάδοσης κίνησης του στροβίλου είναι εξαιρετικά αξιόπιστο. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει λιγότερα περιστρεφόμενα μέρη επειδή δεν συνδέεται με τη γεννήτρια με κιβώτιο ταχυτήτων, γεγονός που βελτιώνει την αξιοπιστία, αυξάνει τη διαθεσιμότητα του στροβίλου και μειώνει το κόστος συντήρησης. Η χρήση μιας γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη (PMG) βελτιώνει την απόδοση παραγωγής και αυξάνει τη συνολική μηχανική αξιοπιστία, τα οποία είναι και τα δύο σημαντικά στον υπεράκτιο άνεμο. Σε σύγκριση με τις προηγούμενες γενιές συστημάτων άμεσης μετάδοσης κίνησης, η καινοτόμος "Advanced High Density" άμεσης μετάδοσης κίνησης PMG είναι πιο συμπαγής και ελαφρύς σχεδιασμός.

Μια ελαφριά λεπίδα 73,5 m σχεδιασμένη ειδικά για το Haliade™ 150-6MW μεγιστοποιεί τη δύναμη και τη μακροζωία. Για τη δημιουργία αυτής της νέας λεπίδας χρησιμοποιείται μία πατενταρισμένη τεχνολογία. Σε σύγκριση με τη σημερινή γενιά υπεράκτιων στροβίλων, η διάμετρος ρότορα 150 m αυξάνει την ετήσια παραγωγή ενέργειας κατά 15%. Η προσθήκη ενός ρότορα μεγάλης διαμέτρου στον στρόβιλο ονομαστικής ισχύος 6 MW μεγιστοποιεί την δέσμευση ενέργειας. Η εγκατάσταση απλοποιείται και το κόστος του στροβίλου και των δομών στήριξης μειώνεται χάρη σε ένα επιθετικό βάρος στόχου.

Το Haliade™ 150-6MW έχει σχεδιαστεί για να είναι όσο το δυνατόν πιο απλό και ασφαλές στη συντήρηση:

- Η πλήμνη είναι προσβάσιμη απευθείας από την άτρακτο, επιτρέποντας την εκτέλεση σημαντικών διαδικασιών σέρβις μέσα από την τουρμπίνα.
- Μια περιοχή ελικοπτέρου επιτρέπει την ταχεία διάσωση σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης στη θάλασσα, και η άτρακτος είναι εξοπλισμένη με γερανό χωρητικότητας 1 τόνου στο κεντρικό πλαίσιο.

Η Alstom έχει δημιουργήσει λύσεις τόσο για χερσαίες όσο και για υπεράκτιες εφαρμογές.

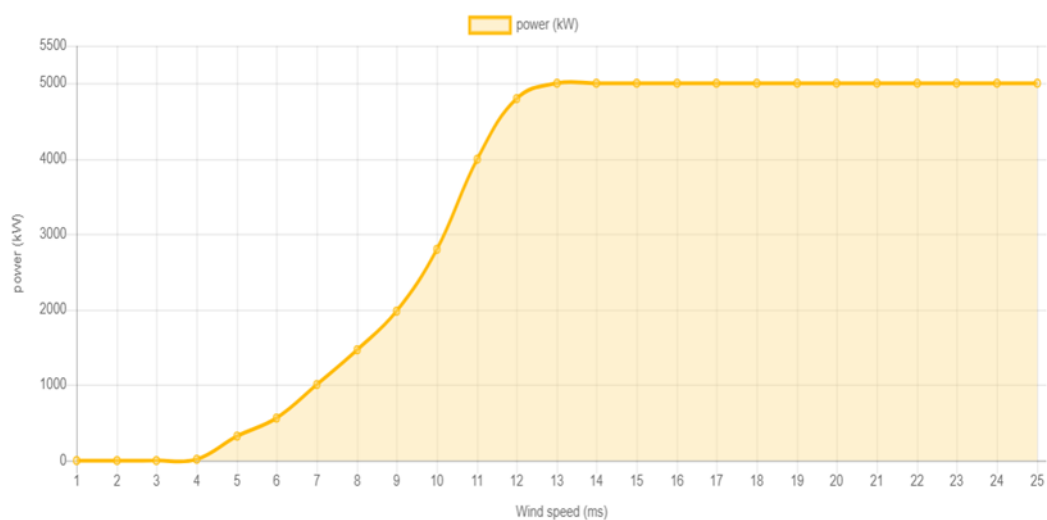
- WindAccess™: ολοκληρωμένος έλεγχος και παρακολούθηση που παρακολουθεί και συλλέγει δεδομένα από τις ανεμογεννήτριες, τον μετεωρολογικό ιστό και τον υποσταθμό, επιτρέποντας στο αιολικό πάρκο να λειτουργεί παρόμοια με μια συμβατική μονάδα παραγωγής ενέργειας.

- Wind e-control™: μια τεχνολογία υψηλής απόδοσης σε πραγματικό χρόνο για την ενσωμάτωση των αιολικών πάρκων στους πιο αυστηρούς κανόνες δικτύου.

OPERATING DATA	
Wind Turbine Class	I-B IEC-61400-1 / IEC-61400-3
Rated power	6.0 MW (net after transformer)
Cut-in wind speed	3 m/s
Cut-out wind speed (10 minutes average)	25 m/s
Grid frequency	50 / 60 Hz
ROTOR	
Rotor diameter	150.95 m
Blade length	73.5 m
Rotor swept area	17,860 m ²
Rotor speed range	4 - 11.5 rpm
Tip speed	90.8 m/s
GENERATOR	
Type	Direct Drive Permanent Magnet
Rated voltage	900 V per phase
Number of phases	3 x 3
Protection class	IPP55
CONVERTER	
Type	Back to back 3-phase AC/AC
Output voltage	900 V
TOWER	
Type	Tubular steel
Hub height	100 m (or site-specific)
Standard color	RAL 7035
POWER CONTROL SYSTEM	
Type	Variable speed and independant pitch control by blade
ENVIRONMENTAL SPECIFICATIONS	
Normal air temperature range	-10 to +40°C
Extreme air temperature range	-30 to +50°C
Lightning protection	Class I acc. IEC 62305-1

Εικόνα 22: Παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών για την ανεμογεννήτρια Haliade™ 150-6MW. (Πηγή: [thewindpower /turbine_ Haliade™ 150-6MW](http://thewindpower.com/turbine_HaliadeTM_150-6MW))

Power curve



Εικόνα 23: Καμπύλη ισχύος για την ανεμογεννήτρια Haliade 150-6MW. (Πηγή: [thewindpower /turbine_ Haliade 150-6MW](http://thewindpower.com/turbine_Haliade_150-6MW))

4.4 Gamesa G128-5.0MW Offshore

Οι υπερράκτιες ανεμογεννήτριες Gamesa έχουν σχεδιαστεί για να προσαρμόζονται τέλεια στις συνθήκες οποιασδήποτε υπερράκτιας τοποθεσίας. Αυτές οι συνθήκες μπορεί να είναι πολύ μεταβλητές και μερικές φορές ακραίες λόγω των δυσμενών καιρικών συνθηκών και του σκληρού θαλάσσιου περιβάλλοντος, γεγονός που δυσχεραίνει την πρόσβαση στο αιολικό πάρκο. Η προηγμένη τεχνολογία που χρησιμοποιείται στις ανεμογεννήτριες Gamesa Offshore εξασφαλίζει υψηλή αξιοπιστία, ενισχύει την παραγόμενη ενέργεια, μειώνει τη συντήρηση, ελαχιστοποιεί το χρόνο διακοπής λειτουργίας, και τελικά μεγιστοποιεί την κερδοφορία κάθε έργου.

Οι υπερράκτιες ανεμογεννήτριες Gamesa κατασκευάζονται για να παρατείνουν την περίοδο μεταξύ προγραμματισμένων ταξιδιών συντήρησης και να μειώσουν τον αριθμό των απρογραμμάτιστων επισκέψεων συντήρησης. Η Gamesa το επιτυγχάνει αυτό χρησιμοποιώντας μια ποικιλία δοκιμασμένων μεθόδων, συμπεριλαμβανομένων εκτεταμένων δοκιμών και επικύρωσης μηχανικών και ηλεκτρικών συστημάτων, αρθρωτού σχεδιασμού και προηγμένων προγνωστικών/διαγνωστικών συστημάτων.



Εικόνα 24: Μοντέλο Ανεμογεννήτριας Gamesa G128-5.0MW Offshore (Πηγή: wind-turbine-models gamesa-g128-5.0mw)

Πλεονεκτήματα της Gamesa 5,0 MW

Το μεμονωμένο βήμα και ο πολυμεταβλητός έλεγχος ελαχιστοποιούν το βάρος, τα φορτία και τον θόρυβο. ΗΤμηματική λεπίδα για εύκολη μεταφορά και εγκατάσταση. Το συμπαγές σύστημα μετάδοσης κίνησης υψηλής απόδοσης μειώνει τη μηχανική καταπόνηση. Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη και τεχνολογία πλήρους μετατροπέα που επιτρέπουν την ικανοποίηση των πιο απαιτητικών απαιτήσεων του κώδικα δικτύου. Ο αρθρωτός σχεδιασμός της ατράκτου και των λεπίδων συμβάλλει στη μέγιστη αξιοπιστία και εύκολη συναρμολόγηση και συντήρηση. Ο πρόσθετος γερανός προσαρμόζεται στη θήκη για βοήθεια στη συναρμολόγηση και τη συντήρηση των κύριων ενοτήτων. Η αεροδυναμική σχεδίαση λεπίδων και το σύστημα ελέγχου Gamesa NRS ελαχιστοποιούν εκπομπές θορύβου. Gamesa WindNet: η προηγμένη τεχνολογία

SCADA για διαδικτυακό αιολικό πάρκο έλεγχο και παρακολούθηση. Gamesa SMP System: σύστημα προγνωστικής συντήρησης.

Το InnoBlade είναι σήμα κατατεθέν της Gamesa. Η ελαφριά λεπίδα σε τομή είναι κατασκευασμένη από ένα μοναδικό μείγμα υλικών. Το Gamesa Innoblade μπορεί να μεταφερθεί με τα ίδια μηχανήματα και εξοπλισμό που χρησιμοποιείται για την παράδοση μοντέλων 2 MW στην τοποθεσία. Τα νέα αεροδυναμικά προφίλ της Gamesa ελαχιστοποιούν τον θόρυβο ενώ αυξάνουν την απόδοση. Μια σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη και ένας πλήρης μετατροπέας χρησιμοποιούνται στο ηλεκτρικό σύστημα της Gamesa 5.0 MW. Το Gamesa GridMate αποτελείται από τέσσερις παράλληλες μονάδες που επιτρέπουν τη λειτουργία μερικού φορτίου σε περίπτωση μεμονωμένης βλάβης και πληρούν τα πιο αυστηρά κριτήρια σύνδεσης στο δίκτυο.

Τα δεδομένα που συλλέγονται από το σύστημα διαχείρισης ανεμογεννητριών παρακολουθούνται συνεχώς προκειμένου να ρυθμιστεί κάθε μεμονωμένο περύγιο, να εξαιρεθούν οι κραδασμοί και να μειωθεί το φορτίο σε ορισμένα εξαρτήματα έως και 30%. Βασισμένο στη μεγιστοποίηση της αεροδυναμικής και του ελέγχου, αυτό το σύστημα ελέγχου περιλαμβάνει την πιο προηγμένη τεχνολογία για τη μείωση του θορύβου.

Ένας ημι-ενσωματωμένος κύριος άξονας και ένα κιβώτιο ταχυτήτων δύο σταδίων με απόδοση εμπέλειας μεσαίας ταχύτητας συνθέτουν το σύστημα μετάδοσης κίνησης 5,0 MW της Gamesa. Με λιγότερα εξαρτήματα και πιο ενσωματωμένο σχεδιασμό, η μονάδα είναι πιο συμπαγής. Επιπλέον, η αφαίρεση υψηλής ταχύτητας περιστρεφόμενων μηχανικών εξαρτημάτων και η εξάρτηση από την απόδοση μεσαίας εμπέλειας ενισχύει την αξιοπιστία του στροβίλου. Το Gamesa FlexiFit χρησιμοποιείται για τη συγκέντρωση και διατήρηση τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων επιτόπου. Το βασικό του πλεονέκτημα είναι ότι είναι στερεωμένο στην άτρακτο και δεν απαιτεί καμία εξωτερική υποστήριξη. Σε πολλές περιπτώσεις είναι εναλλακτική λύση στη χρήση μεγάλων γερανών. Αποτελείται από πολλαπλές μονάδες που είναι εγκατεστημένες στο επίπεδο του εδάφους και δεν απαιτούν ειδική μεταφορά.

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της πλατφόρμας Gamesa 5.0 MW είναι ότι συμμορφώνεται με τα κριτήρια logistics και κατασκευής της πλατφόρμας Gamesa 2.0-2.5 MW. Επειδή η άτρακτος και τα περύγια της Gamesa 5.0 MW είναι αρθρωτά, η βαρύτερη μονάδα δεν ξεπερνά το συνολικό βάρος της πλατφόρμας της Gamesa 2.0-2.5 MW, καθιστώντας την εξίσου εύκολη στη μεταφορά και κατασκευή με μια ανεμογεννήτρια 2.0-2.5 MW.

Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να μειώνει τον αριθμό των απαιτούμενων διορθωτικών ενεργειών. Το σύστημα Gamesa SMP αποτελείται από μια συσκευή στην άτρακτο και ένα κέντρο επεξεργασίας δεδομένων που μπορεί να επεξεργαστεί και να παρέχει σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση των κρίσιμων μηχανικών εξαρτημάτων της ανεμογεννήτριας. Το Gamesa 5.0 MW έχει επίσης σχεδιαστεί για να βελτιώνει τη συντηρησιμότητα της πλατφόρμας, συμπεριλαμβάνοντας χαρακτηριστικά που βελτιώνουν την προληπτική και διορθωτική συντήρηση.

General data

- Manufacturer: Gamesa (Espagne)
- Model: G128/5000
- [Product page](#)
- Rated power: 5,000 kW
- Rotor diameter: 128 m
- No more available
- Wind class: IEC IIa
- Offshore model: yes
- Swept area: 12,868 m²
- Specific area: 2.58 m²/kW
- Number of blades: 3
- Power control: Pitch

Rotor

- Cut-in wind speed: 2 m/s
- Rated wind speed: 14,5 m/s
- Cut-off wind speed: 27 m/s
- Manufacturer: Gamesa

Gear box

- Gear box: yes
- Stages: 2
- Gear ratio: 41,405

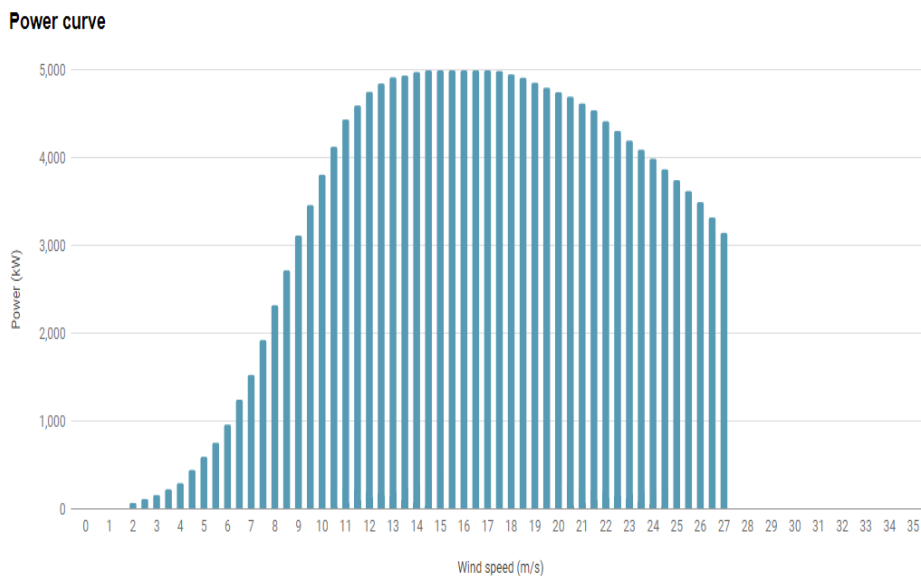
Generator

- Type: SYNC PM
- Number: 1
- Maximum speed: 490 rounds/minute
- Voltage: 690 V

Tower

- Minimum hub height: 80 m
- Maximum hub height: 94 m
- Manufacturer: Gamesa

Εικόνα 25: Παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών για την ανεμογεννήτρια Gamesa G128-5.0MW Offshore. (Πηγή: [thewindpower /turbine_Gamesa G128-5.0MW Offshore](#))



Εικόνα 26: Καμπύλη ισχύος για την ανεμογεννήτρια Gamesa G128-5.0MW Offshore. (Πηγή: [thewindpower /turbine_en_1558_siemens-gamesa_sg-8.0-167-dd](#))

4.5 Gamesa G128-8.0MW

Το SG 8.0-167 DD είναι μια αναβάθμιση στην πλατφόρμα Offshore Direct Drive. Η αναβάθμιση επιτρέπει την SG 8.0-167 DD για απόδοση έως και 20% περισσότερης ενέργειας από τον προκάτοχό του, το SWT-7.0-154. Η λειτουργική μονάδα για αυτό το LCA ορίζεται ως 1 kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παραδίδεται στο δίκτυο. Η προσδιορισμένη μέση ταχύτητα ανέμου είναι σχετική με την ταξινόμηση IEC του στροβίλου. Κάθε μονάδα αιολικής ενέργειας έχει συγκεκριμένους περιορισμούς τοποθεσίας που επηρεάζουν την επιλογή τουρμπίνας, πύργου ύψος, μέγεθος θεμελίωσης και υποδομή.



Εικόνα 27: Ο μεγαλύτερος ρότορας εξοπλισμένος με νέες αεροδυναμικές λεπίδες B81 μήκους 81,4 μέτρων επιτρέπει στο SG 8.0-167 DD να παράγει έως και 20% περισσότερη ενέργεια ετησίως από τον προκάτοχό του (Πηγή: wind-turbine-sg-8-0-167-dd)

Η Siemens Gamesa Renewable Energy είναι μία από τις πρώτες εταιρείες που το παρουσίασαν δέσμευση για μείωση του ισοπεδωμένου κόστους Ενέργειας (LCoE) για υπεράκτια αιολική ενέργεια. Σε σχέση με αυτό, προσπαθούν να βελτιώνουν την απόδοση της ανεμογεννήτριας συμπεριλαμβάνοντας εκτιμήσεις για το LCoE καθώς και τις περιβαλλοντικές απαιτήσεις στη φάση του σχεδιασμού μας. Εστιάζουν στην αύξηση της ετήσιας παραγωγής ενέργειας των στροβίλων και τη βελτίωση του υλικού αποτελεσματικότητα των εξαρτημάτων. Τα έργα βελτίωσης μας επικεντρώνονται επίσης σε βελτιστοποίηση των διαδικασιών που σχετίζονται με την κατασκευή, εγκατάσταση, λειτουργία και συντήρηση, αποσυναρμολόγηση και λήξη ζωής. Όλες αυτές οι πρωτοβουλίες συμβάλλουν στη μείωση του ισοδύναμου CO₂ ανά kWh ηλεκτρικής ενέργειας που παραδίδεται στο δίκτυο και μειώνει το LCoE. Στη συνέχεια, θα περιγράψουμε μερικά από τα δικά μας προσεγγίσεις για την ελαχιστοποίηση του περιβάλλοντος αντίκτυπο και LCoE σε όλο τον κύκλο ζωής του ένα εργοστάσιο αιολικής ενέργειας.

Η Siemens Gamesa, σε συνεργασία με προμηθευτές, βελτίωσε την χρήση υλικών και διαδικασίες κατασκευής που σχετίζονται με μόνιμους μαγνήτες. Μετά την πυροσυσσωμάτωση, οι μόνιμοι μαγνήτες είναι συμβατικά έδαφος από ορθογώνιες γεωμετρίες στο επιθυμητό σχήμα που απαιτείται για την εγκατάσταση στο γεννήτρια. Αυτή είναι μια σπάταλη διαδικασία γιατί το υπόλειμμα άλεσης δεν μπορεί να ανακυκλωθεί 100%. Επιπλέον, βελτίωσε την χρήση υλικών και διαδικασίες κατασκευής που σχετίζονται με μόνιμους μαγνήτες. Μετά την πυροσυσσωμάτωση, οι μόνιμοι μαγνήτες είναι συμβατικά έδαφος από ορθογώνιες γεωμετρίες

στο επιθυμητό σχήμα που απαιτείται για την εγκατάσταση στο γεννήτρια. Αυτή είναι μια σπάταλη διαδικασία γιατί το υπόλειμμα άλεσης δεν μπορεί να ανακυκλωθεί 100%.

Επιπλέον, η Siemens Gamesa εργάζεται για τη βελτίωση της φάσης εγκατάστασης. Το πλοίο Roll-on-Roll-off (RoRo) είναι ένα πρώην πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που έχει ανακατασκευαστεί για το νέο του σκοπός. Μέρος του νέου εξοπλισμού της είναι ένα μεγάλο πλήρη που επιτρέπει την πρόσβαση Ro-Ro στο ανακατασκευασμένο κατάστρωμα φορτίου. Το κατάστρωμα καλύπτεται από τηλεσκοπική οροφή για την προστασία των αυλών ψεκασμός αλμυρού θαλασσινού νερού κατά τη μεταφορά. Δεδομένου ότι η οροφή μπορεί να ανοίξει, το σκάφος. Το φορτίο μπορεί επίσης να φορτωθεί μέσω γερανών στα λιμάνια χωρίς ράμπα Ro-Ro. Λόγω του ευέλικτου διάταξη του καταστρώματος, μπορεί επίσης να μεταφέρει έως και εννέα τμήματα αιολικού πύργου ανά ταξίδι ή τρία έως τέσσερα σετ λεπίδων ρότορα. Εξοικονόμηση έως και 15–20% σε logistics αναμένονται σε σύγκριση με τα υπάρχοντα μεθόδους μεταφοράς.

Η τεχνολογία άμεσης μετάδοσης κίνησης μειώνει τον αριθμό των χαρακτηριστικών και επιρρεπών στη φθορά εξαρτημάτων σε υπεράκτιες τουρμπίνες, καθιστώντας τους απλούστερους στη συντήρησή τους. Η απόδοση βελτιώνεται με τη χρήση μιας γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη, η οποία δεν χρειάζεται ισχύ διέγερσης. Αυτές και άλλες σχεδιαστικές απλοποιήσεις διατηρούν το βάρος σε χαμηλά επίπεδα και τις διαστάσεις μικρές, μειώνοντας το κόστος μεταφοράς και εγκατάστασης.

Το σύστημα High Wind Ride Through (HWRT) είναι μια σημαντική ανακάλυψη στη σταθεροποίηση της παραγωγής ενέργειας. Όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη από 25 μέτρα ανά δευτερόλεπτο, οι ανεμογεννήτριες συνήθως κλείνουν για αυτοπροστασία. Όσοι είναι εξοπλισμένοι με το σύστημα HWRT θα μειώσουν σιγά σιγά την ισχύ εξόδου, επιτρέποντας ομαλότερη μείωση της παραγωγής και ως εκ τούτου ένα πιο αξιόπιστο ηλεκτρικό δίκτυο.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας IntegralBlade επιτρέπει σε κάθε εποξειδική λεπίδα ενισχυμένη με υαλοβάμβακα να χυτεύεται σε ένα κομμάτι. Αυτή η διαδικασία εξαλείφει τις πιο αδύναμες περιοχές στις κολλημένες αρθρώσεις και παράγει λεπίδες βέλτιστης ποιότητας, αντοχής και αξιοπιστίας.

Οι αισθητήρες στροβίλου μεταδίδουν συνεχώς δεδομένα στο Διαγνωστικό Κέντρο Siemens Gamesa, επιτρέποντας τον έγκαιρο εντοπισμό ανωμαλιών και αποτρέποντας πιθανές βλάβες. Αναλύοντας τα μοτίβα δόνησης, μπορούμε να βελτιστοποιήσουμε το σχέδιο σέρβις σας και να προβλέψουμε τις επισκευές πριν προκληθούν σοβαρές ζημιές.

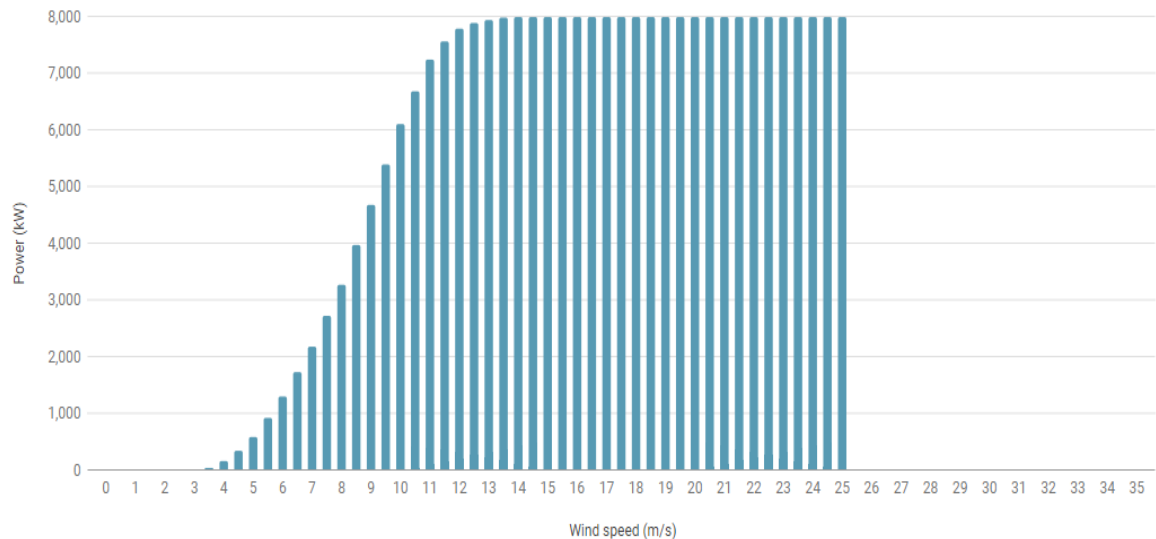
Το πρωτοποριακό RecyclableBlade βασίζεται στην αποδεδειγμένη τεχνολογία μας IntegralBlade και η κατασκευή ακολουθεί την ίδια ακριβώς διαδικασία με μόνο αλλαγή ρητίνης. Η νέα ρητίνη είναι τόσο ισχυρή και αξιόπιστη όσο πριν, αλλά με πρόσθετα οφέλη ανακυκλωσιμότητας. Μετά το τέλος της ζωής τους και τον παροπλισμό, τα υλικά των λεπίδων μπορούν να διαχωριστούν και να ανακυκλωθούν σε νέες εφαρμογές.

Power

Rated power:	8,000.0 kW	Rotor	
Flexible power ratings:	-	Diameter:	167.0 m
Cut-in wind speed:	3.0 m/s	Swept area:	21,900.0 m ²
Rated wind speed:	12.0 m/s	Number of blades:	3
Cut-out wind speed:	25.0 m/s	Rotor speed, max:	12.0 U/min
Survival wind speed:	70.0 m/s	Tipspeed:	105 m/s
Wind zone (DIBt):	-	Type:	B82/81.5m
Wind class (IEC):	1b	Material:	GRE
		Manufacturer:	Siemens
		Power density 1:	365.3 W/m ²
		Power density 2:	2.7 m ² /kW

Εικόνα 28: Αναλυτική παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών και προδιαγραφών, για την ανεμογεννήτρια Gamesa 8,0 MW. (Πηγή: wind-turbine-models-siemens-gamesa-sg-8.0-167-dd)

Power curve



Εικόνα 29: Καμπύλη ισχύος για την ανεμογεννήτρια Gamesa G128-8.0MW Offshore. (Πηγή: the wind power turbine_en_1558_siemens-gamesa_sg-8.0-167-dd)

4.6 Vestas v164-8 MW

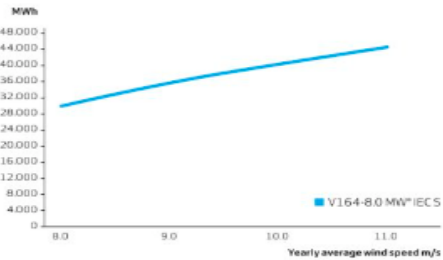
Με χωρητικότητα έως και 10 μεγαβάτ, η Vestas V164 είναι μια υπεράκτια ανεμογεννήτρια τριών πτερυγίων που κατασκευάζεται από την Vestas. Αυτή η χωρητικότητα είναι παγκόσμιο ρεκόρ. Η Vestas αποκάλυψε τη σχεδίαση του V164 το 2011 και τον Ιανουάριο του 2014, η πρώτη πρωτότυπη μονάδα τέθηκε σε λειτουργία στο Sterild στη βόρεια Δανία. Στην Burbo Bank, ένα μικρό νησί στα ανοιχτά της δυτικής ακτής του Ηνωμένου Βασιλείου, οι πρώτες βιομηχανικές μονάδες δημιουργήθηκαν το 2016. Η Vestas είχε κατασκευάσει 500 μονάδες της σειράς μέχρι το 2021. Από το 2014, αυτή η υπεράκτια τουρμπίνα παρήγαγε την περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια, με διάμετρο ρότορα 164 μέτρα (538 πόδια) και swept area 21.124 τετραγωνικών μέτρων (227.380 τετραγωνικά πόδια). Κάθε λεπίδα έχει βάρος 33–35 τόνους.

Εξελίσσοντας το αρχικό μοντέλο Vestas V164-7,0MW, η ισχύς αυξήθηκε από 7,0 MW σε 8,0 MW και στη συνέχεια σε 9,0 MW. Η χωρητικότητα της τουρμπίνας αυξήθηκε στα 9,5 MW το 2017. Οι υπεράκτιοι στρόβιλοι Siemens Wind Power SWT-8.0-154 και Adwen AD 8-180 με ονομαστική ισχύ 8 MW, καθώς και τα πρωτότυπα της γαλλικής GE Haliade 12–14 MW και το MingYang των 16 MW, είναι οι επόμενες μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες και αντίπαλοι του V164. Αν και εγκαθίσταται μόνο στην ξηρά, η τουρμπίνα Enercon E-126 έχει μέγιστη ισχύ 7,58 MW. τεχνολογία που δίνει προτεραιότητα στην κερδοφορία Η Vestas παρουσιάζει δυνατότητες σχεδίασης με την εισαγωγή των 164-8,0 MW για να αυξήσει την κερδοφορία της υπεράκτιας αιολικής σας ενέργειας σε νέα ύψη. Βελτιστοποιήστε την αναλογία ρότορα προς γεννήτρια εκτός από την τεράστια διάμετρο ρότορα 164m για μεγιστοποίηση της δέσμωσης ενέργειας. Επιτρέποντας στους χρήστες να λειτουργούν λιγότερες, μεγαλύτερες τουρμπίνες, θα μειωθούν τα έξοδα λειτουργίας και συντήρησης.

Επωφεληθείτε από την 25ετή δομική σχεδίαση του V164-8.0 MW, η οποία είναι εξαιρετική για τα βιομηχανικά πρότυπα και θα μεγιστοποιήσει την απόδοση της επένδυσής σας. Αυτό αυξάνει τη βεβαιότητα της επιχείρησής σας και σας δίνει περισσότερο χρόνο για να παράγετε ενέργεια. Αν και το κόστος των στρόβιλων αποτελεί συνήθως περίπου το ένα τρίτο του συνολικού κόστους κεφαλαίου για ένα υπεράκτιο έργο, άλλες τιμές πιο κάτω στην αλυσίδα αξίας επηρεάζονται από τις υλικοτεχνικές επιλογές που γίνονται σχετικά με το βάρος, το μέγεθος και την πρόσβαση σε υπηρεσίες. Εξαιτίας αυτού, εξετάζουμε κάθε πτυχή του έργου ως σύνολο και όχι απλώς μεμονωμένες τουρμπίνες. Επιπλέον, το V164-8.0 MW χρησιμοποιεί μια σειρά από μοναδικές τεχνικές μείωσης κινδύνου: Η τουρμπίνα ενσωματώνει χαρακτηριστικά ανοχής σε σφάλματα για να λειτουργεί με μειωμένη ισχύ σε περίπτωση απρόβλεπτων προβλημάτων και μια πολιτική "πλεονάζοντος εξαρτήματος" εμπνευσμένη από αεροπλάνα για την αποφυγή διακοπών των προγραμματισμένων υπηρεσιών και εξασφαλίζουν κανονική απόδοση. Για αξιόπιστες λειτουργίες, χρησιμοποιείται κιβώτιο ταχυτήτων μεσαίας ταχύτητας. Κάθε κομμάτι μηχανήματος και εξάρτημα είναι μια βελτίωση σε σχέση με την ήδη επιτυχημένη τεχνολογία.

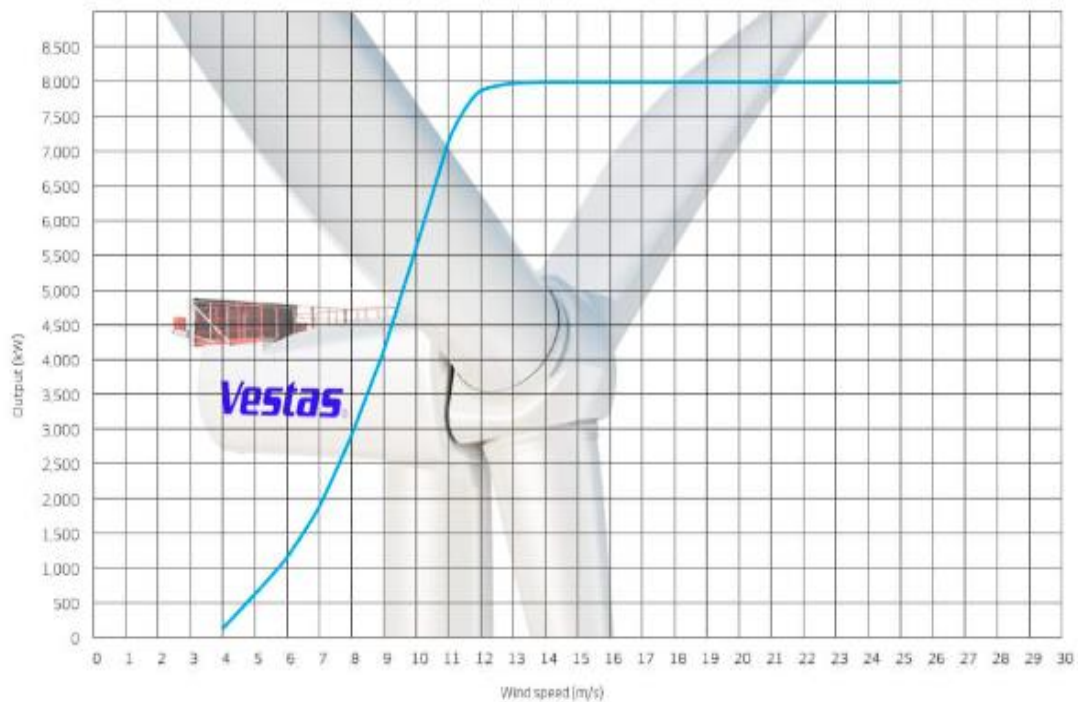
Ο λόγος ρότορα 164 m προς γεννήτρια 8,0 MW δημιουργήθηκε για να είναι κατάλληλος για τις δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες στην περιοχή της Βόρειας Θάλασσας. Ο ρότορας 164 μέτρων μεγιστοποιεί την ικανότητά σας να χρησιμοποιείτε την αιολική ενέργεια, αυξάνοντας την ετήσια ενεργειακή σας παραγωγή. Για να παραχθεί η απαραίτητη ποσότητα ενέργειας, χρειάζονται λιγότερες τουρμπίνες, γεγονός που μειώνει τα έξοδα αποστολής, θεμελίωσης, εγκατάστασης, καλωδίωσης, συντήρησης και συντήρησης. Όταν γίνεται σέρβις, το V164-8.0 MW είναι ασφαλές, γρήγορο και προσιτό, επειδή είναι κατασκευασμένο ώστε να απαιτεί όσο το δυνατόν λιγότερη συντήρηση. μι Έχετε περισσότερο χρόνο για να δημιουργήσετε ισχύ χάρη στη δομική σχεδίαση της τουρμπίνας, η οποία έχει διάρκεια ζωής 25 ετών.

POWER REGULATION	Pitch regulated with variable speed	NACELLE DIMENSIONS (INCL. HUB)	
		Height	7.5 m
		Length	24 m
		Width	7.5 m
OPERATING DATA		WEIGHTS	
Rated power	8,000 kW	Nacelle, including hub	375 tonnes
Cut-in wind speed	4 m/s	Blade	35 tonnes
Operational rotor speed	4.8 - 12.1 rpm	Tower	site dependent
Nominal rotor speed	10.5 rpm		
Operational temperature range	-10 - +25°C	TURBINE OPTIONS	
Extreme temperature range	-15 - +35°C	<ul style="list-style-type: none"> · Certified Condition Monitoring System · Aviation lights · Aviation markings on the blades · Hell hoist platform · Tower design optimized for all typical foundations types · Power back up 	
DESIGN PARAMETERS		ANNUAL ENERGY PRODUCTION	
Wind class	IEC S		
Annual avg. Wind speed	11 m/s		
Weibull shape parameter	k 2.2		
Weibull scale parameter	12.4 m/s		
Turbulence intensity	IEC B		
1 year mean wind speed V1 (10 min avg.)	40 m/s		
50 year mean wind speed V50 (10 min avg.)	50 m/s		
Max inflow angle (vertical)	0°		
Structural design lifetime	25 years		
ROTOR			
Rotor diameter	164 m		
Swept area	21,124 m ²		
ELECTRICAL			
Frequency	50 Hz		
Converter	full scale		
Generator	permanent magnet		
Nominal voltage	33 - 35 or 66 kV		
TOWER			
Type	tubular steel tower		
Hub height	site specific		
BLADE DIMENSIONS			
Length	80 m		
Max. chord	5.4 m		



Assumptions
 One wind turbine, 100% availability, 0% losses, k factor = 2.2,
 Standard air density = 1.225, wind speed at hub height

Εικόνα 30: Αναλυτική παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών και προδιαγραφών, για την ανεμογεννήτρια Vestas V164-8,0MW. (Πηγή: wind-turbine-models-Vestas V164-8,0MW)



Εικόνα 31: Καμπύλη ισχύος για την ανεμογεννήτρια Vestas V164-8,0MW. (Πηγή: thewindpower /turbine_Vestas V164-8,0MW)

4.7 Vestas v164-9.5 MW

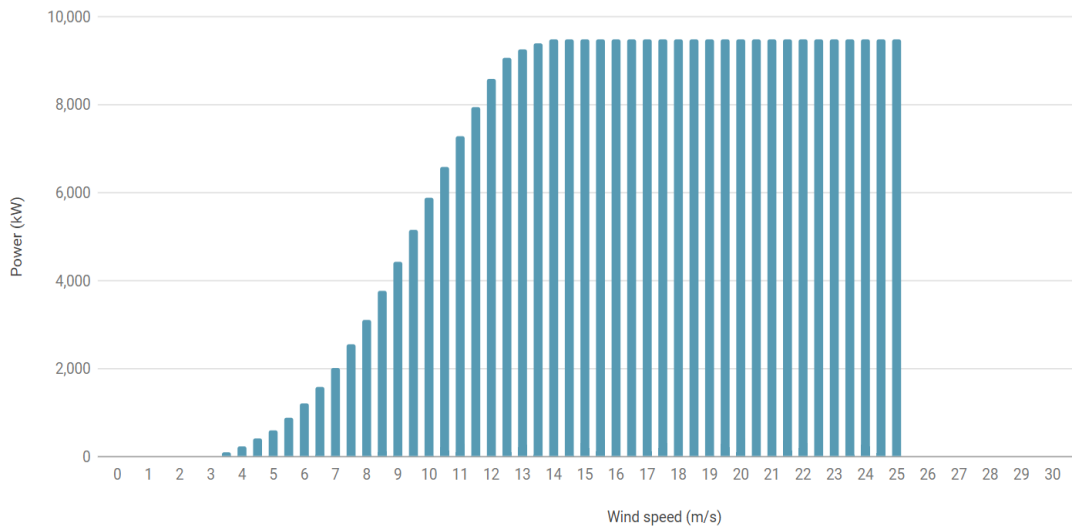
Το V164-9,5 MW συνεχίζει την κληρονομιά του δοκιμασμένου V164-8,0MW. Με ελάχιστες σχεδιαστικές αλλαγές, όπως επανασχεδιασμένο κιβώτιο ταχυτήτων και αναβαθμίσεις συστήματος ψύξης, τα 9,5 MW παρέχουν κορυφαία επίπεδα απόδοσης στην αγορά, χαμηλό λειτουργικό κόστος, οικονομική εγκατάσταση και ενσωματωμένη αξιοπιστία. Το MHI Vestas Offshore V164-9,5 MW έχει ονομαστική ισχύ 9,50 MW. Το MHI Vestas Offshore V164-9,5 MW διαθέτει ρότορα διαμέτρου 164 m. Η επιφάνεια του ρότορα είναι 21.124 m². Τρία πτερύγια ρότορα αποτελούν την ανεμογεννήτρια.

Γρήγορη εγκατάσταση και μεταφορά Το LOST του Vestas δημιουργήθηκε για να διασφαλίσει τη δυνατότητα μεταφοράς χρησιμοποιώντας τις τρέχουσες τεχνικές μεταφοράς για μέρη με περιορισμούς παράδοσης. Τα τμήματα μεγάλης διαμέτρου μπορούν να χωριστούν κάθετα σε τρία τμήματα, καθιστώντας εύκολη τη μεταφορά του πύργου στον προορισμό του για φορτηγά με επίπεδη επιφάνεια. Ο αριθμός των εξαρτημάτων του πύργου μπορεί να μειωθεί σε λιγότερες μονάδες λόγω της ενισχυμένης αντοχής, η οποία θα επιταχύνει την εγκατάσταση. Ως αποτέλεσμα, χρειάζονται λιγότερο από δύο ημέρες για να ολοκληρωθεί η επανασυναρμολόγηση των κάτω τμημάτων, συμπεριλαμβανομένης της εγκατάστασης των εσωτερικών στο χώρο. Πλεονεκτήματα της τεχνολογίας LDST της Vestas • Δοκιμή κατασκευής από χάλυβα Ένας οικονομικά αποδοτικός τρόπος για να επιτευχθεί ύψος πλήμνης έως και 166 μέτρα σε λιγότερο από δύο Κατά τον παροπλισμό, τουλάχιστον το 99 τοις εκατό των υλικών είναι ανακυκλώσιμα.

Rotor		Generator	
Diameter:	164.0 m	Type:	permanent magnetic
Swept area:	21,124.0 m ²	Number:	1
Number of blades:	3	Speed, max:	500.0 U/min
Rotor speed, max:	-	Voltage:	66,000.0 V
Tipspeed:	-	Grid connection:	IGBT
Type:	80m	Grid frequency:	50/60 Hz
Material:	-	Manufacturer:	-
Manufacturer:	MHI Vestas, LM Glasfiber	Tower	
Power density 1:	449.7 W/m ²	Hub height:	105/140 site specific m
Power density 2:	2.2 m ² /kW	Type:	steel tube
		Shape:	conical
		Corrosion protection:	painted
		Manufacturer:	-

Εικόνα 32: Αναλυτική παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών και προδιαγραφών, για την ανεμογεννήτρια Vestas V164-8,0MW. (Πηγή: wind-turbine-models-Vestas V164-9.5MW)

Power curve



Εικόνα 33: Καμπύλη ισχύος για την ανεμογεννήτρια Vestas V164-9,5MW. (Πηγή: thewindpower /turbine_Vestas V164-9,5MW)

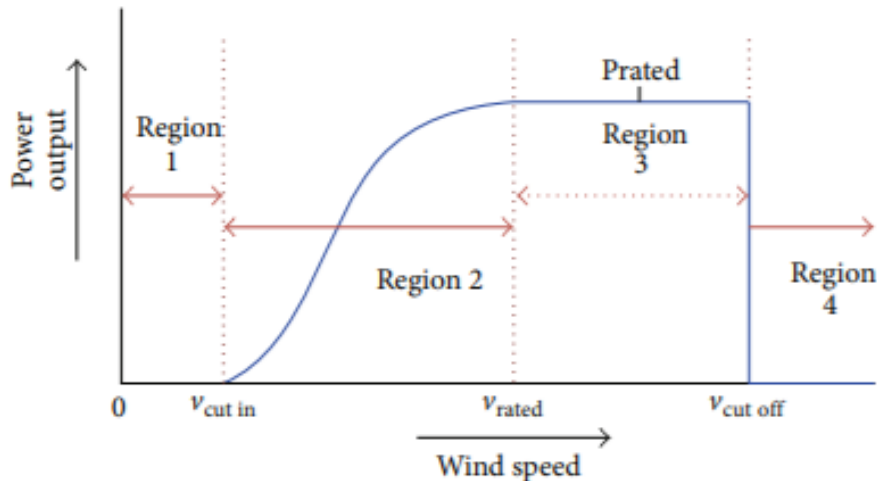
5. ΚΑΜΠΥΛΗ ΙΣΧΥΟΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Για την αξιολόγηση της αιολικής ενέργειας, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καμπύλη ισχύος ανεμογεννητριών. Για να προσδιοριστούν οι κατάλληλες περιοχές για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, ο αιολικός πόρος μιας περιοχής αξιολογείται ως προς την ταχύτητα του ανέμου, την πυκνότητα της αιολικής ενέργειας και το δυναμικό αιολικής ενέργειας. Τα διαθέσιμα δεδομένα ανέμου και η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιούνται σε αυτή την τεχνική για την εκτίμηση της ενέργειας. Κατά το στάδιο του σχεδιασμού ενός συστήματος που βασίζεται στην αιολική ενέργεια, η πρόβλεψη της ισχύος εξόδου σε μια υποψήφια τοποθεσία είναι επίσης απαραίτητη για μελέτες μεγέθους και βελτιστοποίησης κόστους. Επειδή μια υπερεκτίμηση μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλή αξιοπιστία και μια υποεκτίμηση μπορεί να οδηγήσει σε υπερμεγέθη του συστήματος μετατροπής της αιολικής ενέργειας, η ακρίβεια στην πρόβλεψη ισχύος είναι κρίσιμη. Οι φορείς εκμετάλλευσης ανεμογεννητριών που πωλούν ενέργεια απευθείας στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να προβλέπουν επακριβώς την παραγωγή ισχύος των ανεμογεννητριών τους προκειμένου να παρέχουν το συμφωνημένο ποσό.

Η ισχύς εξόδου μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η ταχύτητα του ανέμου, η κατεύθυνση του ανέμου, η πυκνότητα του αέρα (συνάρτηση θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας), οι ρυθμίσεις της ανεμογεννήτριας και τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας όπως η απόδοση, το μέγεθος και η καμπύλη ισχύος. Η επαρκής εξέταση όλων των παραμέτρων που την επηρεάζουν είναι αρκετά πολύπλοκη. Ως αποτέλεσμα, ο υπολογισμός της ισχύος εξόδου χρησιμοποιώντας μια θεωρητική εξίσωση είναι πρόκληση.

Η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας, συχνά γνωστή ως χαρακτηριστικό $p-v$ μιας ανεμογεννήτριας, η οποία δείχνει την ισχύ εξόδου της ανεμογεννήτριας σε μια δεδομένη ταχύτητα ανέμου, είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για τη μοντελοποίηση της απόδοσης της ανεμογεννήτριας.

Η Εικόνα 34 απεικονίζει μια τυπική καμπύλη ισχύος για μια ανεμογεννήτρια. Η παραγωγή ισχύος είναι 0 στην πρώτη περιοχή όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη από ένα ελάχιστο όριο, που ονομάζεται ταχύτητα αποκοπής v_{in} . Στη δεύτερη περιοχή υπάρχει μια ταχεία αύξηση στην ισχύ εξόδου μεταξύ της ταχύτητας διακοπής και της ονομαστικής ταχύτητας. Στην τρίτη περιοχή, παράγεται μια σταθερή έξοδος (ονομαστική) μέχρι να επιτευχθεί η ταχύτητα αποκοπής. Πέρα από αυτή την ταχύτητα (περιοχή 4) η τουρμπίνα τίθεται εκτός λειτουργίας για να προστατεύσει τα εξαρτήματά της από ισχυρούς ανέμους και ως εκ τούτου παράγει μηδενική ισχύ σε αυτή την περιοχή.



Εικόνα 34: Τυπική καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας με ρύθμιση βήματος (Πηγή: A Critical Review on Wind Turbine Power Curve Modelling Techniques and Their Applications in Wind Based Energy Systems- Vaishali Sohoni, S. C. Gupta, and R. K. Nema)

Η απόδοση μίας ανεμογεννήτριας υποδεικνύεται από την καμπύλη ισχύος της. Τα μοντέλα καμπύλης ισχύος που είναι ακριβή είναι κρίσιμα εργαλεία για τις προβλέψεις ισχύος και την ηλεκτρονική παρακολούθηση των ανεμογεννητριών. Διάφορες μέθοδοι για τη μοντελοποίηση της καμπύλης ισχύος της ανεμογεννήτριας έχουν αναπτυχθεί σε διάφορες εργασίες και πολλοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει αυτές τις προσεγγίσεις, οι οποίες συνδυάζουν δεδομένα από τις προδιαγραφές του κατασκευαστή με πραγματικά δεδομένα από αιολικά πάρκα, σε μια ποικιλία εφαρμογών αιολικής ενέργειας.

Οι κατασκευαστές παρέχουν καμπύλες ισχύος σε μορφή πίνακα ή γραφικών. Ωστόσο, σε πολλά ζητήματα που αφορούν αιολικούς σταθμούς, είναι απαραίτητη μια γενική εξίσωση που να αποτυπώνει επαρκώς αυτήν την καμπύλη. Η πρόκληση της εξαγωγής μιας κατάλληλης συνάρτησης για τον χαρακτηρισμό του πραγματικού σχήματος της καμπύλης είναι κρίσιμη. Οι καμπύλες του κατασκευαστή, από την άλλη πλευρά, αναπτύσσονται σε τυπικές ρυθμίσεις και ενδέχεται να μην αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές συνθήκες. Λόγω της φθοράς και της γήρανσης των ανεμογεννητριών, η απόδοση της τουρμπίνας στα αιολικά πάρκα δεν είναι επίσης η βέλτιστη. Ένας άλλος τρόπος κατασκευής των καμπυλών ισχύος είναι η χρήση πραγματικών δεδομένων από τις μετρήσεις ταχύτητας ανέμου και ισχύος των ανεμογεννητριών. Τα δεδομένα που συλλέγονται από το σύστημα SCADA (εποπτικός έλεγχος και απόκτηση δεδομένων) από ανεμογεννήτριες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για αυτό. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να λάβει υπόψη τις πραγματικές συνθήκες στα αιολικά πάρκα, με πιο ακριβή αποτελέσματα.

5.1 Μοντελοποίηση ταχύτητας ανέμου

Η παραγόμενη αιολική ενέργεια συσχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με την κατανομή ταχύτητας ανέμου σε όλη την περιοχή όπου βρίσκεται το αιολικό πάρκο και εξαρτάται από τον τύπο της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιείται στο αιολικό πάρκο. Η ακρίβεια στην πρόβλεψη της αιολικής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί με μοντελοποίηση της ταχύτητας και της ισχύος του ανέμου ταυτόχρονα. Η ταχύτητα του ανέμου σε μια τοποθεσία ποικίλλει τυχαία και η διαφοροποίησή του σε μια συγκεκριμένη περιοχή σε μια χρονική περίοδο μπορεί αντιπροσωπεύονται από διαφορετικές συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας. Η επιλογή της κατάλληλης συνάρτησης προκειμένου να περιγραφεί η πραγματική κατανομή της ταχύτητας

ανέμου της τοποθεσίας είναι ζωτικής σημασίας για την ακρίβεια στην πρόβλεψη της ισχύος. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη και αποδεκτή διανομή είναι η κατανομή Weibull δύο παραμέτρων. Είναι μία ευέλικτη συνάρτηση, απλή στη χρήση και είναι ακριβής για τα περισσότερα τα αιολικά καθεστώτα που συναντώνται στη φύση. Ωστόσο, η κατανομή Weibull δεν είναι κατάλληλη για ορισμένα συστήματα ανέμου, για παράδειγμα, για εκείνα που έχουν υψηλές συχνότητες μηδενικών ανέμων και για σύντομους χρονικούς ορίζοντες.

Οι μέθοδοι μοντελοποίησης της καμπύλης ισχύος μπορούν να ταξινομηθούν σε διακριτές, ντετερμινιστικές/πιθανοτικές, παραμετρικές/μη παραμετρικές και στοχαστικές μεθόδους ή μπορούν να ταξινομηθούν σε σχέση με τη βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση.



Εικόνα 35: Μοντέλα καμπύλης ισχύος ανεμογεννητριών (Πηγή: A Critical Review on Wind Turbine Power Curve Modelling Techniques and Their Applications in Wind Based Energy Systems- Vaishali Sohoni, S. C. Gupta, and R. K. Nema)

5.1.1 Διακριτά Μοντέλα

Σε αυτή τη μέθοδο όπως περιγράφεται στο IEC 61400-12 όλες οι ταχύτητες ανέμου διακριτοποιούνται σε τμήματα ανά 0,5 m/s. Στη συνέχεια μοντελοποιείται η έξοδος ισχύος για κάθε τιμή. Αυτή είναι μια απλή μέθοδος καθώς δεν απαιτεί μαθηματικές συναρτήσεις για την περιγραφή της καμπύλης. Επίσης, λαμβάνει υπόψη τη μη γραμμική σχέση ανάμεσα στην ταχύτητα ανέμου και την ισχύ εξόδου. Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι απαιτείται μεγάλος αριθμός δεδομένων για την ανάπτυξη ενός αξιόπιστου μοντέλου.

5.1.2 Ντετερμινιστικά και Πιθανολογικά Μοντέλα

Ένα ντετερμινιστικό μοντέλο καμπύλης ισχύος υποθέτει μια σταθερή σχέση μεταξύ της ταχύτητας ανέμου και της ισχύος εξόδου. Παρόλαυτα, ακόμα και ανεμογεννήτριες του ίδιου τύπου σε ένα αιολικό πάρκο μπορεί να παράγουν διαφορετική ποσότητα ισχύος ακόμα και αν η ταχύτητα ανέμου είναι ίδια. Μια πιθανολογική καμπύλη ισχύος ενσωματώνει αυτές τις διακυμάνσεις ισχύος για να χαρακτηρίσει τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και της πραγματικής ισχύος εξόδου. Τα περισσότερα από τα μοντέλα που είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία είναι ντετερμινιστικής φύσης και κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας τα κατασκευαστικά δεδομένα καμπύλης ισχύος. Ένα πιθανολογικό μοντέλο που συχνά προτείνεται, χαρακτηρίζει τη δυναμική της ισχύος εξόδου με κανονική κατανομή με μεταβαλλόμενο μέσο και συνεχή σταθερή απόκλιση. Η μέθοδος αυτή εξυπηρετεί την αβεβαιότητα της ισχύος εξόδου. Η πιθανολογική φύση της αιολικής ενέργειας μπορεί επίσης να μοντελοποιηθεί με την παραγωγή καμπυλών χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα ισχύος εξόδου ανεμογεννητριών και ταχύτητας ανέμου που αναπτύχθηκαν σε υπάρχοντα αιολικά πάρκα. Η συγκεκριμένη μέθοδος απαιτεί μεγάλο αριθμό ιστορικών δεδομένων αλλά επιφέρει σχετικά ακριβή μοντέλα.

5.1.3 Παραμετρικά και μη Παραμετρικά Μοντέλα

Ένα παραμετρικό μοντέλο καθορίζει τη σχέση μεταξύ εισόδου και εξόδου από ένα σύνολο μαθηματικών εξισώσεων με πεπερασμένο αριθμό παραμέτρων οι οποίες συνήθως συλλέγονται μαζί για να σχηματίσουν ένα ενιαίο διάνυσμα παραμέτρου $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_n)$. Σε ένα μη παραμετρικό μοντέλο, καμία υπόθεση γίνεται για τη λειτουργική μορφή του φαινομένου υπό παρακολούθηση. Μη παραμετρικά μοντέλα χρησιμοποιούνται όταν είναι δύσκολο να οριστεί η υποκείμενη θεωρία βάσει της οποίας μπορεί να κατασκευαστεί το παραμετρικό μοντέλο.

5.1.4 Μοντέλα που βασίζονται σε υποτιθέμενο σχήμα, προσαρμογή καμπύλης και σε πραγματικά δεδομένα

Τα μοντέλα καμπυλών ισχύος μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση. Μοντέλα με καμπύλη ισχύος που βασίζεται μόνο στο υποτιθέμενο σχήμα της καμπύλης προβλέπουν μόνο τις ταχύτητες διακοπής, αποκοπής, ονομαστικές ταχύτητες και την ονομαστική ισχύ της επιλεγμένης ανεμογεννήτριας. Όταν τα δεδομένα της καμπύλης ισχύος είναι διαθέσιμα από τον κατασκευαστή, μπορούν να αναπτυχθούν μοντέλα εφαρμόζοντας μία ή περισσότερες κατάλληλες εξισώσεις στην πραγματική καμπύλη. Οι παράμετροι της εξίσωσης που προσαρμόζεται στην πραγματική καμπύλη υπολογίζονται γενικά χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Τα μοντέλα που προέρχονται από τα πραγματικά δεδομένα του αιολικού πάρκου χρειάζονται την πραγματική ταχύτητα και παραγόμενη ισχύ ενός πάρκου σε λειτουργία. Εάν στο μοντέλο περιλαμβάνονται οι επιδράσεις και άλλων παραμέτρων που επηρεάζουν, τότε απαιτούνται και τα δεδομένα των παραμέτρων αυτών από το σύστημα SCADA του αιολικού πάρκου.

5.1.5 Στοχαστικά Μοντέλα

Η στοχαστική μέθοδος χαρακτηρίζει την απόδοση ισχύος της ανεμογεννήτριας αξιολογώντας τη δυναμική απόκριση έναντι του κυμαινόμενου ανέμου. Η ισχύς εξόδου διαχωρίζεται σε ένα ντετερμινιστικό στοχαστικό μέρος σε αυτό το μοντέλο και συχνά χρησιμοποιείται η θεωρία της αλυσίδας Markov να περιγραφεί η ισχύς εξόδου της τουρμπίνας. Τέλος, η επίδραση άλλων παραμέτρων που επηρεάζουν δεν λαμβάνεται υπόψη σε αυτή τη μέθοδο.

5.2 Μοντελοποίηση Καμπύλης Ισχύος

Διάφορες προσεγγίσεις έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία για τη μοντελοποίηση της καμπύλης ισχύος μίας ανεμογεννήτριας. Στη συγκεκριμένη εργασία πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση της καμπύλης ισχύος μέσω πολυωνυμικών συναρτήσεων.

5.2.1 Παραμετρικά Μοντέλα

Η σχέση μεταξύ ισχύος εξόδου και ταχύτητας ανέμου μίας ανεμογεννήτριας μεταξύ της ταχύτητας αποκοπής και της ονομαστικής ταχύτητας είναι μη γραμμική (περιοχή 2 της Εικόνας 34). Η εξίσωση $q(V)$ μπορεί να προσεγγιστεί κατά διάφορες συναρτήσεις που χρησιμοποιούν πολυωνυμικές και μη εκφράσεις. Οι εξισώσεις για διαφορετικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης καμπύλης ισχύος δίνονται στην Εικόνα 36.

5.2.2 Προσέγγιση Πολυωνυμικής Συνάρτησης

Η σχέση ταχύτητας ανέμου-ισχύος $q(V)$, μπορεί να προσεγγιστεί με διάφορες πολυωνυμικές εκφράσεις. Στη βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται διαφορετικά μοντέλα που χρησιμοποιούν γραμμικές, τετραγωνικές, κυβικές και υψηλότερες δυνάμεις ταχύτητας ή συνδυασμούς αυτών.

(i) Το πιο απλοποιημένο μοντέλο που βασίζεται σε γραμμική καμπύλη, που περιγράφει την περιοχή 2 της καμπύλης ισχύος με μια ευθεία γραμμή, χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές.

(ii) Ένα τετραγωνικό μοντέλο αντιπροσωπεύει το μη γραμμικό τμήμα της καμπύλης με εξίσωση βαθμού 2. Η $q(V)$ προσεγγίζεται με μια τετραγωνική εξίσωση ώστε περιγράψει τη σχέση μεταξύ ισχύος εξόδου και ταχύτητας ανέμου.

(iii) Μια διωνυμική έκφραση έχει υιοθετηθεί από πολλούς ερευνητές για τον προσδιορισμό της ισχύος εξόδου των ανεμογεννητριών. Περιοχές 2 και 3 του Σχήματος 1 για ένα ρυθμιζόμενο WT μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικές διωνυμικές εκφράσεις.

(iv) Το μοντέλο που βασίζεται στον κυβικό νόμο προσεγγίζει την περιοχή 2 του καμπύλη ισχύος με κυβικό νόμο.

Τα μοντέλα που δίνονται παραπάνω χρησιμοποιούν τις προδιαγραφές WT του μόνο ονομαστική ισχύς και διακοπή, διακοπή και ονομαστική ταχύτητα ανέμου για τον προσδιορισμό των εξισώσεων για την καμπύλη ισχύος.

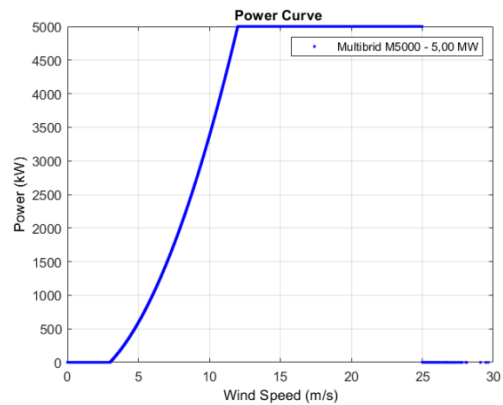
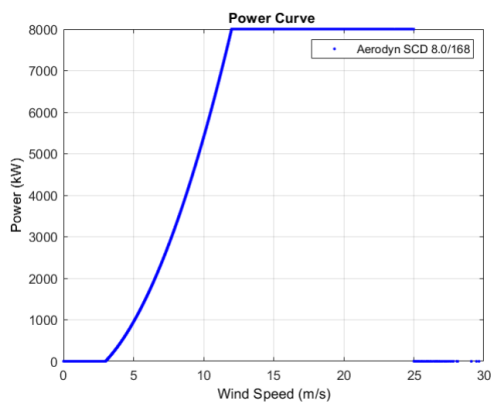
(v) Μια μεθοδολογία που βασίζεται στην παράμετρο του Weibull είναι προτείνεται. Αυτό το μοντέλο βασίζεται στο σχήμα Weibull η παράμετρος χρησιμοποιείται από πολλούς ερευνητές για υπολογισμούς της ισχύος εξόδου του WT.

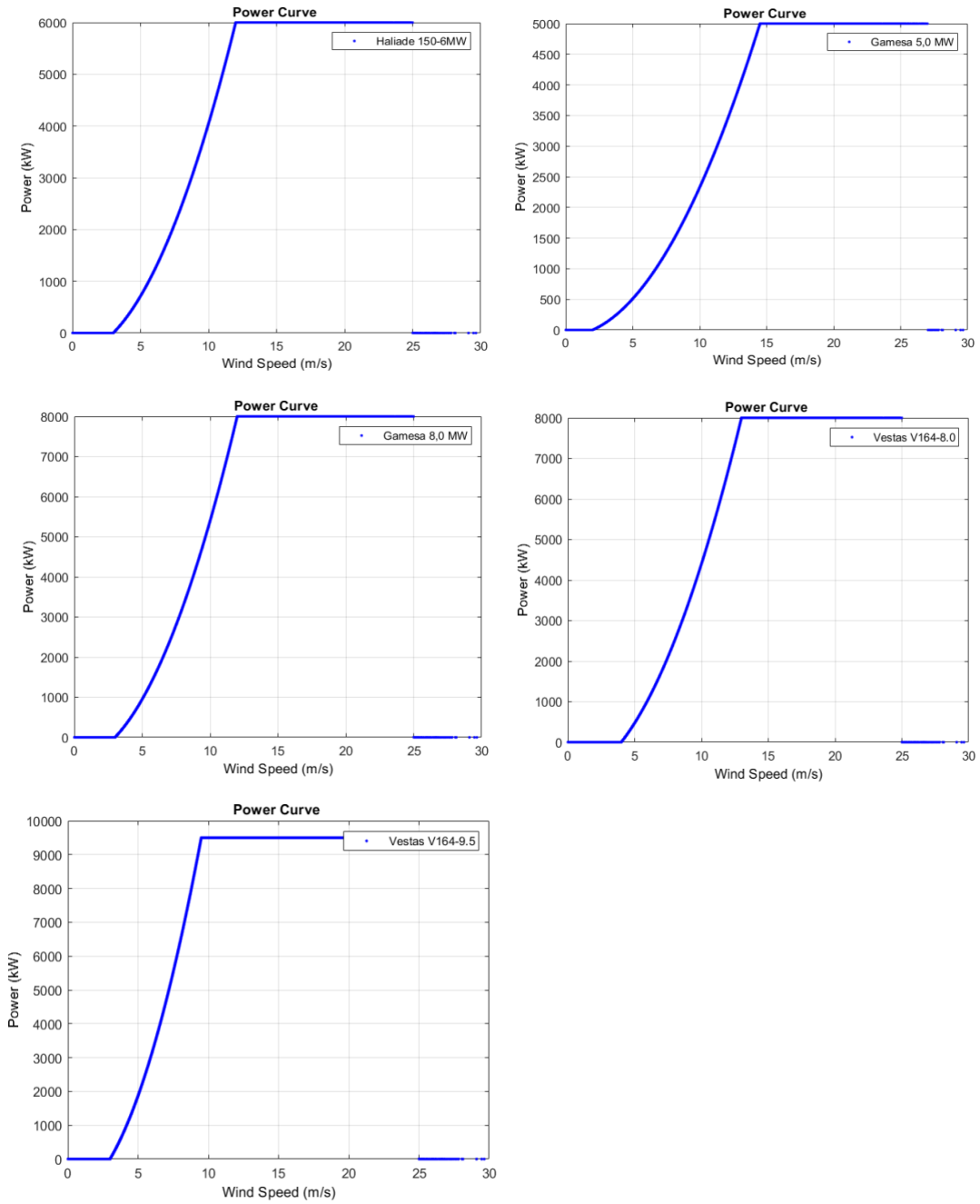
TABLE 1: Expressions of parametric models.

Model	Expressions of P and q	Parameters
Linear [12]	$q(v) = P_r \frac{(v - v_c)}{(v_r - v_c)}$	—
Quadratic [25]	$q(v) = P_r \left(\frac{v - v_c}{v_r - v_c} \right)^2$	—
Binomial [30]	$q(v) = (a + bv + cv^2) P_r$	$a = \frac{1}{(v_c - v_r)^2} \left[v_c(v_c + v_r) - 4v_c v_r \frac{(v_c - v_r)^2}{2v_r} \right]$ $b = \frac{1}{(v_c - v_r)^2} \left[4(v_c + v_r) \frac{(v_c - v_r)^3}{2v_r} - 3(v_c + v_r) \right]$ $c = \frac{1}{(v_c - v_r)^2} \left[2 - 4 \frac{(v_c + v_r)^3}{2v_r} \right]$
Cubic [31]	$q(v) = av^3 - bP_r$	$a = \frac{P_r}{(v_r^3 - v_c^3)}$ $b = \frac{v_r^3}{(v_r^3 - v_c^3)}$
Weibull based [6]	$q(v) = a + bv^k$	$a = \frac{P_r v_c^k}{(v_c^k - v_r^k)}$ $b = \frac{P_r}{(v_c^k - v_r^k)}$

Εικόνα 36: Παρουσίαση των εξισώσεων των παραμετρικών μοντέλων (Πηγή: A Critical Review on Wind Turbine Power Curve Modelling Techniques and Their Applications in Wind Based Energy Systems- Vaishali Sohoni, S. C. Gupta, and R. K. Nema).

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση της καμπύλης ισχύος των διάφορων μοντέλων ανεμογεννήτριας με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab. Στην Εικόνα 37 παρουσιάζεται η καμπύλη ισχύος για τα διάφορα μοντέλα ανεμογεννήτριας που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 4 υπολογισμένη με τη χρήση του μοντέλου Weibull.





Εικόνα 37: Σύγκριση των καμπυλών ισχύος που προέκυψαν από την παραμετρική μέθοδο Weibull για όλα τα μοντέλα ανεμογεννήτριας.

6. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

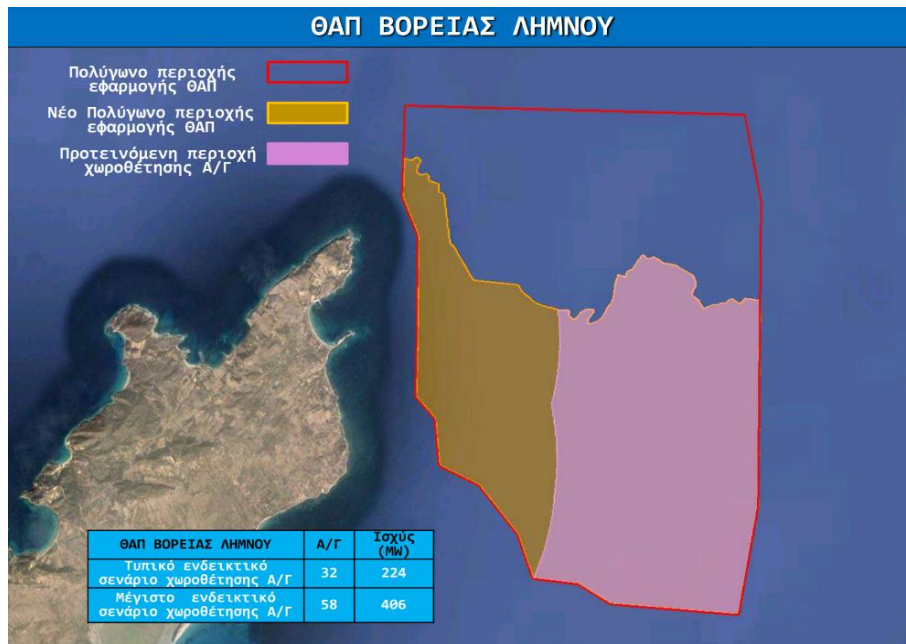
6.1 Επιλογή Βόρειας Λήμνου για Εγκατάσταση Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου

Η ισχύς που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες και οι επιρροή στο ηλεκτρικό σύστημα επηρεάζονται από τη θέση ενός αιολικού πάρκου. Ως αποτέλεσμα, η αξιολόγηση πιθανών τοποθεσιών αιολικών πάρκων είναι κρίσιμη για τις μελέτες της αιολικής ενέργειας. Οι μελέτες και οι έρευνες που χρειάζονται προκειμένου να βρεθεί και να επιλεγεί μία περιοχή χωροθέτησης είναι ενδελεχής και συνήθως μακροχρόνιες, καθώς αποτελούνται από πολλά στάδια και απαιτούν την συνεργασία πολλών φορέων. Αυτό το μέρος της εργασίας παρουσιάζει τα κριτήρια της επιλογής της περιοχής βορειοανατολικά της Λήμνου για την κατασκευή αιολικού πάρκου με βάση τα μοντέλα για την ταχύτητα ανέμου και την παραγωγή ισχύος της ανεμογεννήτριας. Τα κριτήρια αυτά είναι τα παρακάτω:

- η ικανοποιητική ταχύτητα ανέμου
- το βάθος (έως 45m)
- η απόσταση από την ακτή (μέχρι 12km)
- η οπτική όχληση από την ακτή
- η περιοχή δεν είναι προστατευόμενη
- δεν υπάρχουν λιβάδια ποσειδωνίας
- δεν αποτελεί δρόμο διέλευσης αποδημητικών πουλιών

Η θαλάσσια περιοχή βορειοανατολικά της Λήμνου αποτελεί εδώ και αρκετά χρόνια κορυφαία υποψήφια για την χωροθέτηση του πρώτου ελληνικού υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Συγκεκριμένα, το ισχυρό αιολικό δυναμικό του Αιγαίου ακόμα και τους θερινούς μήνες όπου συνήθως μειώνεται, στην περιοχή του Αιγαίου λόγω της ιδιομορφίας της περιοχής είναι ακόμη και τότε σταθερό. Το πάρκο θα κατασκευαστεί σε απόσταση τέτοια όπου η οπτική όχληση θα είναι ανεπαίσθητη - από 2km έως 12km από το πλησιέστερο σημείο της στεριάς - ενώ παράλληλα δεν θα παρεμποδίζονται δραστηριότητες στην περιοχή όπως η ναυτιλία, η αλιεία και το εμπόριο. Τέλος, το πάρκο θα αποτελείται από συστοιχίες ανεμογεννητριών εγκατεστημένες σε βάθη που θα κυμαίνονται από τα 20m έως τα 45m.

Σε αυτή τη μελέτη, επιλέχθηκε μια υπεράκτια τοποθεσία στην βορειοανατολική πλευρά της Λήμνου με βάση τα δεδομένα ανέμου QuikSCAT που είναι διαθέσιμα. Η θέση της επιλεγμένης περιοχής απεικονίζεται στην Εικόνα 38.



Εικόνα 38: Απεικόνιση της ακριβούς θέσης χωροθέτησης, καθώς και του μεγέθους ενός Υπεράκτιου αιολικού πάρκου, στην περιοχή βόρεια της Λήμνου. (Πηγή: ΚΑΠΕ)

6.2 Επεξεργασία Δεδομένων

Λόγω των αυξημένων δυνατοτήτων του θαλάσσιου Ελλαδικού χώρου έχουν διεξαχθεί μακροχρόνιες έρευνες και μελέτες σχετικά με τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες που επικρατούν σε αυτόν. Τα δεδομένα από το European Centre for Medium Weather Forecasting (ECMWF) αποτελούν αποτελέσματα προσομοιώσεων (reanalysis) σε έναν κάναβο 0.25 x 0.25 μοίρες και στα 100 m από την επιφάνεια της θάλασσας. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζουν την εικοσαετία σε μορφή χρονοσειράς με χρονικό βήμα μίας ώρας, δίνονται σε μορφή συνιστωσών u και v απ' όπου στη συνέχεια προκύπτει η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου. Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων αποτελεί μία σπουδαία πηγή πληροφορίας, καθώς πρόκειται για μακροχρόνια και μεθοδική καταγραφή, η οποία οδηγεί σε σχετικά ασφαλή συμπεράσματα.

Στην παρούσα εργασία οι τιμές ανέμου που δόθηκαν ως αρχικό δεδομένο αφορούσαν τα 100m ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι τιμές της ταχύτητας χρειάστηκε να αναχθούν σε διάφορα ύψη, καθώς τα ύψη πτερωτής των εξεταζόμενων μοντέλων ανεμογεννήτριας διέφεραν. Εύκολα οι ταχύτητες μπορούν να αναχθούν σε διάφορα ύψη με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$v_2 = v_1 * \frac{\ln(h_2/0.0002)}{\ln(h_1/0.0002)} \quad (1.)$$

όπου v_2 είναι η ταχύτητα του ανέμου στο επιλεγμένο ύψος h_2 , v_1 η ταχύτητα του ανέμου στα 100 m (h_1) και 0.0002 ο συντελεστής τραχύτητας της επιφάνειας πάνω από την οποία πνέει ο άνεμος.

Ο αρχικός πίνακας για τα 100m περιείχε επομένως 175320 μετρήσεις για το σημείο για την εικοσαετία 2000-2019.

Έτος	Μήνας	Ημέρα	Ώρα	Ταχύτητα Ανέμου
2000	1	1	0	10.0020
2000	1	1	1	11.4270
2000	1	1	2	12.5200
:	:	:	:	:
:	:	:	:	:
2019	12	31	23	1.2300

Η υπόσχεση ισχυρού ανέμου είναι το πρώτο σημαντικό κριτήριο για τους επενδυτές όταν αποφασίζουν πού να κατασκευάσουν μια αιολική μονάδα παραγωγής ενέργειας. Η μέση ταχύτητα ανέμου, η θεωρητική πυκνότητα αιολικής ισχύος και ο συντελεστής χωρητικότητας μιας προβλεπόμενης ανεμογεννήτριας είναι οι κύριες μετρήσεις που αποτυπώνουν το δυναμικό αιολικής ενέργειας μιας τοποθεσίας.

Η ποσότητα της αιολικής ενέργειας που είναι διαθέσιμη για παραγωγή ενέργειας σε κάθε περιοχή, η οποία ονομάζεται πυκνότητα ισχύος ανέμου (Wind Power Density) υπολογίζεται από τον τύπο:

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

όπου ρ είναι η πυκνότητα του αέρα με τυπική τιμή $1,225 \text{ kg/m}^3$, v η ταχύτητα του ανέμου και A το εμβαδό της επιφάνειας που θεωρείται ίσο με 1 m^2 . Αυτός ο τύπος δίνει το δυναμικό του ανέμου σε μία περιοχή και δεν πρέπει να συγχέεται με τον τύπο που δίνει το δυναμικό από έναν μετατροπέα:

$$P = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \theta) A V^3 \quad (3.)$$

όπου C_p ο συντελεστής ισχύος και λ, θ άλλες παράμετροι ελέγχου.

Αρχικά, εισήχθη στο κώδικα που κατασκευάστηκε το .txt file για την περιοχή έρευνας, το οποίο διαθέτει 5 στήλες (έτος, μήνας, μέρα, ώρα, ταχύτητα) και στη συνέχεια μετατράπηκε σε κελί. Έπειτα, η στήλη που περιέχει τις ταχύτητες μετατράπηκε σε ξεχωριστό πίνακα. Χρησιμοποιώντας τον θεωρητικό τύπο για τον υπολογισμό της ισχύος, βρέθηκε μέσω του προγράμματος Matlab για κάθε ταχύτητα του πίνακα, η αντίστοιχη πυκνότητα αιολικού δυναμικού. Έτσι, υπολογίσθηκαν με βάση τα δεδομένα ταχύτητας της περιοχής η μέση μηνιαία, εποχιακή και ετήσια πυκνότητα αιολικού δυναμικού. Με αυτή την αναλυτική επεξεργασία των δεδομένων γίνονται αντιληπτές οι μεταβολές της διαθέσιμης ισχύος ανά μήνα, εποχή και έτος και μπορεί να εξετασθεί σε τι βαθμό η συγκεκριμένη περιοχή καλύπτει τις μηνιαίες/εποχιακές/ετήσιες ανάγκες του δικτύου.

Αρχικά για τον κόμβο του πλέγματος που καλύπτει την περιοχή μελέτης υπολογίζεται η μέση ετήσια τιμή \bar{P} της ισχύος του ανέμου p_i για κάθε έτος k της περιόδου μελέτης, για $k = 1, 2, \dots, k$ για $k=20$, δηλαδή τα έτη της περιόδου μελέτης 2000-2019.

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \bar{P}_i \quad (4.)$$

όπου T ο αριθμός μηνών που αντιστοιχούν στο κάθε έτος k .

Πίνακας 3: Μέση διαθέσιμη ισχύς στην περιοχή της Λήμνο ανά έτος

Έτος	P(kW)
2000	608
2001	918
2002	552
2003	828
2004	754
2005	748
2006	787
2007	635
2008	710
2009	660
2010	750
2011	774
2012	780
2013	682
2014	567
2015	788
2016	759
2017	673
2018	781
2019	780

Έπειτα υπολογίζεται η μέση τιμή της ισχύος του ανέμου για κάθε μήνα m κάθε έτους k :

$$\bar{P}_{M=m, Y=k} = \frac{1}{Z} \sum_{i=1}^Z \bar{P}_i \quad (5.)$$

όπου Z ο αριθμός των ωρών που αντιστοιχούν στον μήνα m του έτους k .

Πίνακας 4: Μηνιαίος μέσος όρος διαθέσιμης ισχύος στην περιοχή της Λήμνου

Μήνας	P(kW)
Ιανουάριος	1040
Φεβρουάριος	1097
Μάρτιος	890
Απρίλιος	592
Μάιος	430
Ιούνιος	381
Ιούλιος	465
Αύγουστος	638
Σεπτέμβριος	568
Οκτώβριος	763
Νοέμβριος	814
Δεκέμβριος	1059

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η μέση τιμή της ισχύος του ανέμου για κάθε εποχή s ενός συγκεκριμένου έτους k :

$$\bar{P}_{S=s,Y=k} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \bar{P}_i \quad (6.)$$

όπου L ο αριθμός των ωρών που αντιστοιχούν στην εποχή s του έτους k .

Οι μέσες τιμές ισχύος για κάθε μήνα και κάθε εποχή παρουσιάζουν μια πιο λεπτομερή απεικόνιση της διαθέσιμης αιολικής ισχύος και την έντονη εποχιακή μεταβλητότητα.

Τέλος υπολογίζεται η μέση ετήσια ισχύς. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκε η μέση ετήσια ισχύς ανά έτος που υπολογίστηκε παραπάνω. Έτσι, προκύπτει:

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{P}_i \quad (7.)$$

όπου N ο αριθμός των ετών (20) που αντιστοιχούν στο σύνολο της χρονοσειράς.

Πίνακας 5: Μέσος όρος ετήσιας διαθέσιμης ισχύος στην περιοχή της Λήμνου

Μέση ετήσια ισχύς	P(kW)
2000-2019	727

Παρατηρείται ότι η πυκνότητα αιολικού δυναμικού ανά τα έτη είναι αρκετά υψηλή και συνεπώς ικανοποιητική, με διαβαθμίσεις που κυμαίνονται από 550(kW) έως 920(kW). Οι μήνες που παρουσιάζουν μεγαλύτερη διαθέσιμη ισχύ είναι όπως αναμενόταν οι χειμερινοί. Η πυκνότητα αιολικού δυναμικού παρουσιάζει σταδιακή μείωση έως τους καλοκαιρινούς μήνες όπου λαμβάνει τις χαμηλότερες τιμές της και στη συνέχεια την εποχή του φθινοπώρου αυξάνεται πάλι σταδιακά. Αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμα και οι χαμηλότερες τιμές διαθέσιμης ισχύος κατά την διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών θεωρούνται αρκετά αποδοτικές.

6.3 Δείκτες Mean Annual Variability (MAV) - Inter-annual Variability (IAV)

Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται και υπολογίζονται ο δείκτης μέσης ετήσιας μεταβλητότητας (Mean Annual Variability -MAV) και ο δείκτης υπερετήσιας μεταβλητότητας (Inter-annual Variability -IAV). Ο δείκτης MAV αντικατοπτρίζει την μεταβλητότητα της παρεχόμενης ισχύος μέσα στο έτος λόγω της εποχικότητας. Επομένως, αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο καθώς η διακυμάνσεις της ταχύτητας ανέμου ανά εποχή είναι μεγάλες.

$$MAV = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_{u(i)}}{\bar{u}(i)} \quad (8.)$$

Όπου:

N: σύνολο ετών

σ : τυπική απόκλιση ταχύτητας ανέμου ανά έτος

\bar{u} : μέση ταχύτητα ανέμου ανά έτος

Σε μακροχρόνια δεδομένα ανέμου όπως σε αυτή την έρευνα (20 έτη) μεγάλη σημασία αποκτά και ο δείκτης IAV, ο οποίος παρουσιάζει την μεταβλητότητα της ταχύτητας ανέμου στην περιοχή ανά τα χρόνια.

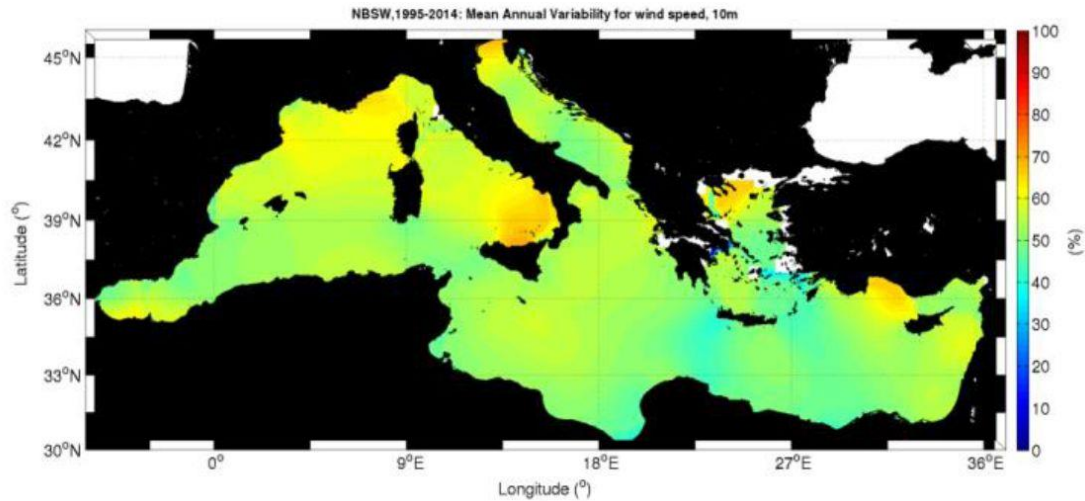
$$IAV = \frac{\sigma_{\bar{u}_m(i)}}{\bar{u}_{tot}} \quad (9.)$$

Όπου:

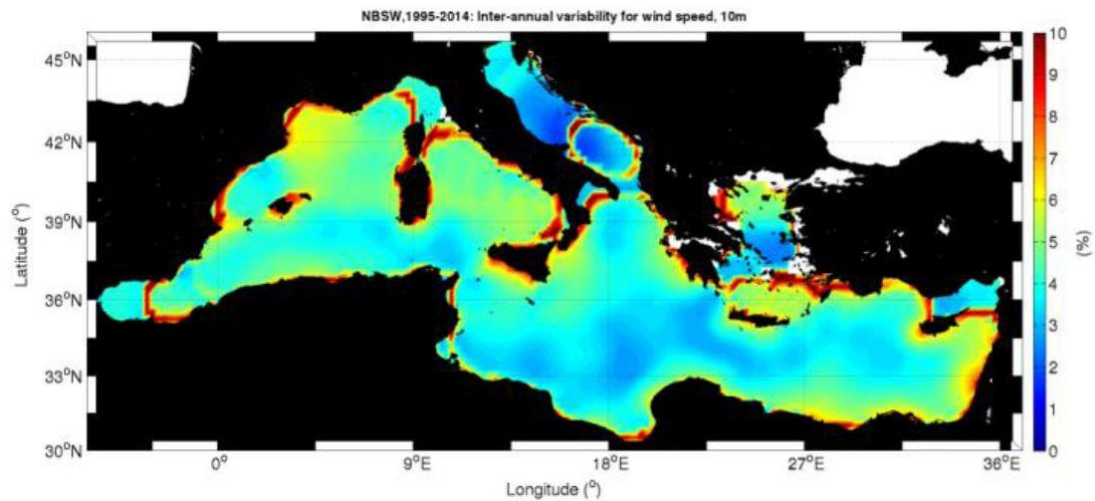
σ : τυπική απόκλιση ταχύτητας των μέσων ταχυτήτων ανά έτος της ταχύτητας ανέμου

\bar{u} : μέση ταχύτητα ανέμου για το σύνολο των ετών

Σύμφωνα με μελέτες υπολογίζεται πως για τον θαλάσσιο ελλαδικό χώρο οι τιμές του δείκτη MAV κυμαίνονται μεταξύ 50%-70%, ενώ του δείκτη IAV μεταξύ 4%-7%.



Εικόνα 39: Παρουσίαση τυπικών τιμών της μέσης ετήσιας μεταβλητότητας της ταχύτητας του ανέμου (MAV), στη λεκάνη της Μεσογείου. (Πηγή: Satellite Based Offshore Wind Resource Assessment in the Mediterranean Sea.)



Εικόνα 40: Παρουσίαση τυπικών τιμών της διαχρονικής μεταβλητότητας της ταχύτητας του ανέμου (IAV), στη λεκάνη της Μεσογείου. (Πηγή: Satellite Based Offshore Wind Resource Assessment in the Mediterranean Sea.)

Πίνακας 6: Παρουσίαση των δεικτών (MAV) και (IAV), ως κριτήρια αξιολόγησης της εκάστοτε περιοχής χωροθέτησης.

Mean Annual Variability (MAV)	MAV%	Inter-annual Variability (IAV)	IAV%
0.5396	53.9	0.0434	4.3

Ουσιαστικά οι δείκτες αναπαριστούν τις διακυμάνσεις των τιμών της ταχύτητας του ανέμου ανά εποχή (MAV), αλλά και ανά έτος (IAV). Οι δείκτες αυτοί υπολογισμένοι για την περιοχή της Λήμνου υποδεικνύουν χαμηλές τιμές μεταβλητότητας, γεγονός που είναι και το επιθυμητό, καθώς μία ιδανική περιοχή χωροθέτησης θα είχε σταθερές και υψηλές τιμές ταχύτητας ανέμου, χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις ανά εποχή αλλά και ανά τα έτη.

6.4 Υπολογισμοί με μετατροπέα

Προκειμένου να γίνουν υπολογισμοί για το εκάστοτε μοντέλο ανεμογεννήτριας, οι δοθείσες τιμές ταχύτητας έπρεπε να αναχθούν από τα 100m στο ύψος της κάθε ανεμογεννήτριας (Hub Height). Αρχικά, μέσω των καμπυλών ισχύος για κάθε μοντέλο βρέθηκε με τη μέθοδο γραμμικής παρεμβολής η ισχύς ανά μέτρο ταχύτητας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 7 :

Πίνακας 7: Παρουσίαση των χαρακτηριστικώς τιμών ισχύος ανά μέτρο ταχύτητας για κάθε μοντέλο ανεμογεννήτριας.

	Aerodyn SCD 8.0/168	Multibrid M5000	Haliade 150-6MW	Gamesa G128- 5.0MW	Gamesa G128- 8.0MW	Vestas V164-8.0	Vestas V164-9.5
V(m/s)	P(Kw)	P(Kw)	P(Kw)	P(Kw)	P(Kw)	P(Kw)	P(Kw)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	25	0	0	0
3	0	0	130	59	48	72	100
4	100	100	265	195	169	313	249
5	500	330	520	420	593	710	613
6	1000	560	1000	786	1307	1297	1226
7	2000	1000	1400	1296	2186	2111	2030
8	3000	1470	2100	1943	3278	3135	3123
9	4000	1980	2700	2699	4687	4277	4444
10	5000	2800	3400	3487	6112	5469	5900
11	6000	4000	4200	4174	7249	6548	7299

12	7500	4800	5100	4639	8000	7290	8601
13	8000	5000	6000	4875	8000	7733	9272
14	8000	5000	6000	4965	8000	7947	9500
15	8000	5000	6000	5000	8000	8000	9500
16	8000	5000	6000	5000	8000	8000	9500
17	8000	5000	6000	5000	8000	8000	9500
18	8000	5000	6000	5000	8000	8000	9500
19	8000	5000	6000	5000	8000	8000	9500
20	8000	5000	6000	5000	8000	8000	9500
21	8000	5000	6000	5000	8000	8000	9500
22	8000	5000	6000	5000	8000	8000	9500
23	8000	5000	6000	5000	8000	8000	9500
24	8000	5000	6000	5000	8000	8000	9500
25	0	5000	6000	5000	8000	8000	9500
26	0	0	0	5000	0	0	0
27	0	0	0	5000	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0

Στη συνέχεια, υπολογίζονται ο συντελεστής ισχύος C_p (power coefficient), ο συντελεστής ώσης C_t (thrust coefficient) και ο συντελεστής αξονικής επαγωγικής ροής που αποτελούν καθοριστικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών και χρειάζονται για τους παρακάτω υπολογισμούς.

Όπως αναφέρθηκε η παραγόμενη ισχύς από μία ανεμογεννήτρια υπολογίζεται από την εξίσωση (3). Έτσι, γνωρίζοντας την ισχύ για κάθε ταχύτητα αλλά και το εμβαδόν (swept area) που δηλώνεται από τον εκάστοτε κατασκευαστή υπολογίζεται ο συντελεστής C_p :

$$C_p = \frac{P(W)}{\frac{1}{2} \cdot A(m^2) \cdot \rho(kg/m^3) \cdot V^3(m^3)} \quad (10.)$$

Στην παραπάνω σχέση ο παρονομαστής αντιπροσωπεύει την ισχύ που διατίθεται στο αέρα, με την απουσία του δίσκου ενεργοποίησης (actuator disc). Επομένως προκύπτει ο παρακάτω τύπος:

$$C_p = 4\alpha (1 - \alpha)^2 \quad (11.)$$

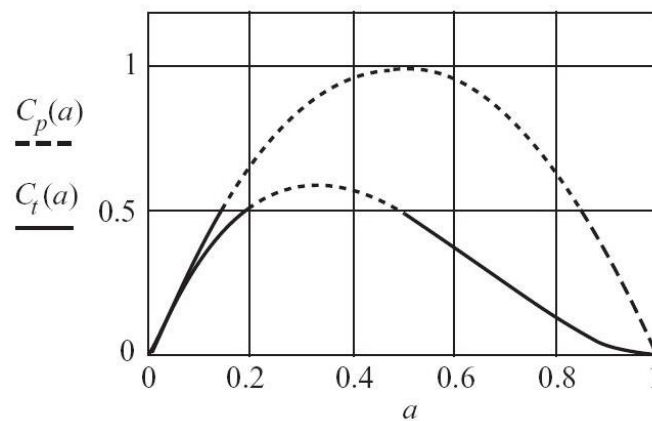
$$\Rightarrow 4a^3 - 8a^2 + 4a - C_p = 0 \quad (12.)$$

Η δύναμη στο δίσκο ενεργοποίησης, που προκαλείται από την πτώση της πίεσης, μπορεί επίσης να είναι αδιάστατη και να δώσει έναν *συντελεστή ώσης* (*thrust coefficient* C_T), που δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$C_T = \frac{\text{Thrust}}{\frac{1}{2} \rho A U^2} \quad (13.)$$

$$C_T = 4\alpha (1 - \alpha) \quad (14.)$$

Στην **Error! Reference source not found.** παρουσιάζεται η μεταβολή των συντελεστών C_p , C_t , σε σχέση με τον παράγοντα αξονικής επαγωγικής ροής α . Ο παράγοντας α , παρουσιάζει έναν περιορισμό στο εύρος τιμών του, δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερος από 0,5 ($\alpha < 0,5$), γιατί σε αυτές τις τιμές η ταχύτητα γίνεται μηδενική ή αρνητική.



Εικόνα 41: Γραμμική απεικόνιση της μεταβολής των συντελεστών C_p , C_t , σε σχέση με τον παράγοντα επαγωγής α . (Πηγή: Wind Energy Handbook)

Με τη βοήθεια των παραπάνω τύπων γίνεται αντιληπτό, ότι υπολογίστηκε ο παράγοντας από τη σχέση (12.), με δεδομένες τις τιμές του συντελεστή C_p και στη συνέχεια με δεδομένες τις τιμές του παράγοντα α , υπολογίστηκε ο συντελεστής C_t από τη σχέση (14.), για όλα τα διαθέσιμα μοντέλα ανεμογεννητριών. Όλη αυτή η υπολογιστική διαδικασία επιλύθηκε με τη βοήθεια του προγράμματος Wolfram Mathematica 9.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πίνακες με τον συντελεστή ισχύος (power coefficient), τον *συντελεστή ώσης* (*thrust coefficient* C_T) και τον συντελεστή αξονικής επαγωγικής ροής για κάθε μοντέλο ανεμογεννήτριας.

Πίνακας 8: Παρουσίαση του συντελεστή ισχύος (power coefficient C_p), του συντελεστή ώσης (thrust coefficient C_t) και του συντελεστή αξονικής επαγωγικής ροής για το μοντέλο Aerodyn SCD 8.0/168.

Aerodyn SCD	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	Hub Height(m)	Rotor Diameter(m)
8.0/168	22168	1.2	110	168
U(m/s)	P(W)	C_p	C_t	a
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	200000	0.234948271	0.251970477	0.0675565
5	650000	0.390953928	0.448735329	0.128764
6	1250000	0.435089396	0.512382696	0.150852
7	1900000	0.416468077	0.484915322	0.141153
8	2700000	0.396475212	0.461644983	0.1331366
9	3500000	0.360963054	0.408003943	0.1152936
10	4500000	0.338325514	0.378343444	0.105774
11	5600000	0.316324047	0.350295327	0.0969787
12	6800000	0.295860789	0.324819628	0.0891532
13	8000000	0.273767675	0.29791253	0.0810467
14	8000000	0.219193725	0.233763078	0.0623252
15	8000000	0.178212617	0.187452801	0.049293
16	8000000	0.146842671	0.152932316	0.0398186
17	8000000	0.122423688	0.126563588	0.0327109
18	8000000	0.103132301	0.106021051	0.0272477
19	8000000	0.087690273	0.08975158	0.0229653
20	8000000	0.075183448	0.076682721	0.019553
21	8000000	0.064946289	0.066055578	0.016796
22	8000000	0.056486437	0.057319791	0.0145414
23	8000000	0.049434337	0.050069073	0.012678
24	8000000	0.043508940	0.043998289	0.0111233
25	0	0	0	0
26	0	0	0	0
27	0	0	0	0
28	0	0	0	0
29	0	0	0	0
30	0	0	0	0

Πίνακας 9: Παρουσίαση του συντελεστή ισχύος (power coefficient C_p), του συντελεστή ώσης (thrust coefficient C_t) και του συντελεστή αξονικής επαγωγικής ροής για το μοντέλο Multibrid M5000.

Multibrid M5000	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	Hub Height(m)	Rotor Diameter(m)
	10569	1.2	100	116
U(m/s)	P(W)	C_p	C_t	a
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	10000	0.024639669	0.024794335	0.00623749
5	330000	0,416311855	0.484688506	0.141074
6	560000	0.408835997	0.473928305	0.137346
7	1000000	0.459748935	0.550432432	0.164751
8	1470000	0.452753927	0.539423319	0.160671
9	1980000	0.428304378	0.502261284	0.147247
10	2800000	0.441542877	0.522143022	0.154364
11	4000000	0.473910998	0.573324534	0.173398
12	4800000	0.438038568	0.516827649	0.152447
13	5000000	0.35888458	0.40524439	0.114398
14	5000000	0.287343084	0.314375593	0.0859878
15	5000000	0.23362057	0.250426723	0.0671105
16	5000000	0.192497418	0.203431255	0.0537465
17	5000000	0.160486347	0.167853212	0.0438896
18	5000000	0.135197089	0.14030424	0.0364011
19	5000000	0.114953991	0.118580205	0.0305802
20	5000000	0.098558678	0.101186787	0.0259712
21	5000000	0.085138692	0.087077461	0.0222651
22	5000000	0.074048593	0.075501597	0.0192458
23	5000000	0.064803931	0.065908291	0.0167579
24	5000000	0.057036272	0.057886333	0.0146873
25	5000000	0.050462043	0.051124125	0.0129487
26	0	0	0	0
27	0	0	0	0
28	0	0	0	0
29	0	0	0	0
30	0	0	0	0

Πίνακας 10: Παρουσίαση του συντελεστή ισχύος (power coefficient C_p), του συντελεστή ώσης (thrust coefficient C_t) και του συντελεστή αξονικής επαγωγικής ροής για το μοντέλο Gamesa G128-5.0MW.

Gamesa G128- 5.0MW	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	Hub Height(m)	Rotor Diameter(m)
	12868	1.2	100	116
U(m/s)	P(W)	C_p	C_t	a
1	0	0	0	0
2	25000	0.404750803	0.468106924	0.135345
3	59000	0.283025747	0.309115869	0.0844028
4	195000	0.394632033	0.453858308	0.130493
5	420000	0.435188063	0.512530724	0.150905
6	786000	0.471309824	0.569055017	0.171768
7	1296000	0.489382662	0.599389488	0.183531
8	1943000	0.491519256	0.6030874	0.184995
9	2699000	0.479526987	0.582647823	0.176986
10	3487000	0.451637136	0.537681596	0.16003
11	4174000	0.406173969	0.470129562	0.136039
12	4639000	0.347710921	0.390535615	0.109659
13	4875000	0.28739702	0.314441502	0.0860077
14	4965000	0.234354255	0.251279792	0.0673569
15	5000000	0.191881862	0.202739233	0.0535527
16	5000000	0.158105782	0.165239657	0.0431739
17	5000000	0.131813817	0.136653889	0.0354179
18	5000000	0.111042744	0.114414734	0.0294723
19	5000000	0.094416283	0.096819292	0.0248209
20	5000000	0.080950161	0.082696549	0.0211202
21	5000000	0.069927792	0.07121909	0.0181336
22	5000000	0.060819054	0.061788856	0.0156935
23	5000000	0.053226045	0.053964038	0.0136781
24	5000000	0.046846158	0.047415021	0.0119977
25	5000000	0.041446482	0.041889873	0.0105845
26	5000000	0.036845772	0.037194909	0.00938684
27	5000000	0.032901554	0.033179084	0.00836474
28	0	0	0	0
29	0	0	0	0
30	0	0	0	0

Πίνακας 11: Παρουσίαση του συντελεστή ισχύος (power coefficient C_p), του συντελεστή ώσης (thrust coefficient C_T) και του συντελεστή αξονικής επαγωγικής ροής για το μοντέλο Gamesa G128-8.0MW.

Gamesa G128- 8.0MW	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	Hub Height(m)	Rotor Diameter(m)
	21,904	1.2	100	167
U(m/s)	P(W)	C_p	C_t	a
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	48000	0,135270406	0.140383606	0.0364225
4	169000	0.200924108	0.212937553	0.0564173
5	593000	0.360969077	0.40801133	0.115296
6	1307000	0.460412552	0.551488516	0.165145
7	2186000	0.484932573	0.591765899	0.180534
8	3278000	0.487151795	0.595554878	0.18202
9	4687000	0.489207092	0.59908562	0.183411
10	6112000	0.465059654	0.55891806	0.16793
11	7249000	0.414405359	0.481931147	0.140115
12	8000000	0.352266681	0.396507185	0.111576
13	8000000	0.277067285	0.301893964	0.0822363
14	8000000	0.221835578	0.236799627	0.0631933
15	8000000	0.180360541	0.189844473	0.0499568
16	8000000	0.148612506	0.154859931	0.0403425
17	8000000	0.123899211	0.128145299	0.0331342
18	8000000	0.104375313	0.107337465	0.0275959
19	8000000	0.088747168	0.090860252	0.0232559
20	8000000	0.076089603	0.077626462	0.0197986
21	8000000	0.06572906	0.066866025	0.0170057
22	8000000	0.057167245	0.058021439	0.0147221
23	8000000	0.050030149	0.050680661	0.0128349
24	8000000	0.044033335	0.044534805	0.0112605
25	8000000	0.038957877	0.039348829	0.00993593
26	0	0	0	0
27	0	0	0	0
28	0	0	0	0
29	0	0	0	0
30	0	0	0	0

Πίνακας 12: Παρουσίαση του συντελεστή ισχύος (power coefficient C_p), του συντελεστή ώσης (thrust coefficient C_t) και του συντελεστή αξονικής επαγωγικής ροής για το μοντέλο Haliade 150-6MW.

Haliade 150-6MW	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	Hub Height(m)	Rotor Diameter(m)
	17860	1.2	100	150
U(m/s)	P(W)	C_p	C_t	a
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	130	0.000449311	0.000449362	0.000112353
4	265000	0.38639651	0.442427163	0.126646
5	520000	0.388204554	0.444924339	0.127483
6	1000000	0.432029641	0.507802341	0.149216
7	1400000	0.380891438	0.43486893	0.124124
8	2100000	0.38275126	0.437415997	0.124972
9	2700000	0.345623713	0.387812684	0.108788
10	3400000	0.317282568	0.35150254	0.0973533
11	4200000	0.294468287	0.323105803	0.0886321
12	5100000	0.275418896	0.299903323	0.0816411
13	6000000	0.25485226	0.275325767	0.074361
14	6000000	0.204048985	0.21647832	0.0574162
15	6000000	0.165899382	0.173812443	0.0455257
16	6000000	0.136696878	0.141925329	0.0368384
17	6000000	0.113965075	0.117526137	0.0302996
18	6000000	0.096006587	0.098494566	0.0252618
19	6000000	0.081631494	0.0834086	0.0213061
20	6000000	0.069988802	0.071282695	0.0181501
21	6000000	0.060458958	0.061416872	0.0155975
22	6000000	0.052583623	0.053303693	0.0135084
23	6000000	0.046018773	0.04656727	0.0117806
24	6000000	0.040502779	0.04092607	0.0103384
25	6000000	0.035834267	0.036164228	0.00912431
26	0	0	0	0
27	0	0	0	0
28	0	0	0	0
29	0	0	0	0
30	0	0	0	0

Πίνακας 13: Παρουσίαση του συντελεστή ισχύος (power coefficient C_p), του συντελεστή ώσης (thrust coefficient C_t) και του συντελεστή αξονικής επαγωγικής ροής για το μοντέλο Vestas V164-8.0.

Vestas V164-8.0	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	Hub Height(m)	Rotor Diameter(m)
	21,124	1.2	105	164
U(m/s)	P(W)	C_p	C_t	a
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	100000	0.123279997	0.127481476	0.0329565
5	650000	0.410275832	0.475989059	0.138057
6	1150000	0.420065177	0.490146878	0.14298
7	1850000	0.425549612	0.498189275	0.145807
8	2900000	0.446889991	0.530331015	0.157338
9	4150000	0.449151815	0.533825127	0.158615
10	5600000	0.441835511	0.522588098	0.154525
11	7100000	0.420874762	0.491328643	0.143394
12	7800000	0.356142215	0.401614209	0.113223
13	8000000	0.287297946	0.31432028	0.0859711
14	8000000	0.230026817	0.246257237	0.0659082
15	8000000	0.187020322	0.197284707	0.0520281
16	8000000	0.154099997	0.160851665	0.0419748
17	8000000	0.128474168	0.133058377	0.0344515
18	8000000	0.108229353	0.111424929	0.0286787
19	8000000	0.092024142	0.094302513	0.0241593
20	8000000	0.078899198	0.080555666	0.0205617
21	8000000	0.068156094	0.069381307	0.0176571
22	8000000	0.059278136	0.060198107	0.0152831
23	8000000	0.051877504	0.052578097	0.013322
24	8000000	0.045659258	0.046199312	0.0116864
25	8000000	0.04039639	0.040817166	0.0103106
26	0	0	0	0
27	0	0	0	0
28	0	0	0	0
29	0	0	0	0
30	0	0	0	0

Πίνακας 14: Παρουσίαση του συντελεστή ισχύος (power coefficient C_p), του συντελεστή ώσης (thrust coefficient C_t) και του συντελεστή αξονικής επαγωγικής ροής για το μοντέλο Vestas V164-9.5.

Vestas V164-9.5	A (m ²)	ρ (kg/m ³)	Hub Height(m)	Rotor Diameter(m)
	21.124	1.2	105	164
U(m/s)	P(W)	C_p	C_t	a
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	100000	0.292219253	0.320343205	0.0877935
4	249000	0.306967194	0.338576943	0.0933604
5	613000	0.386921669	0.443152727	0.126889
6	1226000	0.447826006	0.531774567	0.157865
7	2030000	0.466954439	0.561975756	0.169083
8	3123000	0.48125429	0.585544736	0.178109
9	4444000	0.480971245	0.585068201	0.177924
10	5900000	0.46550527	0.559637694	0.168201
11	7299000	0.432671111	0.508758815	0.149557
12	8601000	0.392715281	0.451182764	0.129589
13	9272000	0.332978319	0.371461818	0.103598
14	9500000	0.273156846	0.29717699	0.0808273
15	9500000	0.222086632	0.237088591	0.063276
16	9500000	0.182993746	0.192781847	0.0507734
17	9500000	0.152563074	0.159171154	0.0415164
18	9500000	0.128522357	0.133110145	0.0344654
19	9500000	0.109278668	0.112539537	0.0289744
20	9500000	0.093692798	0.096057704	0.0246206
21	9500000	0.080935362	0.082681224	0.0211162
22	9500000	0.070392786	0.07170205	0.0182589
23	9500000	0.061604536	0.062599991	0.0159029
24	9500000	0.054220369	0.054986983	0.0139411
25	9500000	0.047970713	0.048567919	0.0122931
26	0	0	0	0
27	0	0	0	0
28	0	0	0	0
29	0	0	0	0
30	0	0	0	0

Στη συνέχεια, κρίθηκε απαραίτητος ο υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος από της ανεμογεννήτριες για την κάθε ταχύτητα στην περιοχή. Η μέθοδος που ενδείκνυται είναι η Μέθοδος Γραμμικής παρεμβολής:

$$y(x) = f(x_1) + \frac{f(x_1)-f(x_2)}{x_1-x_2} * (x - x_1) \quad (13.)$$

Στον κώδικα χρησιμοποιήθηκε η εντολή 'interp1' του προγράμματος Matlab, η οποία αντιστοιχεί στην παραπάνω μέθοδο. Υπολογίσθηκε η μέση ισχύς ανά έτος και με τον παρακάτω τύπο προέκυψε η μέση ετήσια ισχύς ανά μοντέλο:

$$\text{MeanAnnualP} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{Mean_per_year} \quad (14.)$$

Όπου N είναι το σύνολο των ετών (20).

Στη συνέχεια, υπολογίσθηκε η μέση ετήσια ταχύτητα ανά μοντέλο ανεμογεννήτριας, αλλά και η μέση ετήσια ισχύς ανά μοντέλο ανεμογεννήτριας.

Πίνακας 15: Παρουσίαση της μέσης ετήσιας ταχύτητας και της μέσης ετήσιας ισχύος για κάθε μοντέλο ανεμογεννήτριας.

Μοντέλα Α./Γ.	Μέση ετήσια ταχύτητα	Μέση ετήσια ισχύς
Aerodyn 8.0/168	8.64	16782685.48
Multibrid M5000	8.46	7524666.58
Gamesa G128- 5.0MW	8.46	12715540.28
Gamesa G128- 8.0MW	8.46	9161454.21
Haliade 6MW	8.46	15594691.72
Vestas V164-8.0	8.55	15522458.44
Vestas V164-9.5	8.55	15522458.44

Με βάση τον παραπάνω Πίνακα 15 καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως το μοντέλο Aerodyn SCD 8.0/168 δέχεται λόγω του ύψους πτερωτής του (110m) την μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου και παράγει την μεγαλύτερη ισχύ. Στη δεύτερη θέση βρίσκονται οι ανεμογεννήτριες Vestas 8MW και 9.5MW οι οποίες έχουν ύψος πτερωτής 105m.

6.5 Ποσοστά Λειτουργίας Ανεμογεννητριών ανά Έτος και Συνολικά

Η παρακάτω παράγραφος παρουσιάζει τα ποσοστά λειτουργίας των διάφορων μοντέλων ανεμογεννήτριας στην περιοχή ανά τα έτη και αποτελεί ένα μείζον στοιχείο τόσο για την διαδικασία αξιολόγησης της περιοχής όσο και για την επιλογή του καταλληλότερου μοντέλου. Ως προς την αξιολόγηση της περιοχής, μας ενδιαφέρει η διαθέσιμη ισχύς να είναι όσο το δυνατό μεγαλύτερη και σε συνδυασμό με τα χαρακτηριστικά του επιλεγμένου μοντέλου να επιτυγχάνεται η όσο το δυνατόν αδιάκοπη λειτουργία του. Ένα ιδανικό μοντέλο σε μία ιδανική περιοχή θα λειτουργούσε χωρίς διακοπές καθ'όλη τη διάρκεια του χρόνου με ποσοστό 100%. Κάτι τέτοιο είναι πρακτικά δύσκολο να επιτευχθεί γι'αυτό και συμβιβάζομαστε με ένα όσο το δυνατό υψηλότερο ποσοστό λειτουργίας.

Προκειμένου να υπολογιστούν τα ποσοστά λειτουργίας, με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab, χρειάστηκε να υπολογιστούν τα ποσοστά που οι ανεμογεννήτριες θα είχαν μηδενική ισχύ. Δηλαδή, τα ποσοστά για τα οποία η ταχύτητα του ανέμου ήταν μικρότερη της ταχύτητας cut-in είτε μεγαλύτερη της ταχύτητας cut-out.

Πίνακας 16: Παρουσίαση ποσοστών λειτουργίας ανά έτος για κάθε μοντέλο ανεμογεννήτριας.

Ποσοστά λειτουργίας Ανεμογεννητριών ανά έτος							
Έτη	Aerodyn SCD 8.0/168	Multibrid M5000	Haliade 150- 6MW	Gamesa G128- 5.0MW	Gamesa G128- 8.0MW	Vestas 8MW	Vestas 9.5MW
2000	84.1	83.4	83.4	83.4	83.4	86.4	86.4
2001	86.9	86.4	86.4	86.4	86.4	89.5	89.5
2002	83.7	82.8	82.8	82.8	82.8	84.9	84.9
2003	87.5	86.9	86.9	86.9	86.9	88.9	88.9
2004	85.2	84.6	84.6	84.6	84.6	85.8	85.8
2005	85.8	84.4	84.4	84.4	84.4	86.3	86.3
2006	82.5	81.5	81.5	81.5	81.5	83.5	83.5
2007	85.9	84.1	84.1	84.1	84.1	86.3	86.3
2008	86	84.8	84.8	84.8	84.8	86.8	86.8
2009	85.1	84	84	84	84	85.9	85.9
2010	86.1	85.9	85.9	85.9	85.9	86.8	86.8
2011	90.2	89.1	89.1	89.1	89.1	90.4	90.4
2012	87.2	86.6	86.6	86.6	86.6	87.9	87.9
2013	84.5	84.5	84.5	84.5	84.5	85.2	85.2
2014	84.4	84.1	84.1	84.1	84.1	84.9	84.9
2015	71.1	70.2	70.2	70.2	70.2	71.9	71.9
2016	88	87.6	87.6	87.6	87.6	88.6	88.6
2017	84	83.9	83.9	83.9	83.9	84.9	84.9
2018	86.6	86.3	86.3	86.3	86.3	87.3	87.3
2019	86.8	86.5	86.5	86.5	86.5	87.5	87.5

Εύκολα γίνεται αντιληπτό πως οι ανεμογεννήτριες Multibrid M5000, Haliade 150-6MW, Gamesa G-128-5.0MW και Gamesa G128-8.0MW παρουσιάζουν τα ίδια ποσοστά λειτουργίας.

Αυτό συμβαίνει, καθώς τα συγκεκριμένα μοντέλα έχουν το ίδιο ύψος πτερωτής, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς. Η ίδια ομοιότητα παρατηρείται και για τα μοντέλα Vestas V164- 8.0MW και V164-9.5MW με ύψος πτερωτής τα 105m. Τα ποσοστά για το μοντέλο Aerodyn SCD 8.0/168 διαφέρουν από τα υπόλοιπα, καθώς είναι το μόνο με ύψος πτερωτής στα 110m. Αν και το συγκεκριμένο ύψος πτερωτής είναι το υψηλότερο, τα ποσοστά λειτουργίας δεν είναι. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το συγκεκριμένο μοντέλο έχει cut-in speed ίση με 4m/s ενώ τα υπόλοιπα μοντέλα έχουν 2-3m/s.

Τέλος, τα υψηλότερα ποσοστά λειτουργίας τα παρουσιάζουν οι ανεμογεννήτριες Vestas, οι οποίες πέραν του μεγάλου ύψους πτερωτής παρουσιάζουν μεγάλο εύρος ταχυτήτων ανέμου με τις οποίες λειτουργούν. Στη δεύτερη θέση έρχεται το μοντέλο Aerodyn και τέλος τα υπόλοιπα μοντέλα με ύψος πτερωτής τα 100m.

7. ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

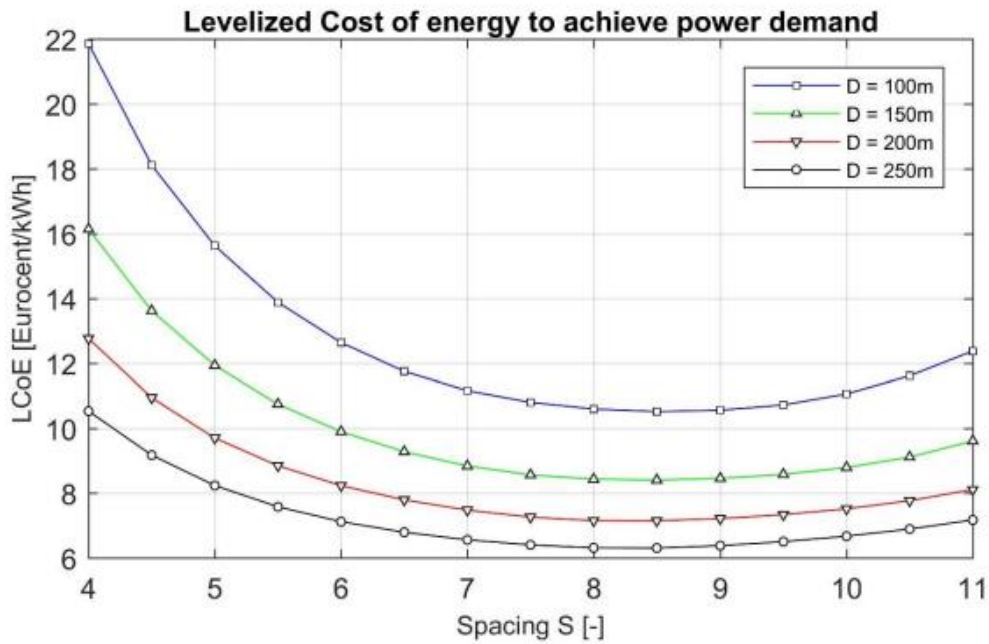
7.1 Υπολογισμός Διαβαθμισμένου Κόστους Ενέργειας (LCOE)

Το κάθε μοντέλο ανεμογεννήτριας διαφέρει ως προς την παραγόμενη ισχύ, την ονομαστική ισχύ, τις ταχύτητες cut-in και cut-out, το ύψος πτερωτής (hub height), το εμβαδό καλυπτόμενης επιφάνειας της πτερωτής (swept area) κ.α.. Έτσι, προκειμένου να αποφασισθεί ποιο είναι το πιο κερδοφόρο για εγκατάσταση θα πρέπει να γίνει ο υπολογισμός του κόστους και του κέρδους που θα επέφερε με βάση τα δεδομένα της περιοχής.

Στη συγκεκριμένη παράγραφο γίνεται μία οικονομική μελέτη για κάθε ένα μοντέλο ανεμογεννήτριας στην περιοχή της Λήμνου προκειμένου να αναχθούν συμπεράσματα για το ποιού η εγκατάσταση θα ήταν πιο κερδοφόρα. Από την βιβλιογραφία προκύπτει πως η καταλληλότερη μέθοδος σύγκρισης των μοντέλων με βάση το κέρδος και το κόστος, είναι ο υπολογισμός του δείκτη LCOE- Levelized Cost of Energy. Ο δείκτης αυτός αντικατοπτρίζει το συνολικό κόστος ζωής ενός αιολικού πάρκου σε σχέση με την ετήσια παραγωγή ενέργειας και έχει ως εξής:

$$\text{LCOE} = \frac{\text{Annualised CAPEX} + \text{Annualised OPEX}}{\text{Average Annual Energy Production}}$$

Ο δείκτης LCOE χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση και σύγκριση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από διαφορετικές τεχνολογίες και σε διαφορετικές τοποθεσίες και είναι ένας καλός τρόπος για να συγκριθεί το κόστος μιας μονάδας ενέργειας που παράγεται. Το LCOE επίσης δεν λαμβάνει υπόψη το κόστος που σχετίζεται με την εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης. Το χαμηλότερο LCOE ωφελεί τον καταναλωτή ηλεκτρικής ενέργειας, επομένως η μείωση του LCOE είναι βασικός στόχος για την υπεράκτια αιολική βιομηχανία. Ο συγκεκριμένος δείκτης συνδυάζει το κόστος και την παραγωγή ενέργειας σε μία μέτρηση, αντί να συγκρίνει χωριστά το κόστος και την παραγωγή ενέργειας. Χρησιμοποιείται από φορείς της τεχνολογίας και από φορείς που επιτρέπουν τη βιομηχανία, αλλά συνήθως όχι από επενδυτές έργων που μπορεί να ενδιαφέρονται περισσότερο για το εσωτερικό ποσοστό απόδοσης (IRR) ή την καθαρή παρούσα αξία (NPV) μιας επένδυσης, λαμβάνοντας υπόψη πιο συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της εταιρείας, όπως ο φόρος.



Εικόνα 42: Levelized cost of energy (LCOE) ως συνάρτηση της ενδιάμεσης απόστασης των ανεμογεννητριών και της διαμέτρου του ρότορα που πρέπει να συμμορφώνονται με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρώπης για E = 3500 TWh/έτος. (Πηγή: Towards_the_North_Sea_wind_p

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Excel για τη συγκέντρωση όλων των τιμών για τα διάφορα στοιχεία CAPEX, OPEX και WACC για τον τελικό υπολογισμό του δείκτη LCOE και κάθε τουρμπίνα υποβλήθηκε σε αυτή τη διαδικασία ανεξάρτητα.

Στον Πίνακα 17 υπολογίσθηκε η ετήσια παραγόμενη ισχύς ανά μέτρο ταχύτητας πολλαπλασιάζοντας την παραγόμενη ισχύ με τις ώρες λειτουργίας της ανεμογεννήτριας:

$$\text{Power(MWh)} = \text{Number of hours per year} * \text{Power Curve (MW)}$$

Επομένως, η συνολική ετήσια παραγόμενη ισχύς θα είναι:

$$\text{Total Annual Gross Power Production} = \sum \text{Power Production}$$

Πίνακας 17: Παρουσίαση του μέσου όρου ωρών λειτουργίας ανά έτος, της πιθανότητας, της ισχύος, αλλά και της παραγόμενης ενέργειας για την ανεμογεννήτρια Aerodyn SCD 8.0/168.

Aerodyn SCD 8.0/168					
Ταχύτητα	Μ.Ο. ωρών λειτουργίας ανά έτος	Πιθανότητα	Ισχύς	Ενέργεια(MWh)	
0	140	1.6	0	0.0	
1	377	4.3	0	0.0	
2	542	6.2	0	0.0	
3	637	7.3	200	0.0	
4	711	8.1	650	71.1	
5	745	8.5	1250	372.5	
6	762	8.7	1900000	762.0	
7	730	8.3	2700000	1460.0	
8	677	7.7	3500000	2031.0	
9	647	7.4	4500000	2588.0	
10	601	6.9	5600000	3005.0	
11	560	6.4	6800000	3360.0	
12	518	5.9	8000000	3781.4	
13	429	4.9	8000000	3432.0	
14	326	3.7	8000000	2608.0	
15	236	2.7	8000000	1888.0	
16	180	2.1	8000000	1440.0	
17	127	1.4	8000000	1016.0	
18	82	0.9	8000000	656.0	
19	61	0.7	8000000	488.0	
20	40	0.5	8000000	320.0	
21	28	0.3	8000000	224.0	
22	14	0.2	8000000	112.0	
23	9	0.1	8000000	72.0	
24	7	0.1	0	56.0	
25	6	0.1	0	0.0	
26	2	0.0	0	0.0	
27	1	0.0	0	0.0	
28	0	0.0	0	0.0	
29	0	0.0	0	0.0	
30	0	0.0	0	0.0	

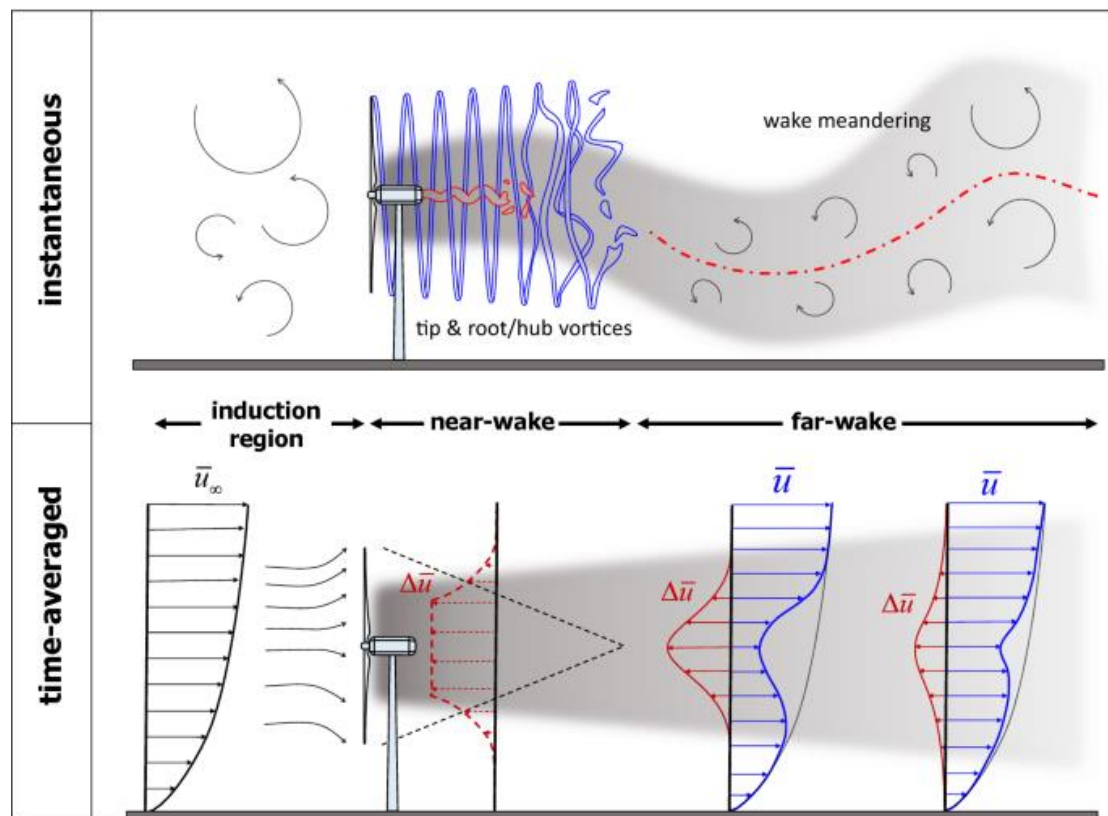
Για ένα υποτιθέμενο θαλάσσιο αιολικό πάρκο με 20 ανεμογεννήτριες προκύπτει ότι:

$$\text{Annual Gross Power Production per farm} = 20 * \text{Total Annual Power}$$

7.2 LCOE Απώλειες

Προκειμένου να υπολογιστεί ο δείκτης LCOE θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι απώλειες του συστήματος κατά τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

1. Μία σημαντική μορφή απωλειών είναι αυτές που προέρχονται από το Wake effect (φαινόμενο στροβιλισμού). Το φαινόμενο αυτό είναι η συνολική επίδραση στην παραγωγή ενέργειας του αιολικού πάρκου, η οποία προκύπτει από τις αλλαγές στην ταχύτητα του ανέμου που προκαλούνται από την αλληλεπίδραση των ανεμογεννητριών μεταξύ τους. Ο χώρος πίσω από μια ανεμογεννήτρια χαρακτηρίζεται από μειωμένη χωρητικότητα αιολικής ενέργειας λόγω του γεγονότος ότι η ίδια η ανεμογεννήτρια χρησιμοποιούσε την ενέργεια για την περιστροφή των πτερυγίων της. Ο άνεμος πίσω από τον στρόβιλο, στο πέρασμά του, είναι λιγότερο αποτελεσματικός στην παραγωγή ενέργειας για μια ορισμένη απόσταση προς την κατεύθυνση του ανέμου λόγω των αναταράξεων που δημιουργούνται από την αντίθετη μηχανή. Έτσι, κατά την τοποθέτηση ενός αιολικού πάρκου, είναι σημαντικό να μετρηθούν οι αποστάσεις μεταξύ των ανεμογεννητριών για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση που έχει η καθεμία στην ικανότητα παραγωγής ενέργειας των άλλων, λαμβάνοντας υπόψη το πρόσθετο κόστος για την τοποθέτηση ηλεκτρικού καλωδίου και άλλης υποδομής που απαιτείται όταν βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους.



Εικόνα 43: Σχηματική απεικόνιση που δείχνει τις περιοχές ροής που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση μιας ανεμογεννήτριας και του εισερχόμενου τυρβώδους οριακού στρώματος. Απεικονίζονται τα πιο σημαντικά, στιγμιαία (επάνω) και χρονικά μέσα (κάτω) χαρακτηριστικά ροή

2. Θα υπάρξουν ηλεκτρικές απώλειες μεταξύ των ακροδεκτών χαμηλής τάσης καθεμιάς από τις ανεμογεννήτριες και του σημείου που συνδέεται το πάρκο με την ξηρά, το οποίο συνήθως βρίσκεται εντός ενός σταθμού μεταγωγής αιολικού πάρκου. Αυτό θα περιλαμβάνει τις ηλεκτρικές απώλειες που παρουσιάζονται όταν το αιολικό πάρκο είναι σε λειτουργία και οι οποίες θα εκδηλωθούν ως μείωση της ενέργειας που μετράται από έναν μετρητή εξαγωγής στο σημείο σύνδεσης. Αυτό παρουσιάζεται ως συνολική ηλεκτρική απόδοση και βασίζεται στη μεγάλη -πρόθεσμη μέση αναμενόμενη παραγωγή του αιολικού πάρκου. Είναι επίσης απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η ισχύς που καταναλώνει το αιολικό πάρκο όταν το αιολικό πάρκο δεν είναι σε λειτουργία.
3. Μέση Διαθεσιμότητα των τουρμπινών (Availability). Αυτός ο παράγοντας καθορίζει την αναμενόμενη μέση διαθεσιμότητα τουρμπίνας του αιολικού πάρκου κατά τη διάρκεια ζωής του έργου. Αντιπροσωπεύει, ως ποσοστό, τον παράγοντα που πρέπει να εφαρμοστεί στην ακαθάριστη ενέργεια για να ληφθεί υπόψη η απώλεια ενέργειας που σχετίζεται με το χρόνο που οι τουρμπίνες δεν είναι διαθέσιμες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

7.2.1. Υπολογισμός των απωλειών (Losses)

Στον Πίνακα 18 παρουσιάζονται οι τιμές για τις απώλειες λόγω στροβιλισμού, για τις ηλεκτρικές απώλειες αλλά και για τη διαθεσιμότητα. Δεδομένου ότι οι δύο τελευταίες δεν επηρεάζονται από την ονομαστική ισχύ, μένουν σταθερές. Παρ' όλα αυτά, οι απώλειες λόγω στροβιλισμού παρουσιάζουν μεταβολές. Οι τιμές για κάθε διαφορετικό μοντέλο υπολογίστηκαν με βάση μία τουρμπίνα 3MW που παρουσιάζει απώλειες τις τάξης του 8% και μία 7MW με απώλειες της τάξης του 6%.

Πίνακας 18: Παρουσίαση των τιμών για τους διαφορετικούς δείκτες απωλειών, στον υπολογισμό του τελικού LCOE.

Losses	Aerodyn SCD 8.0/168	Multibrid M5000	Haliade 150- 6MW	Gamesa G128- 5.0MW	Gamesa G128- 5.0MW	Vestas v164- 8.0MW	Vestas v164- 9.5MW
Wake Losses	5.50%	7%	6.50%	7%	5.50%	5.50%	5.25%
Electrical Losses	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Availability	94%	94%	94%	94%	94%	94%	94%

Επομένως, γνωρίζοντας τις απώλειες μπορεί να υπολογισθεί η πραγματική ετήσια παραγόμενη ενέργεια από το εκάστοτε πάρκο:

Annual net power production

$$= \text{Annual gross power production} * (1 - \text{Wake losses} - \text{Electrical losses})$$

$$* \text{Availability}$$

7.3 Υπολογισμός κεφαλαιούχων δαπανών (CAPEX)

Οι κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX) περιλαμβάνουν όλες τις εφάπαξ δαπάνες που σχετίζονται με την ανάπτυξη του αιολικού πάρκου μέχρι την λειτουργία του. Τέτοιες δαπάνες αφορούν στα κόστη αγοράς, εγκατάστασης, καλωδίωσης και σύνδεσης του αιολικού πάρκου με το δίκτυο στην ξηρά, ασφάλισης κατά την κατασκευή, εγγυήσεων στην απεγκατάσταση/παρόπλιση του πάρκου, έρευνας χωροθέτησης και συνολικής διαχείρισης των έργων.

6.3.1. Υπολογισμός των βαρών των επιμέρους στοιχείων μιας ανεμογεννήτριας

Στη συνέχεια, έπρεπε να υπολογιστούν τα βάρη για τα διάφορα τμήματα της ανεμογεννήτριας. Τα βάρη προέκυψαν από τους νόμους ομοιότητας για τουρμπίνες διαφορετικής ισχύος και ως δεδομένο χρησιμοποιήθηκε η τιμή μίας πρότυπης ανεμογεννήτριας 6MW με γνωστές τιμές για τα εκάστοτε βάρη.

Τύπος για υπολογισμό του βάρους του βυθισμένου τμήματος του πυλώνα (*Submerged tower weight*) (Πηγή: Π.Κ. Χαβιαρόπουλος):

$$\frac{m_{sub}}{m_{sub_6MW}} = \frac{P(MW)}{6(MW)}$$

Τύπος για υπολογισμό του βάρους του κύριου τμήματος του πυλώνα (*Pylon weight*) (Πηγή: Π.Κ. Χαβιαρόπουλος):

$$\frac{m_{pylon}}{m_{pylon_6MW}} = \left(\frac{P(MW)}{6MW} \right)^{\frac{2.6}{2}}$$

Τύπος για υπολογισμό του βάρους της ατράκτου (Nacelle) και των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας (*Blades*) (Πηγή: Π.Κ. Χαβιαρόπουλος):

$$\frac{m_{wind\ turbine}}{m_{t_6MW}} = \left(\frac{P_{MW}}{6_{MW}} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Τύπος για υπολογισμό του βάρους του συστήματος θεμελίωσης της ανεμογεννήτριας (*Foundation Weight*) και των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας (*Blades*) (Πηγή: Π.Κ. Χαβιαρόπουλος):

$$m_{foundation} = m_{submerged} * P_{MW}$$

Στον Πίνακα 19 παρουσιάζονται τα βάρη κάθε τμήματος για κάθε τύπο ανεμογεννήτριας. Η ανεμογεννήτρια των 6 MW που αναφέρεται πρώτη, είναι το πρότυπο μοντέλο με βάση το οποίο υπολογίστηκαν τα βάρη για τα υπόλοιπα μοντέλα ανεμογεννητριών που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 19: Παρουσίαση των τιμών για τα βάρη των επιμέρους τμημάτων των ανεμογεννητριών, με βάση την παροχή ισχύος της καθεμίας.

Weights (tons/unit)	6	8	5	6	5	8	8	9.5
Submerged tower weight	200	266	167	200	167	266	266	316
Pylon weight	200	290	158	200	158	290	290	363
Wind turbine weight	380	585	289	380	289	585	585	757
Foundation weight	1200	2128	833	1200	833	2128	2128	3002

7.3.2. Υπολογισμός του CAPEX

Το συνολικό κόστος του επενδυτικού κεφαλαίου που απαιτείται για τη δημιουργία ενός έργου αναφέρεται ως CAPEX. Πιο συγκεκριμένα, το κόστος αγοράς και εγκατάστασης των ανεμογεννητριών, το κόστος καλωδίωσης και σύνδεσης του πάρκου με το ήδη υπάρχον δίκτυο καλωδίωσης, η ασφάλεια κατά την κατασκευή του έργου, οι εγγυήσεις κατά την απεγκατάσταση-μετατόπιση των ανεμογεννητριών, το κόστος για την καταλληλότερη χωροθέτηση, καθώς και το κόστος για τη διαχείριση του έργου συμπεριλήφθηκαν στον υπολογισμό του excel.

Οι τιμές για την αγορά των ανεμογεννητριών καθορίστηκαν από τα προαναφερθέντα βάρη, μαζί με τον πίνακα κοστολόγησης των διαφόρων εξαρτημάτων της ανεμογεννήτριας, ο οποίος παρασχέθηκε ως βασικό στοιχείο. Το διάγραμμα τιμών περιελάμβανε τυπικές τιμές κόστους (€/kg) για μια υπεράκτια εγκατάσταση αιολικού πάρκου με 100 τουρμπίνες. Όμως, λαμβάνοντας υπόψη την περιοχή και τα χαρακτηριστικά της, θεωρήθηκε καταλληλότερη η εγκατάσταση λιγότερων ανεμογεννητριών που, συγκεκριμένα 20, με τη μεγαλύτερη δυνατή ισχύ. Λιγότερες ανεμογεννήτριες συνεπάγονται ότι οι διαδικασίες εγκατάστασης μειώνονται όπως επίσης και το κόστος αγοράς, εγκατάστασης και συντήρησης. Στον Πίνακα 20 παρουσιάζονται τα κόστη για τα επιμέρους τμήματα των ανεμογεννητριών σε (€/kg) για υποθετικό πάρκο 20 ανεμογεννητριών. Αξίζει σε αυτό το σημείο να αναφερθεί πως στην περιοχή αναμένονται βάβη έως περίπου 47m οπότε για τα θεμέλια θα επιλεγθούν είτε monopiles είτε jackets. Επομένως τα παρακάτω κόστη θεμελίων αντιστοιχούν στο κόστος για αυτά τα είδη.

Πίνακας 20: Τιμές κοστολόγησης των επιμέρους τμημάτων μιας ανεμογεννήτριας.

Typical Cost for 20 units amount	€/kg
Submerged tower	0.9
Pylon	0.8
Wind turbine	5
Foundation	0.9

Γνωρίζοντας λοιπόν το κόστος των επιμέρους τμημάτων αλλά και τα εκάστοτε βάρη τους μπορεί να υπολογισθεί το κόστος αγοράς για το κάθε τμήμα ξεχωριστά. Για παράδειγμα, το κόστος αγοράς υποθαλάσσιου πυλώνα για μία ανεμογεννήτρια 5MW υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Κόστος υποθαλάσσιου πυλώνα} = \frac{266 * 0,9}{1000} = 0.2394 \text{ (M€/unit)}$$

Στον Πίνακα 21 παρουσιάζονται τα κόστη για την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών, αλλά και για την καλωδίωση που δόθηκαν ως δεδομένα. Τα διαφορετικά κόστη για τουρμπίνες με διαφορετική ισχύ υπολογίστηκαν με βάση τα αρχικά δεδομένα για μία τουρμπίνα της τάξεως των 3MW και μία της τάξεως των 6MW.

Πίνακας 21: Τιμές κοστολόγησης για την εγκατάσταση των διάφορων τμημάτων της ανεμογεννήτριας, καθώς και το κόστος σύνδεσής τους.

CAPEX (M€ / unit)	6	8	5	6	5	8	8	9.5
Foundation installation								
Submerged tower installation	3	3.666	2.666	3	2.666	3.666	3.666	4.833
Pylon & turbine installation	3	3.666	2.666	3	2.666	3.666	3.666	4.833
Array cabling	2.5	3.333	2.083	2.5	2.083	3.333	3.333	3.958

Ουσιαστικά ο δείκτης CAPEX υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\text{CAPEX} = \sum (\text{Foundation} + \text{Submerged tower} + \text{Pylon} + \text{Wind turbine} \\ + \text{Foundation \& submerged tower installation} \\ + \text{Pylon \& turbine installation} + \text{Array cabling})$$

7.4 Υπολογισμός δείκτη ECP

Στη συνέχεια θα υπολογιστεί ο δείκτης ECP για τον υπολογισμό του οποίου χρειάζονται οι επιπλέον οι εξής όροι: το κόστος ασφάλισης ανά τουρμπίνα κατά την διεξαγωγή του έργου (M€/ unit), το οποίο αναφέρεται στο κόστος αγοράς, εγκατάστασης και καλωδίωσης με το υπάρχων δίκτυο.

Insurance during construction =

$$= 0,8\% * (\text{Pylon} + \text{Wind turbine}) + 1,65\% * (\text{Submerged tower} + \text{Pylon \& turbine installation} + \text{Array cabling})$$

Ο Πίνακας 22 παρουσιάζει το κόστος εγγύησης για την απεγκατάσταση-παρόπλιση του πάρκου, το κόστος για την πραγματοποίηση των αναγκαίων ερευνών προκειμένου να γίνει η χωροθέτηση, το κόστος σύνδεσης του υπερράκτιου πάρκου με το ήδη υπάρχων δίκτυο και το κόστος για την συνολική διαχείριση του έργου. Τα κόστη αυτά δόθηκαν ως αρχικά δεδομένα στο excel υπολογισμού.

Πίνακας 22: Παρουσίαση των τιμών για τα κόστη ορισμένων στοιχείων του EPC.

Κόστη EPC	
Decommissioning guarantee (M€/unit)	0.5
Project management (M€)	10.0
Site development (M€)	10.0
Grid connection costs (M€)	200.0

Ο δείκτης EPC αναφέρεται κυρίως στις κεφαλαιουχικές δαπάνες του έργου που σχετίζονται με την κατασκευή. Πιο συγκεκριμένα, το τελικό κόστος EPC (M€) περιλαμβάνει όλες τις κεφαλαιουχικές δαπάνες (CAPEX), το κόστος μελέτης έργου, προμήθειας, κατασκευής, εξοπλισμού και υλικών, τη σύνδεση του πάρκου με τα ήδη υπάρχοντα δίκτυα καλωδίωσης, καθώς και το κόστος για τη συνολική διαχείριση του έργου. Το EPC καθορίστηκε στον υπολογισμό του Excel ως εξής:

$$\text{EPC} = \left((\text{CAPEX} + \text{Insurance during construction} + \text{Decommissioning guarantee}) \right. \\ \left. * 20 \text{ turbines} \right. \\ \left. + \sum (\text{Project management} + \text{Site development} \right. \\ \left. + \text{Grid connection costs}) \right)$$

Ο δείκτης ECP αφορά ουσιαστικά στα έτη κατασκευής του έργου (2 έτη) οπότε στους τελικούς υπολογισμούς αφορά μόνο αυτά (0.5*ECP- 1⁰έτος και 0.5*ECP-2⁰ έτος). Επιπλέον, περιέχει και το κόστος απεγκατάστασης του έργου που υπολογίζεται μόνο στο τελευταίο έτος λειτουργίας του (23⁰ έτος).

$$\text{Decommissioning costs} = 0,3 \text{ (M€/unit)} * 20(\text{turbines}) = 6 \text{ (M€)}$$

7.5 Υπολογισμός λειτουργικών δαπανών (OPEX)

Οι Λειτουργικές Δαπάνες (OPEX) περιλαμβάνουν όλες τις δαπάνες που πραγματοποιούνται αμέσως μετά την εξαγορά, εφάπαξ ή επαναλαμβανόμενη, που σχετίζεται με το αιολικό πάρκο, μετρούμενη σε ετήσια βάση. Εξαιρούνται τα έξοδα που είναι εγγενή στη λειτουργία των επιχειρήσεων των φορέων εκμετάλλευσης αλλά όχι άμεσα που σχετίζονται με τη λειτουργία και τη διαχείριση του αιολικού πάρκου. Πιο συγκεκριμένα στον υπολογισμό του Excel συμπεριλήφθηκαν τα ετήσια έξοδα ασφάλισης του αιολικού πάρκου μαζί με τους μισθούς των μόνιμων υπαλλήλων του έργου, τα ανταλλακτικά, τα έξοδα μεταφοράς, τα έξοδα για τη χρήση πλοίων που απασχολούνται συχνά σε τέτοια έργα και τα έξοδα για την ετήσια ασφάλιση του έργου.

Πίνακας 23: Κόστη λειτουργίας και συντήρησης του έργου.

OPEX Costs	M€/year
Total salaries	3.0
Transport vessel cost	1.0
Spares parts	8.0
Special vessels	3..0

Total annual O&M costs per farm =

$$= \sum (\text{Total salaries} + \text{Transport vessel cost} + \text{Spares parts} + \text{Special vessels} + \text{Farm insurance costs})$$

Έπειτα, υπολογίζονται τα κόστη ασφάλισης του έργου (σε M€/year) με βάση το ECP:

$$\text{Farm insurance costs} = 0,7\% * \text{EPC}$$

Τέλος, αθροίζοντας τα παραπάνω κόστη υπολογίστηκε το συνολικό κόστος για την λειτουργία και συντήρηση του έργου επίσης σε (M€/year) :

Total annual O&M costs per farm =

$$= \sum (\text{Total salaries} + \text{Transport vessel cost} + \text{Spares parts} + \text{Special vessels} + \text{Farm insurance costs})$$

Ο δείκτης OPEX συμπεριλαμβάνει έξοδα τα οποία αφορούν στη λειτουργία του έργου (Continuous O&M costs per farm, Farm insurance costs, Total *annual O&M costs*) οπότε συμπεριλήφθηκε στους τελικούς υπολογισμούς από το 3^ο έτος μέχρι το 22^ο έτος.

7.6 Υπολογισμός Σταθμισμένου Μέσου Κόστους Κεφαλαίου (WACC)

Ουσιαστικά, ο όρος Σταθμισμένο μέσο κόστος κεφαλαίου (*Weighted Average Cost of Capital-WACC*) δηλώνει το ονομαστικό προεξοφλητικό επιτόκιο που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια ολόκληρου του έργου. Το κόστος χρηματοδότησης των ιδίων κεφαλαίων επηρεάζεται από την κεφαλαιακή διάρθρωση, η οποία περιλαμβάνει το μερίδιο του χρέους και το επιτόκιο του χρέους.

$$\text{WACC} = (\text{Debt share} * \text{Debt interest rate}) + \text{Equity cost} * (1 - \text{Debt share})$$

Οι τιμές για τα διάφορα κόστη δανείων και τα επιτόκια που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του σταθμισμένου μέσου κόστους κεφαλαίου εμφανίζονται στον Πίνακα 24. (WACC). Σύμφωνα με αναφορές, αυτές οι τιμές παρέχονται στον υπολογισμό excel ως αρχικά δεδομένα και διατηρήθηκαν σταθερές και ανεξάρτητες από τα διάφορα μοντέλα ανεμογεννητριών (Πηγή: Π.Κ. Χαβιαρόπουλος).

Πίνακας 24: Παρουσίαση του δείκτη μείωσης WACC (Weighted Average Cost of Capital).

Discount Rate	%
Debt interest rate	8%
Equity cost	17%
Debt share	50%

Επομένως, ο δείκτης είναι ανεξαιρέτως για όλα τα μοντέλα ανεμογεννήτριας WACC=12,5.

7.7 Παρουσίαση των τελικών αποτελεσμάτων του LCOE για κάθε μοντέλο τουρμπίνας

Τα τελικά αποτελέσματα του δείκτη LCOE αφορούν υπολογισμούς για ένα υποθετικό σενάριο που αφορούσε την κατασκευή ενός υπερράκτιου αιολικού 20 ανεμογεννητριών το οποίο χρειάζεται 2 έτη για την κατασκευή του και θα βρίσκεται σε λειτουργία 20 έτη. Επομένως, οι δείκτες CAPEX, OPEX και WACC συνυπολογίσθηκαν για όλα τα έτη.

Έγινε ο υπολογισμός των ροών δαπανών (σε Μ€) χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$\text{Cost flows} = \text{CAPEX} + \text{Maintenance at sea} + \text{Insurance cost} \\ + \text{Total annual O\&M costs}$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται ο δείκτης μείωσης κόστους WACC ξεχωριστά για όλα τα έτη:

$$\text{Discount ratio} = \frac{1}{(1 + \text{WACC})^{\text{year}}}$$

Χρησιμοποιώντας τον δείκτη WACC, υπολογίσθηκαν οι προ εξοφλημένες ροές κόστους σε (Μ€). Οι προ εξοφλημένες αυτές ροές προσαρμόζονται στην οικονομία της εκάστοτε χώρας με βάση τα επιτόκια, το κόστος δανεισμού και τον πληθωρισμό. Για τον υπολογισμό χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος τύπος:

$$\text{Discounted Costs flows} = \sum_{y=1}^{y=22} (\text{Cost flows} * \text{Discount ratio})$$

Όλοι οι προαναφερθέντες υπολογισμοί έγιναν για τον καθορισμό του δείκτη LCOE (σε €/MWh), ο οποίος αποτελεί γνώμονα για την αξιολόγηση των διάφορων μοντέλων ανεμογεννητριών προκειμένου να επιλεγεί αυτό που είναι καλύτερο για κάθε περιοχή μελέτης. Με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$\text{LCOE} = \frac{\text{Discounted Costs flows}}{\text{Discounted production}} * 1000$$

Στον Πίνακα 25 παρουσιάζονται οι τελικές τιμές του δείκτη LCOE που προέκυψαν από τους παραπάνω υπολογισμούς:

Πίνακας 25: Παρουσίαση των τελικών τιμών του κόστους LCOE - Levelized Cost of Energy.

Μοντέλα Ανεμογεννητριών	LCOE (€/MWh)
Aerodyn SCD-8.0/168	162.3
Multibrid M5000	303.6
Haliade 150-6MW	252.6
Gamesa G128-5.0MW	276.8
Gamesa G128-8.0MW	170.4
Vestas v164-8.0MW	152.2

Vestas v164-9.5MW	139.6
--------------------------	--------------

Από τον Πίνακα 25, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως το πιο επικερδές μοντέλο για εγκατάσταση θα ήταν η Vestas v164-9.5 MW. Το αποτέλεσμα αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς πέρα από το ότι έχει τη μεγαλύτερη ονομαστική ισχύ, η ταχύτητα cut-in είναι 3m/s και η cut-out είναι 25m/s γεγονός που σημαίνει ότι λειτουργεί σε ένα πολύ μεγάλο εύρος και αξιοποιεί ακόμα και μικρές τιμές ταχύτητας αλλά και είναι ανθεκτική σε πολύ υψηλές. Στη δεύτερη θέση ακολούθησε η ανεμογεννήτρια Vestas v164-8.0 MW , η οποία έχει επίσης υψηλή ονομαστική ισχύ και το ίδιο εύρος ταχυτήτων λειτουργίας όπως το προηγούμενο μοντέλο. Στην Τρίτη θέση βρίσκεται το μοντέλο Aerodyn SCD 8.0/168 το οποίο αν και έχει την ίδια ονομαστική ισχύ (8MW) με τη Vestas, έχει ταχύτητα cut-in 4m/s και ταχύτητα cut-off 24m/s, επομένως βρίσκεται σε λειτουργία λιγότερες ώρες. Έπειτα ακολούθησαν με τη σειρά στις επόμενες θέσεις τα μοντέλα: Gamesa G128-8.0MW, Haliade 150-6MW, Gamesa G128-5.0MW και Multibrid M5000.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία αποτελεί μία τεχνοοικονομική μελέτη σκοπιμότητας ενός υπερράκιου αιολικού πάρκου στην περιοχή του Βόρειου Αιγαίου. Η περιοχή χωροθέτησης που επιλέχθηκε και εξετάστηκε είναι αυτή βορειοανατολικά της Λήμνου, καθώς πληρούσε όλα τα απαραίτητα κριτήρια και υποσχόταν υψηλή διαθέσιμη ισχύ. Στην μελέτη εισήχθησαν 7 διαφορετικά μοντέλα ανεμογεννητριών, τα οποία είναι μεγαλύτερα από 5MW και διατίθενται την παρούσα στιγμή στην αγορά. Αυτά είναι: Aerodyn SCD-8.0/168, Multibrid M5000, Haliade 150-6MW, Gamesa G-128-5.0MW, Gamesa G128-8.0MW, Vestas v164-8.0MW και Vestas v164-9.5MW. Μέσω διαφόρων τιμών που υπολογίσθηκαν για κάθε μοντέλο, έγινε η σύγκρισή τους, σχετικά με το ποιού η εγκατάσταση θα επέφερε μεγαλύτερο κέρδος.

Έπειτα, λαμβάνοντας υπόψη τη σημασία της καμπύλης ισχύος των μοντέλων, έγινε η αριθμητική προσομοίωσή της, χρησιμοποιώντας διαφορετικά μοντέλα. Χρησιμοποιώντας ως αρχικό δεδομένο την καμπύλη ισχύος της εκάστοτε ανεμογεννήτριας, υπολογίσθηκαν ο συντελεστής ισχύος, ο συντελεστής ώσης και ο συντελεστής αξονικής επαγωγικής ροής με τη βοήθεια του προγράμματος Wolfram Mathematica 9. Τα εικοσαετή ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής που δόθηκαν ως αρχικό δεδομένο εισήχθησαν στο πρόγραμμα Matlab όπου αρχικά έγιναν οι απαραίτητοι υπολογισμοί για τον υπολογισμό του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού της περιοχής προκειμένου να κριθεί εάν είναι κατάλληλη. Έτσι, υπολογίσθηκαν η μέση μηνιαία, εποχιακή και ετήσια πυκνότητα αιολικού δυναμικού. Σε σχέση με τους μήνες παρατηρείται πως τους χειμερινούς μήνες η πυκνότητα αιολικού δυναμικού είναι υψηλότερη, ενώ τους θερινούς χαμηλότερη. Παρ'όλα αυτά, ακόμα και οι πιο χαμηλές τιμές την περίοδο του καλοκαιριού είναι επαρκείς, λόγω της ιδιαιτερότητας της περιοχής του Αιγαίου και των μελετημών. Επιπλέον, υπολογίσθηκαν ο δείκτης MAV που αναφέρεται στην εποχιακή μεταβλητότητα και ο δείκτης IAV που αναφέρεται στη διαχρονική μεταβλητότητα. Οι προκύπτουσες τιμές των δεικτών για την περιοχή καταδεικνύουν πως στην περιοχή δεν υπάρχουν έντονες και απότομες μεταβολές στις τιμές των πνέοντων ανέμων, γεγονός πολύ σημαντικό για την αξιολόγηση της περιοχής.

Οι υπολογισμοί επεκτάθηκαν, με την εισαγωγή σε αυτούς του μετατροπέα, δηλαδή του εκάστοτε μοντέλου ανεμογεννήτριας. Υπολογίσθηκαν, λοιπόν, η μέση ετήσια ταχύτητα και η μέση ετήσια ισχύς τους στο σημείο, αλλά και τα ποσοστά λειτουργίας τους. Από τους υπολογισμούς αυτούς προέκυψε ότι τα μοντέλα Vestas v164-9.5MW και 8MW λόγω του μεγάλου ύψος πτερωτής, της χαμηλής cut-in ταχύτητας αλλά και της υψηλής cut-out ταχύτητας, παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα ποσοστά λειτουργίας. Το μοντέλο Aerodyn SCD-8.0/168 αν και έχει την υψηλότερη πτερωτή παρουσιάζει μεγαλύτερη cut-in ταχύτητα με αποτέλεσμα να έχει αρκετά πιο χαμηλά ποσοστά λειτουργίας από τα δύο πρώτα μοντέλα, ειδικά σε χρονιές που η συχνότητα χαμηλών ανέμων ήταν μεγαλύτερη. Έπειτα, ακολουθούν και τα υπόλοιπα μοντέλα: Multibrid M5000, Haliade 150-6MW, Gamesa G-128-5.0MW και Gamesa G128-8.0MW, τα οποία έχουν το ίδιο ύψος πτερωτής. Στη συνέχεια, έγινε ο υπολογισμός του Διαβαθμισμένου Κόστους Ενέργειας LCOE (Levelized Cost of Energy), ο οποίος επέτρεψε την μετατροπή των διαφόρων παραμέτρων σε οικονομικά στοιχεία και κατέστησε δυνατή την σύγκριση των μοντέλων με βάση το τελικό κόστος. Προκειμένου να υπολογισθεί το LCOE χρειάστηκε πρώτα ο υπολογισμός άλλων παραγόντων όπως οι διάφορες απώλειες του συστήματος (απώλειες λόγω στροβιλισμού, ηλεκτρικές απώλειες και διαθεσιμότητα), ο δείκτης CAPEX (κεφαλαιούχες δαπάνες), OPEX (λειτουργικές δαπάνες) και WACC (σταθμισμένο μέσο κόστος κεφαλαίου).

Με βάση τα τελικά αποτελέσματα της αξιολόγησης προκύπτει ότι το πιο επικερδοφόρο μοντέλο ανεμογεννήτριας για εγκατάσταση στην περιοχή της Λήμνου θα ήταν με αρκετή διαφορά το Vestas v164-9.5MW. Έπειτα, ακολούθησε το μοντέλο Vestas v164-8MW με μικρή διαφορά με το μοντέλο Aerodyn SCD-8 και το Gamesa G128-8.0MW. Ύστερα, ακολουθούν με την εξής σειρά τα μοντέλα Haliade 150-6MW, Gamesa G128-5.0MW και Multibrid-M5000. Τα τελευταία μοντέλα κρίθηκαν μη βιώσιμα, καθώς για αυτά οι τιμές του Διαβαθμισμένου Κόστους Ενέργειας ξεπερνούν τις επιθυμητές τιμές, περίπου 160(€/MWh) για Υπεράκτιο Πάρκο με συνολική ισχύ 500MW.

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η περιοχή της Λήμνου αποτελεί μία πολλή καλή επιλογή τοποθεσίας για χωροθέτηση ενός Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου. Αρχικά, ο πιο σημαντικός παράγοντας που παίζει καθοριστικό ρόλο στην επιλογή της είναι η ύπαρξη ισχυρών ανέμων και συνεπώς υψηλής διαθέσιμης πυκνότητας αιολικού δυναμικού καθ'όλη τη διάρκεια του έτους. Έπειτα, το βάθος και το είδος του πυθμένα, η απόσταση από την ακτή, η οπτική όχληση και η απουσία απογορευτικών παραγόντων όπως η αυξημένη αλιεία και διέλευση εμπορικών πλοίων, η διέλευση αποδημητικών πουλιών, οι στρατιωτικές ασκήσεις κ.α. που αναφέρθηκαν εκτενώς παραπάνω, καθιστούν την περιοχή την επικρατέστερη για χωροθέτηση στην Ελλάδα. Επιπλέον, συμπερένεται ότι για ένα υποτιθέμενο πάρκο 20 ανεμογεννητριών όπως αυτό μελετήθηκε στην παρούσα εργασία η επιλογή μοντέλων ανεμογεννητριών με ισχύ μεγαλύτερη των 8 MW θα ήταν βιώσιμη και κερδοφόρα σε αντίθεση με μοντέλα μικρότερης ισχύος. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί πως η υπεράκτια αιολική βιομηχανία παγκοσμίως παρουσιάζει τεράστιο ενδιαφέρον και θα συνεχίσει να εξελίσσεται ραγδαία τα επόμενα χρόνια. Ήδη, στην αγορά διατίθενται μοντέλα όλο και μεγαλύτερης ισχύος, με μοντέλα ισχύος 15MW να έχουν κατασκευαστεί.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Εκδόσεις-Δημοσιεύσεις

- Soukissian, T., Karathanasi, F., Axaopoulos, P., 2016, "Satellite-Based Offshore Wind Resource Assessment in the Mediterranean Sea", IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. PP, no. 99, pp.1-14, <http://dx.doi.org/10.1109/JOE.2016.2565018>
- Kouli, R., Soukissian, T., 2016, "Τεχνοοικονομική Ανάλυση Σκοπιμότητας και Βιωσιμότητας από τη Χωροθέτηση ενός Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου στον Ελλαδικό Χώρο "
- Wind Turbine Aerodynamics and Flow Control Karthik Jayanarasimhan and Vignesh Subramani-Mahalakshmi, Published: May 22nd, 2022 DOI: 10.5772/intechopen.103930
- Vaishali Sohoni, S. C. Gupta, and R. K. Nema, Department of Electrical Engineering, Maulana Azad National Institute of Technology, Bhopal 462051, India Review Article, 12 June 2016, A Critical Review on Wind Turbine Power Curve Modelling Techniques and Their Applications in Wind Based Energy Systems, Hindawi Publishing Corporation Journal of Energy Volume 2016, Article ID 8519785
- Καλογεροπούλου Τζαννέτα, "Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα", Μάρτιος 2010, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Ρευστών
- Hale Cetinay, Fernando A. Kuipers, A. Nezh Guven, "Optimal siting and sizing of wind farms", Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science, Delft University of Technology, 2628 CD Delft, The Netherlands and Department of Electrical and Electronics Engineering, Middle East Technical University, 06800, Ankara, Turkey, 2017
- The feasibility study of offshore wind energy potential in Kijal, Malaysia: the new alternative energy source exploration in Malaysia, 2014
- W. RICHARD POWELL Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University, Johns Hopkins Road, Laurel, MD 20810, U.S.A., 29 July 1980, An analytical expression for the average output power of a wind machine W. RICHARD POWELL Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University, Johns Hopkins Road, Laurel, MD 20810, U.S.A., 29 July 1980
- Chaviaropoulos P., and Natarajan A., 2014. Definition of Performance Indicators (PIs) and Target Values. Deliverable D1.2.2 Dissemination Level PU, Innwind.EU. Department of Environmental & Natural Resources Management, University of Patras, Chaviaropoulos P., and Natarajan A., 2014. 30100 Agrinio, Greece
- Ζητουνιάτης Γεώργιος, 2019, "Επιπτώσεις της αιολικής Ενέργειας στο Περιβάλλον και στην αισθητική του τοπίου. Τμήμα Μηχανικών Χωροταξίας και Ανάπτυξης Πολυτεχνική σχολή Α.Π.Θ..
- Authors Ki-Yong, Oha Ji-Young, KimaJun-Shin Leea, Ki-Wahn Ryub Wind resource assessment around Korean Peninsula for feasibility study on 100 MW class offshore wind farm, Authors Ki-Yong, Oha Ji-Young, KimaJun-Shin Leea, Ki-Wahn Ryub.
- W. Richard Powell 1980, An analytical expression for the average output power of a wind machine

Διαδικτυακοί χώροι

- modelling of wind turbines, Vinay Thapar, Gayatri Agnihotri, Vinod Krishna Sethin
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148111001303?via%3DiHub>
- https://www.thewindpower.net/turbines_manufacturers_2_en.php
- Wind resource assessment around Korean Peninsula for feasibility study on 100 MW class offshore wind farm, Authors Ki-Yong, Oha Ji-Young, KimaJun-Shin Leea, Ki-Wahn Ryub
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148111004551>
- <https://www.empireengineering.co.uk/semi-submersible-spar-and-tlp-floating-wind-foundations/>
- <https://www.capital.gr/epixeiriseis/3532231/ependusi-2-dis-euro-gia-offshore-aioliko-sti-limno>
- <https://www.windpowerengineering.com/comparing-offshore-wind-turbine-foundations/>
- <https://www.empireengineering.co.uk/semi-submersible-spar-and-tlp-floating-wind-foundations/>
- <https://pdf.archiexpo.com/pdf/vestas/vestas-v164-80-mw/88087-134417.html>
- <https://en.wind-turbine-models.com/powercurves>
- <https://www.neuraldesigner.com/learning/examples/wind-turbine-power-curve>
- <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ese3.656>
- <https://www.wind-watch.org/documents/how-turbulence-can-impact-power-performance/>
- COCONET - Towards COast to COast NETworks of Marine Protected Areas, Coupled with Sea-Based Wind Energy Potential - Offshore Wind Farm development in the Mediterranean and Black Seas: <http://www.coconet-fp7.eu/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Aerodyn SCD 8.0/168	Μ.Ο. ωρών λειτουργίας ανά έτος	Πιθανότητα	Ισχύς	Ενέργεια (MWh)
Ταχύτητα				
0	140	1,6	0	0,0
1	377	4,3	0	0,0
2	542	6,2	0	0,0
3	637	7,3	0	0,0
4	711	8,1	100	71,1
5	745	8,5	500	372,5
6	762	8,7	1000	762,0
7	730	8,3	2000	1460,0
8	677	7,7	3000	2031,0
9	647	7,4	4000	2588,0
10	601	6,9	5000	3005,0
11	560	6,4	6000	3360,0
12	518	5,9	7500	3885,0
13	518	5,9	8000	4144,0
14	439	5,0	8000	3512,0
15	338	3,9	8000	2704,0
16	242	2,8	8000	1936,0
17	183	2,1	8000	1464,0
18	132	1,5	8000	1056,0
19	86	1,0	8000	688,0
20	62	0,7	8000	496,0
21	43	0,5	8000	344,0
22	29	0,3	8000	232,0
23	16	0,2	8000	128,0
24	9	0,1	8000	72,0
25	7	0,1	0	0,0
26	6	0,1	0	0,0
27	3	0,0	0	0,0
28	1	0,0	0	0,0
29	0	0,0	0	0,0
30	0	0,0	0	0,0

Multibrid M5000	Μ.Ο. ωρών λειτουργίας ανά έτος	Πιθανότητα	Ισχύς	Ενέργεια (MWh)
Ταχύτητα				
0	140	1,6	0	0,0
1	377	4,3	0	0,0
2	542	6,2	0	0,0

3	637	7,3	0	0,0
4	711	8,1	100	71,1
5	745	8,5	330	245,9
6	762	8,7	560	426,7
7	730	8,3	1000	730,0
8	677	7,7	1470	995,2
9	647	7,4	1980	1281,1
10	601	6,9	2800	1682,8
11	560	6,4	4000	2240,0
12	518	5,9	4800	2486,4
13	429	4,9	5000	2145,0
14	326	3,7	5000	1630,0
15	236	2,7	5000	1180,0
16	180	2,1	5000	900,0
17	127	1,4	5000	635,0
18	82	0,9	5000	410,0
19	61	0,7	5000	305,0
20	40	0,5	5000	200,0
21	28	0,3	5000	140,0
22	14	0,2	5000	70,0
23	9	0,1	5000	45,0
24	7	0,1	5000	35,0
25	6	0,1	5000	30,0
26	2	0,0	0	0,0
27	1	0,0	0	0,0
28	0	0,0	0	0,0
29	0	0,0	0	0,0
30	0	0,0	0	0,0

Ηλιοδα 150-6MW Ταχύτητα	Μ.Ο. ωρών λειτουργίας ανά έτος	Πιθανότητα	Ισχύς	Ενέργεια (MWh)
0	140	1,6	0	0,0
1	377	4,3	0	0,0
2	542	6,2	0	0,0
3	637	7,3	130	82,8
4	711	8,1	265	188,4
5	745	8,5	520	387,4
6	762	8,7	1000	762,0
7	730	8,3	1400	1022,0
8	677	7,7	2100	1421,7
9	647	7,4	2700	1746,9
10	601	6,9	3400	2043,4

11	560	6,4	4200	2352,0
12	518	5,9	5100	2641,8
13	429	4,9	6000	2574,0
14	326	3,7	6000	1956,0
15	236	2,7	6000	1416,0
16	180	2,1	6000	1080,0
17	127	1,4	6000	762,0
18	82	0,9	6000	492,0
19	61	0,7	6000	366,0
20	40	0,5	6000	240,0
21	28	0,3	6000	168,0
22	14	0,2	6000	84,0
23	9	0,1	6000	54,0
24	7	0,1	6000	42,0
25	6	0,1	6000	36,0
26	2	0,0	0	0,0
27	1	0,0	0	0,0
28	0	0,0	0	0,0
29	0	0,0	0	0,0
30	0	0,0	0	0,0

Gamesa G-128- 5.0MW	Μ.Ο. ωρών λειτουργίας ανά έτος	Πιθανότητα	Ισχύς	Ενέργεια (MWh)
Ταχύτητα				
0	140	1,6	0	0,0
1	377	4,3	0	0,0
2	542	6,2	25	13,6
3	637	7,3	59	37,6
4	711	8,1	195	138,6
5	745	8,5	420	312,9
6	762	8,7	786	598,9
7	730	8,3	1296	946,1
8	677	7,7	1943	1315,4
9	647	7,4	2699	1746,3
10	601	6,9	3487	2095,7
11	560	6,4	4174	2337,4
12	518	5,9	4639	2403,0
13	429	4,9	4875	2091,4
14	326	3,7	4965	1618,6
15	236	2,7	5000	1180,0
16	180	2,1	5000	900,0
17	127	1,4	5000	635,0
18	82	0,9	5000	410,0

19	61	0,7	5000	305,0
20	40	0,5	5000	200,0
21	28	0,3	5000	140,0
22	14	0,2	5000	70,0
23	9	0,1	5000	45,0
24	7	0,1	5000	35,0
25	6	0,1	5000	30,0
26	2	0,0	5000	10,0
27	1	0,0	5000	5,0
28	0	0,0	0	0,0
29	0	0,0	0	0,0
30	0	0,0	0	0,0

Gamesa G-128- 8.0MW	Μ.Ο. ωρών λειτουργίας ανά έτος	Πιθανότητα	Ισχύς	Ενέργεια (MWh)
0	140	1,6	0	0,0
1	377	4,3	0	0,0
2	542	6,2	0	0,0
3	637	7,3	48	30,6
4	711	8,1	169	120,2
5	745	8,5	593	441,8
6	762	8,7	1307	995,9
7	730	8,3	2186	1595,8
8	677	7,7	3278	2219,2
9	647	7,4	4687	3032,5
10	601	6,9	6112	3673,3
11	560	6,4	7249	4059,4
12	518	5,9	8000	4144,0
13	429	4,9	8000	3432,0
14	326	3,7	8000	2608,0
15	236	2,7	8000	1888,0
16	180	2,1	8000	1440,0
17	127	1,4	8000	1016,0
18	82	0,9	8000	656,0
19	61	0,7	8000	488,0
20	40	0,5	8000	320,0
21	28	0,3	8000	224,0
22	14	0,2	8000	112,0
23	9	0,1	8000	72,0
24	7	0,1	8000	56,0
25	6	0,1	8000	48,0
26	2	0,0	0	0,0
27	1	0,0	0	0,0

28	0	0,0	0	0,0
29	0	0,0	0	0,0
30	0	0,0	0	0,0

Vestas v164- 8.0MW	Μ.Ο. ωρών λειτουργίας ανά έτος	Πιθανότητα	Ισχύς	Ενέργεια (MWh)
Ταχύτητα				
0	0	0,0	0	0,0
1	139	1,6	0	0,0
2	375	4,3	0	0,0
3	539	6,2	72	38,8
4	635	7,2	313	198,8
5	707	8,1	710	502,0
6	744	8,5	1297	965,0
7	760	8,7	2111	1604,4
8	728	8,3	3135	2282,3
9	677	7,7	4277	2895,5
10	647	7,4	5469	3538,4
11	603	6,9	6548	3948,4
12	560	6,4	7290	4082,4
13	518	5,9	7733	4005,7
14	434	5,0	7947	3449,0
15	333	3,8	8000	2664,0
16	238	2,7	8000	1904,0
17	186	2,1	8000	1488,0
18	130	1,5	8000	1040,0
19	84	1,0	8000	672,0
20	61	0,7	8000	488,0
21	42	0,5	8000	336,0
22	28	0,3	8000	224,0
23	15	0,2	8000	120,0
24	9	0,1	8000	72,0
25	7	0,1	8000	56,0
26	6	0,1	0	0,0
27	3	0,0	0	0,0
28	1	0,0	0	0,0
29	0	0,0	0	0,0
30	0	0,0	0	0,0

Vestas v164- 9.5MW	Μ.Ο. ωρών λειτουργίας ανά έτος	Πιθανότητα	Ισχύς	Ενέργεια (MWh)
Ταχύτητα				
0	0	0,0	0	0,0
1	139	1,6	0	0,0
2	375	4,3	0	0,0
3	539	6,2	100	53,9
4	635	7,2	249	158,1
5	707	8,1	613	433,4
6	744	8,5	1226	912,1
7	760	8,7	2030	1542,8
8	728	8,3	3123	2273,5
9	677	7,7	4444	3008,6
10	647	7,4	5900	3817,3
11	603	6,9	7299	4401,3
12	560	6,4	8601	4816,6
13	518	5,9	9272	4802,9
14	434	5,0	9500	4123,0
15	333	3,8	9500	3163,5
16	238	2,7	9500	2261,0
17	186	2,1	9500	1767,0
18	130	1,5	9500	1235,0
19	84	1,0	9500	798,0
20	61	0,7	9500	579,5
21	42	0,5	9500	399,0
22	28	0,3	9500	266,0
23	15	0,2	9500	142,5
24	9	0,1	9500	85,5
25	7	0,1	9500	66,5
26	6	0,1	0	0,0
27	3	0,0	0	0,0
28	1	0,0	0	0,0
29	0	0,0	0	0,0
30	0	0,0	0	0,0