



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΊΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ**  
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.



ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη Εγκατάστασης Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου στην  
Αλεξανδρούπολη**

ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ:

Όνοματεπώνυμο Φοιτήτριας: Θεοδώρα Συρίδου (Α.Μ.:5889)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Όνοματεπώνυμο Καθηγητή: κ. Κατσαπρακάκης Δημήτριος

ΗΡΑΚΛΕΙΟ, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2018



**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΊΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ**  
**Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών**  
**Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Μελέτη Εγκατάστασης Υπεράκτιου Αιολικού Πάρκου στην  
Αλεξανδρούπολη**

**ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ:**

**Όνοματεπώνυμο Φοιτήτριας: Θεοδώρα Συρίδου (Α.Μ.:5889)**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:**

**Όνοματεπώνυμο Καθηγητή: κ. Κατσαπρακάκης Δημήτριος**

**ΗΡΑΚΛΕΙΟ, ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2018**



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ  
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.

## Ευχαριστίες

Με το πέρας της εργασίας αυτής θέλω να ευχαριστήσω τους συντελεστές που βοήθησαν στην ολοκλήρωσή της. Αρχικά τον κ. Κατσαπρακάκη Δημήτριο, Καθηγητή του ΤΕΙ Κρήτης και επιβλέποντα της εργασίας αυτής, για την παροχή υλικού και πολύτιμων συμβουλών, βάσει των οποίων υλοποιήθηκε η μελέτη. Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου, για την υλική και ηθική συμπαράσταση σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.



## Περίληψη

Η συνεχώς αυξανόμενη υποβάθμιση του περιβάλλοντος από την ανθρώπινη δραστηριότητα έχει οδηγήσει τις τελευταίες δεκαετίες πλήθος χωρών στην παραγωγή ενέργειας μέσω ανανεώσιμων πηγών. Στην εργασία αυτή πραγματοποιείται μια μελέτη περίπτωσης για την εγκατάσταση υπεράκτιου αιολικού πάρκου στον κόλπο της Αλεξανδρούπολης. Αρχικά εξετάζονται οι τρέχουσες συνθήκες γύρω από την εφαρμογή αιολικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας σε διάφορες χώρες της Ευρώπης και ειδικά στην Ελλάδα. Σχολιάζονται οι υπάρχουσες υποδομές και εντοπίζονται πλεονεκτήματα και αδυναμίες που τις συνοδεύουν, τεχνικού και μη χαρακτήρα. Ακολουθεί περιγραφή της λειτουργίας των ανεμογεννητριών, καθώς και των διαφορετικών τεχνολογιών που έχουν αναπτυχθεί μέχρι και σήμερα. Έπειτα, εξετάζεται μια μελέτη περίπτωσης για την εγκατάσταση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου στον κόλπο της Αλεξανδρούπολης. Η μελέτη αυτή αφορά το σχεδιασμό και τις προδιαγραφές που θα πρέπει να καλύπτει το πάρκο, με πλήρη ενεργειακό σχεδιασμό του σε επίπεδο προμελέτης και έπειτα διενεργείται μια ανάλυση κόστους, απ' όπου προκύπτει το κόστος μιας τέτοιας εγκατάστασης, καθώς και η δυνατότητα απόσβεσής του εντός του διαστήματος λειτουργίας του. Ο σχεδιασμός και η ανάλυση κόστους πραγματοποιούνται για δύο πιθανά μοντέλα ανεμογεννήτριας, με στόχο την εύρεση του ενεργειακά και οικονομικά βέλτιστου. Τέλος, για το βέλτιστο μοντέλο ανεμογεννήτριας το αιολικό πάρκο προσομοιώνεται στο λογισμικό WAsP, όπου υλοποιείται αναλυτικός ενεργειακός υπολογισμός του.

## Λέξεις-κλειδιά

Ανεμογεννήτρια, Υπεράκτιο αιολικό πάρκο, Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.



## **Abstract**

The ongoing environmental degradation caused by human activity has led many countries into relying on renewable energy sources, in the last decades. In this thesis, a case study is implemented, concerning the installation of an offshore wind power farm in the bay of Alexandroupolis. Firstly, the current conditions of wind-producing systems in many European countries are examined, with special respect to Greece. Then, the existing infrastructure regarding wind-energy is described, and its merits and demerits are isolated, either they are of a technical nature, or not. From that point on, the operation of a wind-turbine is discussed and the variety of different technologies that have been developed so far is described. Continuing to more specific matters, a case study is carried out, concerning the installation of an offshore wind farm in the bay of Alexandroupolis. The study examines the design of the installation and the requirements that have to be accommodated in engineering terms, followed by a preliminary cost analysis, which aims to assess the ability of the wind power farm to pay its own cost, throughout the years of its operation. The design and the cost analysis are carried out for two candidate wind turbine models, in search of the optimal one, from an energy and a financial standpoint. Then, for the wind turbine model that is deemed optimal, the offshore wind farm is simulated in the WAsP software package, where a full energy study is implemented.

## **Keywords**

Wind-turbine; Offshore wind power farm; Renewable energy sources.



## Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1	Ο ρόλος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ευρώπη	1
1.2	Πολιτικές	1
1.3	Δράσεις	3
1.4	Κράτη μέλη	4
1.4.1	Γερμανία	4
1.4.2	Ιταλία	6
1.4.3	Λιθουανία	8
1.4.4	Πορτογαλία	8
1.4.5	Ισπανία	9
1.4.6	Ηνωμένο Βασίλειο	10
<b>Κεφάλαιο 2</b>	<b>Αιολική ενέργεια</b>	<b>14</b>
2.1	Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα	14
2.1.1	Αξιοποίηση αιολικής ενέργειας	14
2.2	Υποδομές	16
2.3	Υπεράκτιο αιολικό πάρκο	17
2.3.1	Ελλάδα	18
2.3.2	Ευρώπη	19
2.4	Πλεονεκτήματα υπεράκτιας αιολικής ενέργειας συγκριτικά με τα αιολικά πάρκα στη στεριά	25
2.5	Επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην τοπική κοινωνία	27
2.6	Παράγοντες ανάπτυξης της υπεράκτιας τεχνολογίας	30
2.6.1	Ο πάγος	31
2.6.2	Η Διάβρωση	32
<b>Κεφάλαιο 3</b>	<b>Δομή, μεταφορά και εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε υπεράκτια αιολικά πάρκα</b>	<b>34</b>
3.1	Δομή των ανεμογεννητριών	34
3.2	Κατηγορίες ανεμογεννητριών	36
3.2.1	Επιλογή βάσει της θέσης της γεννήτριας	36
3.2.2	Επιλογή βάσει του προσανατολισμού τους στον άνεμο	38
3.2.3	Επιλογή βάσει του αριθμού των πτερυγίων τους	39
3.2.4	Επιλογή βάσει της μεθόδου για τον έλεγχο της ισχύος	40
3.3	Ηλεκτρικό μέρος ανεμογεννήτριας	41
3.3.1	Ανεμογεννήτριες ασύγχρονης γεννήτριας σταθερών στροφών	41
3.3.2	Ανεμογεννήτριες ασύγχρονης γεννήτριας μεταβλητών στροφών	42
3.3.3	Ανεμογεννήτριες σύγχρονης γεννήτριας μεταβλητών στροφών	43
3.4	Θεμελίωση των πύργων	43



3.4.1	Θεμελίωση μονού πυλώνα (monopile).....	44
3.4.2	Θεμελίωση βαρύτητας.....	45
3.4.3	Θεμελίωση τύπου “Jacket”.....	45
<b>3.5</b>	<b>Μεταφορά των αιολικών μηχανών .....</b>	<b>46</b>
3.5.1	Τρόποι μεταφοράς στην υπεράκτια θέση .....	46
3.5.2	Μεταφορά των διαφόρων μερών σε βήματα.....	47
3.5.3	Τυπικά μέσα μεταφοράς και εγκατάστασης.....	47
<b>3.6</b>	<b>Εγκατάσταση των αιολικών μηχανών .....</b>	<b>49</b>
3.6.1	Εγκατάσταση του πύργου.....	49
3.6.2	Εγκατάσταση του ρότορα.....	49
3.6.3	Εγκατάσταση των καλωδίων.....	50
3.6.4	Υπεράκτια εγκατάσταση ανεμογεννήτριας σε βήματα .....	51
3.6.5	Παράγοντες χωρητικότητας & διαθεσιμότητας κατά την εγκατάσταση.....	51
<b>3.7</b>	<b>Παράγοντες καθυστέρησης στην εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων.....</b>	<b>52</b>
<b>3.8</b>	<b>Συνοπτική περιγραφή διαφορετικών διατάξεων εγκατάστασης.....</b>	<b>53</b>
<b>3.9</b>	<b>Αναλυτική περιγραφή διαφορετικών διατάξεων εγκατάστασης .....</b>	<b>54</b>
3.9.1	Διάταξη 1 - Εγκατάσταση των κυρίως μερών χωριστά.....	55
3.9.2	Διάταξη 2 - Εγκατάσταση της θεμελίωσης, στη συνέχεια του προ-συναρμολογημένου πύργου με το κιβώτιο και τέλος του ρότορα χωριστά.....	56
3.9.3	Διάταξη 3 – Εγκατάσταση της θεμελίωσης, στη συνέχεια του πύργου και τέλος του κιβωτίου μαζί με το ρότορα.....	57
3.9.4	Διάταξη 4 – Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης με τον πύργο και έπειτα του κιβωτίου και του ρότορα .....	58
3.9.5	Διάταξη 5 – Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης με τον πύργο και έπειτα του προ-συναρμολογημένου κιβωτίου με το δρομέα.....	59
3.9.6	Διάταξη 6 – Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης με τον πύργο και το κιβώτιο και έπειτα του ρότορα .....	59
3.9.7	Διάταξη 7 – Εγκατάσταση της θεμελίωσης και στη συνέχεια του προ-συναρμολογημένου πύργου, του κιβωτίου και του ρότορα.....	60
3.9.8	Διάταξη 8 – Εγκατάσταση της πλήρους προ-συναρμολογημένης αιολικής μηχανής στην τελική υπεράκτια θέση εγκατάστασης.....	61
<b>3.10</b>	<b>Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διατάξεων .....</b>	<b>62</b>
3.10.1	Διάταξη 1 - Εγκατάσταση των κυρίως μερών χωριστά.....	62
3.10.2	Διάταξη 2 - Εγκατάσταση της θεμελίωσης, στη συνέχεια του προ-συναρμολογημένου πύργου με το κιβώτιο και τέλος του ρότορα χωριστά.....	63
3.10.3	Διάταξη 3 – Εγκατάσταση της θεμελίωσης, στη συνέχεια του πύργου και τέλος του κιβωτίου μαζί με το ρότορα.....	63
3.10.4	Διάταξη 4 – Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης με τον πύργο και έπειτα του κιβωτίου και του ρότορα .....	63



3.10.5	Διάταξη 5 – Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης με τον πύργο και έπειτα του προ-συναρμολογημένου κιβωτίου με το δρομέα.....	64
3.10.6	Διάταξη 6 – Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης με τον πύργο και το κιβώτιο και έπειτα του ρότορα .....	64
3.10.7	Διάταξη 7 – Εγκατάσταση της θεμελίωσης και στη συνέχεια του προ-συναρμολογημένου πύργου, του κιβωτίου και του ρότορα .....	64
3.10.8	Διάταξη 8 – Εγκατάσταση της πλήρους προ-συναρμολογημένης αιολικής μηχανής στην τελική υπεράκτια θέση εγκατάστασης.....	65
<b>Κεφάλαιο 4</b>	<b>Μελέτη υπεράκτιου πάρκου στην Αλεξανδρούπολη .....</b>	<b>66</b>
<b>4.1</b>	<b>Χαρακτηριστικά του ανέμου .....</b>	<b>66</b>
<b>4.2</b>	<b>Βασικοί υπολογισμοί και έννοιες.....</b>	<b>67</b>
4.2.1	Αιολική ενέργεια .....	67
4.2.2	Κατανομή Weibull .....	67
4.2.3	Το όριο του Betz.....	68
<b>4.3</b>	<b>Αιολικό δυναμικό.....</b>	<b>69</b>
4.3.1	Μετρήσεις αιολικού δυναμικού.....	69
4.3.2	Εύρεση της κύριας διεύθυνσης του ανέμου .....	72
<b>4.4</b>	<b>Κριτήρια επιλογής και μελέτης αιολικού πάρκου .....</b>	<b>73</b>
4.4.1	Τα κριτήρια επιλογής περιοχής μελέτης αιολικού πάρκου .....	74
4.4.2	Πρόσβαση περιοχής .....	74
4.4.3	Κριτήριο επιλογής ανεμογεννήτριας .....	74
4.4.4	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις .....	75
4.4.5	Επιλογή οικοπέδου για την πραγματοποίηση της μελέτης του αιολικού πάρκου .....	75
4.4.6	Παραγόμενη ισχύς ανεμογεννήτριας.....	76
<b>4.5</b>	<b>Προτεινόμενη εγκατάσταση .....</b>	<b>76</b>
4.5.1	Επιλογή του οικοπέδου εγκατάστασης.....	76
4.5.2	Προτεινόμενες ανεμογεννήτριες .....	77
4.5.3	Διάταξη ανεμογεννητριών .....	80
4.5.4	Συνολική παραγωγή ενέργειας του αιολικού πάρκου .....	82
4.5.5	Οπτική Όχληση .....	88
<b>4.6</b>	<b>Διασύνδεση με το χερσαίο δίκτυο .....</b>	<b>90</b>
4.6.1	Πρώτο επίπεδο.....	90
4.6.2	Δεύτερο επίπεδο .....	90
4.6.3	Τρίτο επίπεδο.....	92
<b>Κεφάλαιο 5</b>	<b>Οφέλη και κόστος.....</b>	<b>93</b>
<b>5.1</b>	<b>Κόστος.....</b>	<b>93</b>
5.1.1	Ανεμογεννήτριες .....	93
5.1.2	Οικόπεδο .....	93





5.1.3	Μεταφορά – Εγκατάσταση Ανεμογεννητριών .....	93
5.1.4	Δαπάνες πολιτικού μηχανικού.....	93
5.1.5	Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός .....	94
5.1.6	Έξοδα τεχνικών-συμβούλων .....	94
5.1.7	Κόστος διασύνδεσης .....	95
5.1.8	Τραπεζικά έξοδα.....	95
5.1.9	Επιπλέον Δαπάνες ανά έτος .....	96
<b>5.2</b>	<b>Απόσβεση έργου.....</b>	<b>96</b>
5.2.1	Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας .....	96
5.2.2	Καθαρή ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.....	96
5.2.3	Υπολογισμός καθαρού κέρδους και απόσβεση .....	96
<b>Κεφάλαιο 6</b>	<b>Ενεργειακή μελέτη του αιολικού πάρκου στο WAsP .....</b>	<b>98</b>
<b>6.1</b>	<b>Υπορουτίνες του WAsP.....</b>	<b>98</b>
6.1.1	WAsP Map Editor .....	98
6.1.2	Observed Wind Climate (OWC) Wizard.....	98
6.1.3	WAsP Turbine Editor .....	101
<b>6.2</b>	<b>Ιεραρχική δομή ενός έργου στο WAsP .....</b>	<b>102</b>
6.2.1	Χώρος εργασίας (Workspace).....	102
6.2.2	Ανάλυση εδάφους (Terrain analysis) .....	103
6.2.3	Γενικευμένο κλίμα ανέμου (Generalized wind climate) .....	103
6.2.4	Αιολικό πάρκο (Wind farm) .....	103
6.2.5	Εμπόδια (Obstacles) .....	104
6.2.6	Χάρτης πόρων (Resource grid) .....	104
<b>6.3</b>	<b>Αποτελέσματα .....</b>	<b>105</b>
6.3.1	Αιολικό δυναμικό .....	105
6.3.2	Ετήσια παραγωγή ενέργειας (Annual Energy Production) .....	106
<b>Κεφάλαιο 7</b>	<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>110</b>
<b>Παράρτημα Α.....</b>	<b>.....</b>	<b>111</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>.....</b>	<b>112</b>



## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Συνολική εγκατεστημένη και παραγόμενη ισχύς από αιολική ενέργεια (από τις παράκτιες εγκαταστάσεις).....	6
Πίνακας 1.2: Στόχος 2020 για ανανεώσιμες πηγές, Ιταλία .....	6
Πίνακας 1.3: Εγκατεστημένη αιολική ισχύς-μεταβολή ανά έτος, Ιταλία.....	7
Πίνακας 1.4: Ποσοστό ενέργειας ανά πηγή, Λιθουανία .....	8
Πίνακας 1.5: Εγκατεστημένη και παραγόμενη ισχύς από αιολική ενέργεια, Λιθουανία 2007-2013.....	8
Πίνακας 1.6: Συνεισφορά της ανανεώσιμης ενέργειας στις συνολικές απαιτήσεις ενέργειας, ποσοστό κάλυψης, Ισπανία. ....	10
Πίνακας 1.7: Αιολική ενέργεια στην Ισπανία, εγκατεστημένη ισχύς και παραγωγή. ....	10
Πίνακας 1.8: Εγκατεστημένη ισχύς, παραγόμενη ισχύς, ποσοστό χρήσης, Ηνωμένο Βασίλειο 2009-2016. ...	13
Πίνακας 2.1: Συνολική αιολική ισχύς ανά νομό (μητρώο αδειών παραγωγής ενέργειας ΚΑΠΕ). ....	15
Πίνακας 2.2: Αιτήσεις για χορήγηση άδειας παραγωγής ενέργειας από αιολικά πάρκα (Απρίλιος 2008).. ....	16
Πίνακας 2.3: Επενδύσεις σε αιολικά πάρκα, Ευρώπη 2016.....	25
Πίνακας 3.1: Παράγοντες καθυστέρησης οι οποίοι επηρεάζουν τη διάρκεια κατασκευής <sup>95</sup> . ....	53
Πίνακας 4.1: Μετρήσεις αιολικού δυναμικού στη περιοχή της Αλεξανδρούπολης (2015). ....	70
Πίνακας 4.2: Καμπύλες ισχύος για τις προτεινόμενες ανεμογεννήτριες.....	79
Πίνακας 4.3: Ετήσια παραγόμενη Ενέργεια της Gamesa G114-2.0MW .....	85
Πίνακας 4.4: Ετήσια παραγόμενη Ενέργεια της Vestas V110-2.0MW .....	86
Πίνακας 4.5: Στοιχεία παραγωγής ενέργειας. ....	88
Πίνακας 5.1: Κόστος εγκατάστασης. ....	95
Πίνακας 5.2: Καθαρό κέρδος και απόσβεση. ....	97
Πίνακας 6.1: Ανεμολογικές παράμετροι για διαφορετικά υψόμετρα & τιμές τραχύτητας. ....	99
Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά του ανέμου στο υψόμετρο τοποθέτησης των ανεμογεννητριών. ....	106
Πίνακας 6.3: Συνολική παραγόμενη ενέργεια και απώλειες. ....	106
Πίνακας 6.4: Καθαρή παραγόμενη ενέργεια και απώλειες ανά ανεμογεννήτρια.....	107



## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Ποσοστό ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ανά χώρα της Ευρώπης και Τουρκία .....	1
Σχήμα 1.2: Κατάταξη χωρών ΕΕ σε συνάρτηση με τον στόχο του 2020.....	3
Σχήμα 1.3: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ποσοστό ανά πηγή, έτος 2014, Γερμανία .....	5
Σχήμα 1.4: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ποσοστό ανά πηγή, έτος 2015, Ιταλία .....	7
Σχήμα 1.5: Φωτοβολταϊκός σταθμός Amareleja, Πορτογαλία.....	9
Σχήμα 1.6: Εγκατεστημένη ισχύς (MW) από ΑΠΕ, Ηνωμένο Βασίλειο 2000 έως 2015 .....	11
Σχήμα 1.7: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh) από ΑΠΕ, Ηνωμένο Βασίλειο 2000 έως 2015.....	12
Σχήμα 2.1: Χάρτης αιολικού δυναμικού .....	14
Σχήμα 2.2: Τα αιολικά πάρκα στην Ελλάδα .....	17
Σχήμα 2.3: Υπεράκτιο αιολικό πάρκο.....	18
Σχήμα 2.4: Εγκατεστημένη ισχύς σε kWh ανά 1000 κατοίκους στις χώρες της Ε.Ε.....	20
Σχήμα 2.5: Άμεσες θέσεις απασχόλησης στην αιολική ενέργεια στην Ε.Ε. ....	21
Σχήμα 2.6: HornsRev 2 – Σχέδιο εγκατάστασης.....	22
Σχήμα 2.7: Thanet – Τοποθεσία πάρκου.....	23
Σχήμα 2.8: Thanet– Εγκαταστάσεις.....	24
Σχήμα 2.9: Επενδύσεις σε αιολικά πάρκα 2010-2016.....	25
Σχήμα 2.10: Επιπτώσεις υπεράκτιου αιολικού πάρκου στο περιβάλλον.....	27
Σχήμα 2.11: Επίδραση μαγνητικών πεδίων με βάση την απόσταση.....	29
Σχήμα 2.12: Επιπτώσεις υπεράκτιου αιολικού πάρκου στο περιβάλλον.....	30
Σχήμα 2.13: Ανεμογεννήτρια καλυμμένη από πάγο.....	31
Σχήμα 2.14: Το φαινόμενο της διάβρωσης στις ανεμογεννήτριες.....	32
Σχήμα 3.1: Η δομή της ανεμογεννήτριας.....	35
Σχήμα 3.2: Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα – VAWT.....	37
Σχήμα 3.3: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα – HAWT.....	38
Σχήμα 3.4: Οι δυο κατηγορίες με βάση τη πηγή του ανέμου.....	39
Σχήμα 3.5: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννητριών με βάση τον αριθμό των πτερυγίων.....	40
Σχήμα 3.6: Μεταβολή της κλίσης των πτερυγίων.....	41
Σχήμα 3.7: Κύκλωμα ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών.....	42
Σχήμα 3.8: Κύκλωμα ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών.....	43
Σχήμα 3.9: Κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας μεταβλητών στροφών.....	43
Σχήμα 3.10: Μορφές θεμελίωσης.....	44
Σχήμα 3.11: Ρυμουλκό (Towing Tug).....	47
Σχήμα 3.12: Αυτό-ανυψούμενο πλοίο (Jack-up vessel).....	48
Σχήμα 3.13: Μέθοδοι τοποθέτησης αιολικών μηχανών σε υπεράκτια πάρκα <sup>99</sup> .....	54
Σχήμα 3.14: Διάταξη 1 - Εγκατάσταση των κυρίως μερών χωριστά.....	55
Σχήμα 3.15: Διάταξη 2 - Εγκατάσταση της θεμελίωσης, στη συνέχεια του προ-συναρμολογημένου πύργου με το κιβώτιο και τέλος του ρότορα χωριστά.....	56
Σχήμα 3.16: Διάταξη 3 – Εγκατάσταση της θεμελίωσης, στη συνέχεια του πύργου και τέλος του κιβωτίου μαζί με το ρότορα.....	57
Σχήμα 3.17: Διάταξη 4 – Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης με τον πύργο και έπειτα του κιβωτίου και του ρότορα.....	58
Σχήμα 3.18: Διάταξη 5 – Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης με τον πύργο και έπειτα του προ-συναρμολογημένου κιβωτίου με το δρομέα.....	59
Σχήμα 3.19: Διάταξη 6 – Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης με τον πύργο και το κιβώτιο και έπειτα του ρότορα.....	59
Σχήμα 3.20: Διάταξη 7 – Εγκατάσταση της θεμελίωσης και στη συνέχεια του προ-συναρμολογημένου πύργου, του κιβωτίου και του ρότορα.....	60
Σχήμα 3.21: Μεταφορά αιολικής μηχανής υπό ανάρτηση.....	61



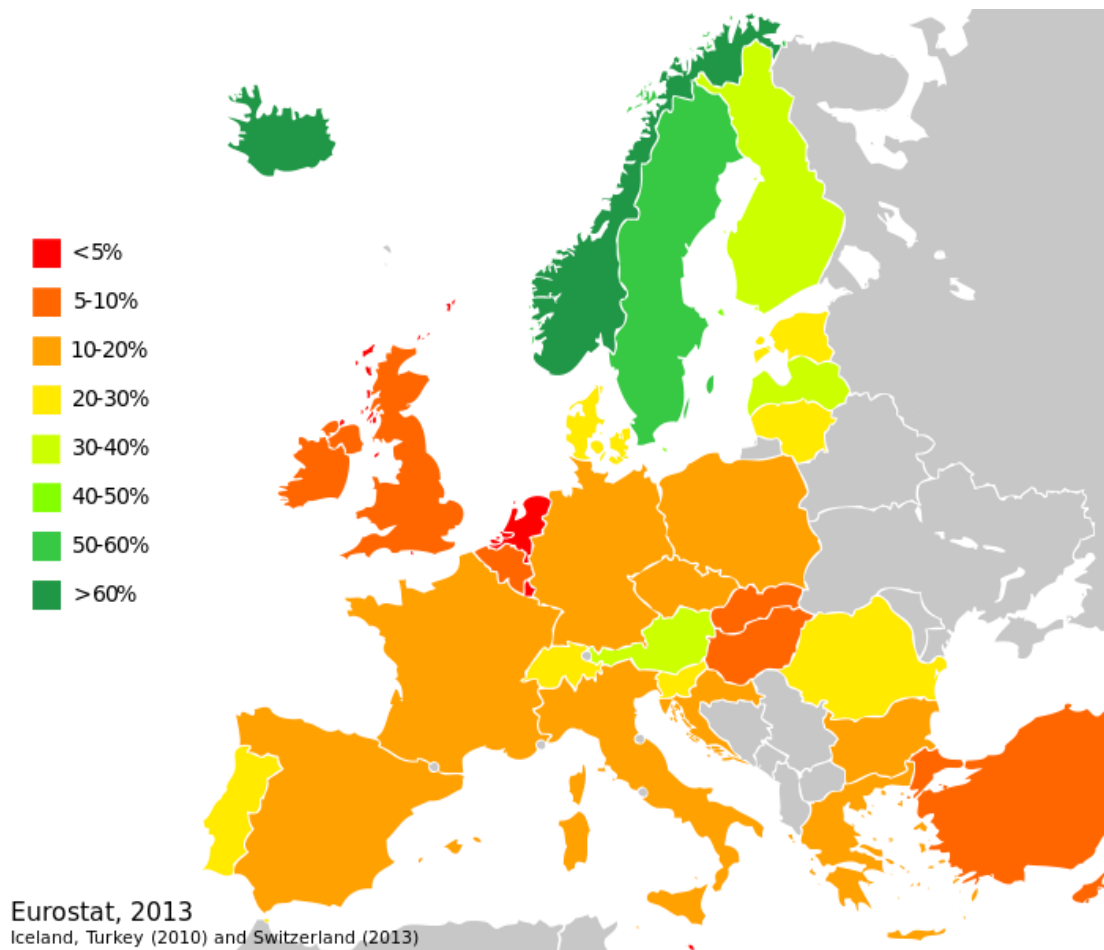
Σχήμα 3.22: Διάταξη 8 – Εγκατάσταση της πλήρους προ-συναρμολογημένης αιολικής μηχανής στην τελική υπεράκτια θέση εγκατάστασης.....	62
Σχήμα 4.1: Τυπική κατανομή Weibull. ....	68
Σχήμα 4.2: Ταχύτητες ανέμου ανά μήνα.....	71
Σχήμα 4.3: Πιθανότητες εμφάνισης ταχυτήτων ανέμου για την περιοχή μελέτης και ύψος 30 m.....	72
Σχήμα 4.4: Ροδόγραμμα Αλεξανδρούπολης (έτος 2015). ....	73
Σχήμα 4.5: Χάρτης Natura 2000, Μακεδονία και Θράκη. ....	75
Σχήμα 4.6: Χωροθέτηση οικοπέδου.....	77
Σχήμα 4.7: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας Gamesa G114. ....	78
Σχήμα 4.8: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας Vestas V110. ....	78
Σχήμα 4.9: Καμπύλες ισχύος για τις προτεινόμενες ανεμογεννήτριες.....	80
Σχήμα 4.10: Τυπική χωροθέτηση ανεμογεννητριών. ....	81
Σχήμα 4.11: Προτεινόμενη χωροθέτηση.....	82
Σχήμα 4.12: Αιολικό δυναμικό της περιοχής μελέτης για ύψη 30 m και 125 m.....	84
Σχήμα 4.13: Ετήσια Παραγόμενη ενέργεια των δύο προτεινόμενων μηχανών. ....	87
Σχήμα 4.14: Υποσταθμός ανύψωσης τάσης.....	91
Σχήμα 4.15: Διάγραμμα μεθόδων συνδεσμολογίας με τη στεριά. ....	91
Σχήμα 5.1: Κόστος εγκατάστασης.....	95
Σχήμα 6.1: Ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής μελέτης από το WAsP.....	100
Σχήμα 6.2: Ροδογράμματα για 16 διευθύνσεις ανέμου από το WAsP. ....	101
Σχήμα 6.3: Χαρακτηριστικά της Gamesa G114-2.0MW από το WAsP Turbine Editor. ....	102
Σχήμα 6.4: Ιεραρχική δομή του χώρου εργασίας.....	103
Σχήμα 6.5: Χάρτης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου.....	104
Σχήμα 6.6: Χάρτης πόρων για μια περιοχή [εγχειρίδιο χρήσης WAsP]. ....	105
Σχήμα 6.7: Εγγύτητα ανεμογεννητριών (Obstacle effects). ....	108
Σχήμα 6.8: Σχηματική απεικόνιση της μικτής παραγόμενης ενέργειας και των απωλειών. ....	109
Σχήμα 6.9: Σχηματική απεικόνιση της καθαρής παραγόμενης ενέργειας και των απωλειών.....	109



## Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

### 1.1 Ο ρόλος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ευρώπη

Οι χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης βρίσκονται πολύ υψηλά στην παγκόσμια λίστα των χωρών που επενδύουν στην ανάπτυξη και την εφαρμογή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι πολύ σημαντική καθώς μπορεί να μειώσει την εξάρτηση των χωρών της ΕΕ από την εισαγωγή ενέργειας από άλλες χώρες και να βοηθήσει στη καταπολέμηση διάφορων φαινομένων όπως είναι η υπερθέρμανση του πλανήτη<sup>1</sup> (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Ποσοστό ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ανά χώρα της Ευρώπης και Τουρκία<sup>2</sup>

### 1.2 Πολιτικές

Με βάση την Συνθήκη του Μάαστριχτ, τέθηκε ως στόχος η προώθηση της σταθερής ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας παράλληλα με την προστασία του περιβάλλοντος. Στη συνέχεια και με τη συνθήκη του Άμστερνταμ προστέθηκε η βιώσιμη ανάπτυξη στους στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Από το

<sup>1</sup>Eurostat. Share of renewable energy in gross final energy consumption. October 2016.

<sup>2</sup>[http://www.econews.gr/wp-content/uploads/2016/02/2\\_10\\_16\\_Brian\\_EURenewables2014.gif](http://www.econews.gr/wp-content/uploads/2016/02/2_10_16_Brian_EURenewables2014.gif)



1997 μέχρι και σήμερα, η ΕΕ έχει εργαστεί ώστε να καταφέρει να παρέχει ένα ποσοστό ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές που ισοδυναμεί με το 12 % της ενεργειακής κατανάλωσης της συνολικής ΕΕ μέχρι το 2010.

Η Σύνοδος Κορυφής του Γιοχάνεσμπουργκ πέτυχε να θέσει συγκεκριμένους στόχους για τον τομέα της ενέργειας, κάτι το οποίο απογοήτευσε πολλές χώρες. Ενώ η ΕΕ είχε προτείνει ετήσια αύξηση της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε ποσοστό 1,5 % σε παγκόσμιο επίπεδο μέχρι το 2010, το σχέδιο δράσης του Γιοχάνεσμπουργκ, δεν προέβλεπε μια τέτοια σημαντική αύξηση και είχε ένα πλάνο χωρίς συγκεκριμένους στόχους και αποτελέσματα.

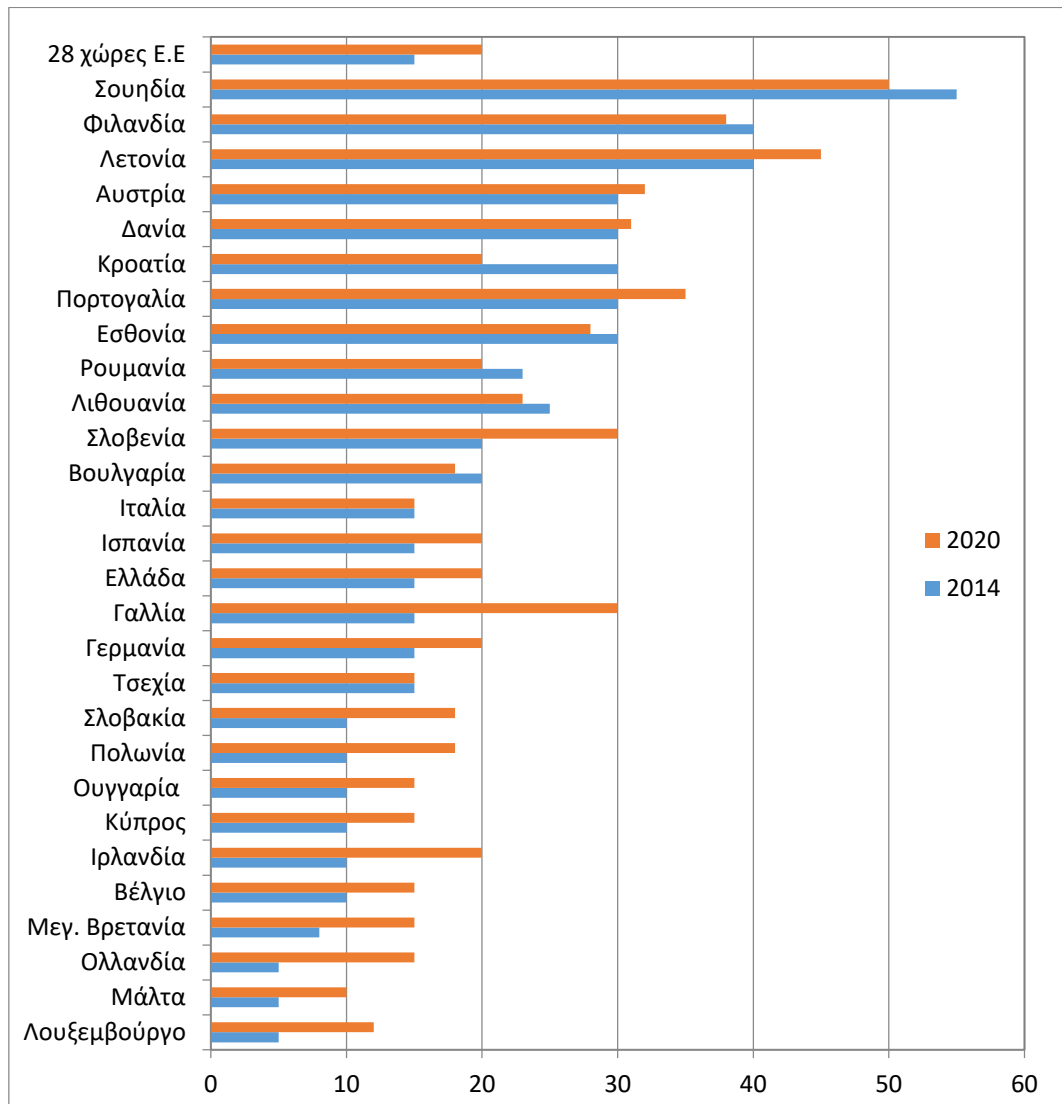
Ωστόσο η ΕΕ δεν ήταν πρόθυμη να αποδεχθεί αυτό το πλάνο και προχώρησε με άλλα έθνη στο σχηματισμό μιας ομάδας "πρωτοπόρων χωρών" που υποσχέθηκε τη δημιουργία φιλόδοξων εθνικών ή ακόμη και περιφερειακών στόχων για την επίτευξη των παγκόσμιων στόχων. Η ένωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Γιοχάνεσμπουργκ (JREC) περιλάμβανε συνολικά περισσότερες από 80 χώρες, με τα κράτη μέλη της ΕΕ, τη Βραζιλία, τη Νότια Αφρική και τη Νέα Ζηλανδία μεταξύ αυτών<sup>3</sup>.

Στην Ευρωπαϊκή Διάσκεψη για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στο Βερολίνο το 2004, η ΕΕ έθεσε φιλόδοξους στόχους, οι οποίοι προέβλεπαν ότι μέχρι το 2020, η ΕΕ θα επιδιώξει να καλύψει το 20 % των συνολικών αναγκών της κατανάλωσης ενέργειας με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Μέχρι εκείνο το σημείο, η ΕΕ είχε μόνο σκετ στόχους έως το 2010, και η πρόταση αυτή ήταν η πρώτη που αντιπροσωπεύει τη δέσμευση της έως το 2020.

Το 2009, η οδηγία για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας από την ΕΕ έθεσε στόχους για τα μέλη της ΕΕ, έτσι ώστε έως το έτος 2020 να έχει εξασφαλιστεί το 20 % της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και ένα ποσοστό 10 % να παρέχεται στον τομέα των μεταφορών. Έως το έτος 2014, η ΕΕ κατάφερε να καλύψει το 16 % των συνολικών της απαιτήσεων σε ενέργεια, με εννέα χώρες να επιτυγχάνουν τους στόχους τους (Σχήμα 1.2).

---

<sup>3</sup>Eurostat. Share of renewable energy in gross final energy consumption. October 2016.



Σχήμα 1.2: Κατάταξη χωρών ΕΕ σε συνάρτηση με τον στόχο του 2020<sup>4</sup>

### 1.3 Δράσεις

Οι δράσεις της ΕΕ για την αποδοτικότερη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας περιλαμβάνουν τα παρακάτω προγράμματα:

- BUILD UP
- Το Σύμφωνο των Δημάρχων
- Sustainable Energy Europe Campaign
- CONCERTO
- Manag Energy

<sup>4</sup> [http://www.econews.gr/wp-content/uploads/2016/02/2\\_10\\_16\\_Brian\\_EURenewables2014.gif](http://www.econews.gr/wp-content/uploads/2016/02/2_10_16_Brian_EURenewables2014.gif)





- Intelligent Energy – Europe (IEE)
- U4energy, μια πρωτοβουλία που χρηματοδοτείται στο πλαίσιο του προγράμματος IEE για τη βελτίωση της ενεργειακής κατανάλωσης στα σχολεία και τις τοπικές τους κοινότητες.
- Eco-innovation<sup>5</sup>

## 1.4 Κράτη μέλη

Σύμφωνα με το άρθρο 4 για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι χώρες που αποτελούν μέλη της ΕΕ είχαν την υποχρέωση έως τις 30/06/2010 να καταθέσουν εθνικά σχέδια δράσης για τις ανανεώσιμες πηγές. Τα σχέδια αυτά, έπρεπε να συναχθούν σύμφωνα με το υπόδειγμα που δημοσιεύθηκε από την Επιτροπή, παρέχοντας λεπτομερείς χάρτες πορείας για το πώς κάθε κράτος μέλος θα πρέπει να φτάσει στον στόχο του 2020 και για το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην τελική κατανάλωση ενέργειας τους. Τα κράτη μέλη θα έπρεπε να καθορίσουν τους στόχους ανά τομέα, το μείγμα τεχνολογιών που θα χρησιμοποιήσουν, την πορεία που θα ακολουθήσουν και τα μέτρα και τις μεταρρυθμίσεις που θα ληφθούν ώστε να ξεπεραστούν τα εμπόδια για την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα σχέδια που δημοσιεύθηκαν από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή μετά την παραλαβή μεταφράστηκαν από το κάθε κράτος στην πρωτότυπη γλώσσα, επιτρέποντας τον δημόσιο έλεγχο. Επιπλέον, το Κέντρο Ενεργειακής Έρευνας των Κάτω Χωρών έχει προσληφθεί από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος ώστε να δημιουργήσει μια εξωτερική βάση δεδομένων και μια ποσοτική έκθεση σχετικά με τις αναφορές που έχουν ληφθεί μέχρι στιγμής.

Τα κράτη μέλη που προσχώρησαν στην ΕΕ από το 2004 θα πρέπει να συμβιβαστούν με την οδηγία 2001/77 / ΕΚ που αναφέρεται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Όπως και στα υπόλοιπα κράτη μέλη, έτσι και στα νέα κατά την προσχώρησή τους στην ΕΕ θέτονται ορισμένοι στόχοι για παραγωγή ενέργειας μέσω ΑΠΕ, έτσι ώστε να βοηθήσουν την ΕΕ για την επίτευξη του 21 % που έχει τεθεί ως στόχος.

Τα κράτη μέλη πρέπει να θεσπίζουν και δημοσιεύουν, αρχικά ανά πενταετία, μια αναφορά σχετικά με τον καθορισμό των ενδεικτικών στόχων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τα επόμενα δέκα χρόνια, η οποία θα υποδεικνύει τι μέτρα έχουν ληφθεί ή πρόκειται να ληφθούν για την επίτευξη αυτών των στόχων. Οι στόχοι των κρατών μελών πρέπει να λαμβάνουν υπόψη τις τιμές αναφοράς που καθορίζονται από την ΕΕ στο παράρτημα της οδηγίας για ενδεικτικούς στόχους των κρατών μελών, όσον αφορά το μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Θα πρέπει επίσης να ακολουθούν τις εθνικές δεσμεύσεις που έχουν τεθεί από το Πρωτόκολλο του Κιότο<sup>6</sup>.

### 1.4.1 Γερμανία

Το 2014, η Γερμανία μοίρασε το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας της και η τελική κατανάλωση ενέργειας αυξήθηκε κατά 1,4 % σε 13,8 %. Το 2004, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αντιπροσώπευαν μόνο το 5,8 %, περίπου ίδιο ποσοστό και για τις Κάτω Χώρες το 2014 (5,5 %). Την ίδια χρονιά η καθαρά παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές αντιπροσώπευε περίπου το 30 % της συνολικής.

Σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος, η βιομάζα, η ηλιακή και η αιολική ενέργεια αύξησαν την παραγωγή τους κατά 13 %, 5,9 % και 1,5 %, αντίστοιχα, ενώ η υδροηλεκτρική ενέργεια μειώθηκε κατά 9,6 %. Αθροιστικά η αιολική και η ηλιακή ενέργεια δημιουργούν περίπου ένα ποσοστό σχεδόν όσο η πυρηνική ενέργεια, για το έτος

<sup>5</sup>Eurostat. Share of renewable energy in gross final energy consumption. October 2016.

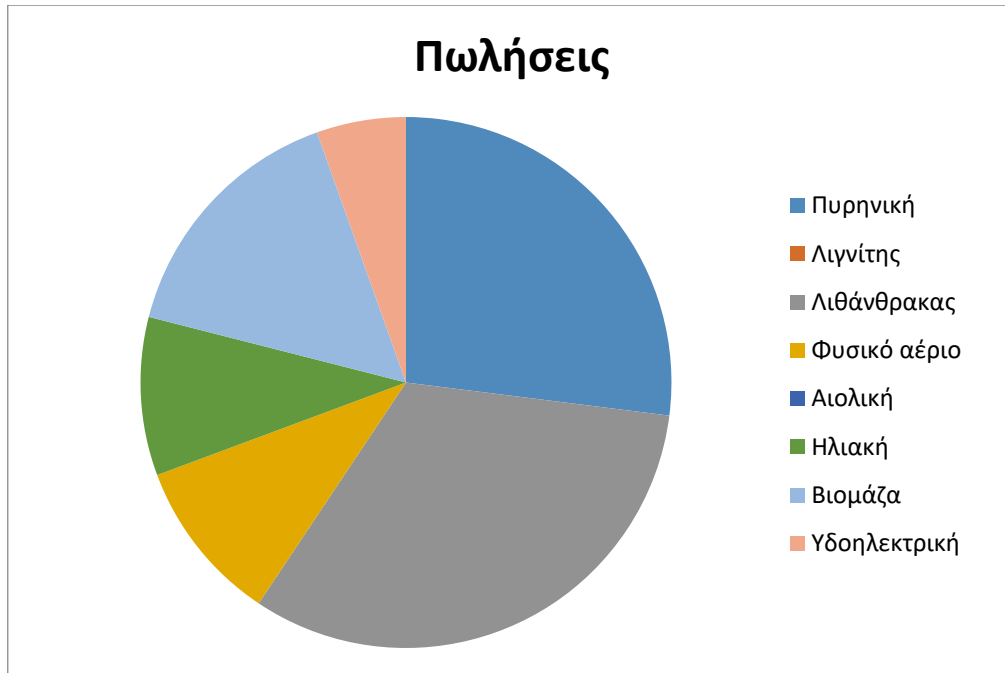
<sup>6</sup>Eurostat. Share of renewable energy in gross final energy consumption. October 2016.





2014 (Σχήμα 1.3). Η πυρηνική παρέμεινε αμετάβλητη, ενώ η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας από φυσικό αέριο, λιγνίτη και λιθάνθρακα μειώθηκε κατά 15,8 %, 2,9 % και 10,4 %, αντίστοιχα<sup>7</sup>.

Το 2015, η εγκατεστημένη ισχύς της αιολικής ενέργειας στη Γερμανία ήταν 44.470 MW, με την αιολική ενέργεια να παράγει περίπου 13,3 τοις εκατό της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας της Γερμανίας (Σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ποσοστό ανά πηγή, έτος 2014, Γερμανία<sup>8</sup>

Σύμφωνα με την EWEA σε ένα τυπικό έτος, η εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στη Γερμανία εκτιμάται ότι πληρούσε το 10,6 % στο τέλος του 2011 και το 9,3 % στο τέλος του 2010 των αναγκών της Γερμανίας σε ηλεκτρική ενέργεια. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η εγκατεστημένη ισχύς αλλά και η παραγόμενη ενέργεια για τα τελευταία έτη. Περισσότερες από 26.772 ανεμογεννήτριες καταγράφηκαν στη Γερμανία στο τέλος του έτους 2015 και η χώρα έχει σχέδια για περαιτέρω επέκταση. Στο τέλος του έτους αυτού, η Γερμανία ήταν ο τρίτος μεγαλύτερος παραγωγός αιολικής ενέργειας στον κόσμο, πίσω από την Κίνα και τις ΗΠΑ, και μπροστά από την Ινδία, την Ισπανία και το Ηνωμένο Βασίλειο<sup>9</sup> (

Πίνακας 1.1).

<sup>7</sup>Burgermeister, Jane. Germany: The World's First Major Renewable Energy Economy. <http://www.renewableenergyworld.com/>, April 3, 2015.

<sup>8</sup>Germany: experience renewable energy — Baedeker Reiseführer. Germany: Baedeker. 2016.

<sup>9</sup>Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, Germany. Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Berlin, August 2016.



**Πίνακας 1.1:** Συνολική εγκατεστημένη και παραγόμενη ισχύς από αιολική ενέργεια (από τις παράκτιες εγκαταστάσεις<sup>10</sup>).

Έτος	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Εγκατεστημένη ισχύς (MW)	30	80	188	268	622	994	3,284
Παραγόμενη ισχύς (MW)	38	176	577	732	918	1,471	8,284
% αιολικής ενέργειας, επί της συνολικής παραγόμενης από ΑΠΕ	0,1	0,5	1,2	1,4	1,8	2,6	10,5

#### 1.4.2 Ιταλία

Το 2014, το 38,2 % της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ιταλία προήρθε από ανανεώσιμες πηγές (το 2005 αυτή η τιμή ήταν 15,4 %), καλύπτοντας το 16,2 % της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας της χώρας (5,3 % το 2005) (Πίνακας 1.2).

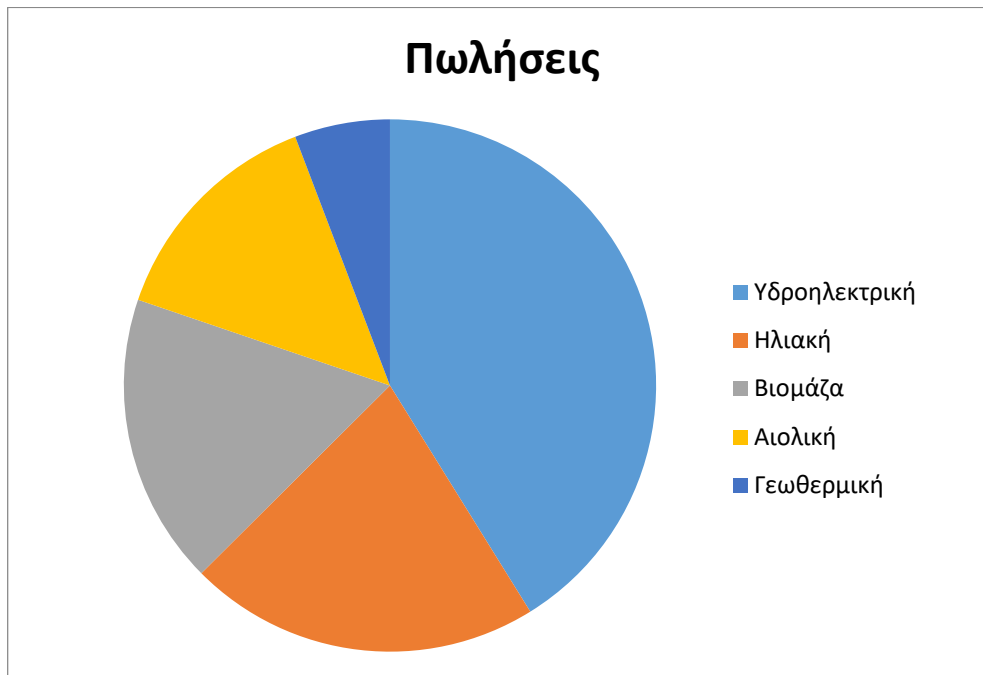
Από αυτό η ηλιακή ενέργεια κάλυψε σχεδόν το 9 % της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα το 2014, καθιστώντας την Ιταλία τη χώρα με το υψηλότερο κέρδος από ηλιακή ενέργεια, στον κόσμο<sup>11</sup> (Σχήμα 1.4).

**Πίνακας 1.2: Στόχος 2020 για ανανεώσιμες πηγές, Ιταλία**

Τομέας	Παραγόμενη ενέργεια, στόχος 2020 (Τόνος ισοδύναμου πετρελαίου)	Μοίρασμα ανά ανανεώσιμη πηγή, στόχος 2020
Θερμότητα και κλιματισμός	61,185	17 %
Ηλεκτρισμός	32,227	26 %
Μεταφορές	33,972	10 %
Καθαρή τελική κατανάλωση	133,042	17 %

<sup>10</sup>Federal Ministry for Economic Affairs and Energy , Germany. Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. Berlin, August 2016.

<sup>11</sup>Datamonitor Energy. Renewable the star player in Italy. July 16, 2014.



Σχήμα 1.4: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ποσοστό ανά πηγή, έτος 2015, Ιταλία<sup>12</sup>

Η αιολική ενέργεια στην Ιταλία, στο τέλος του 2015, αποτελούνταν από περισσότερες από 1.847 ανεμογεννήτριες με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 8.958MW. Η αιολική ενέργεια είχε συνεισφορά στο 5,4 % της Ιταλίας παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το 2015 (14.589 GWh). Η Ιταλία κατατάσσεται ως ένατη παραγωγός στον κόσμο της αιολικής ενέργειας. Ωστόσο, με την Βραζιλία να έχει ήδη ξεπεράσει τα 9 GW και με περαιτέρω 175 έργα υπό κατασκευή το 2016, μέχρι το τέλος του έτους, αναμένεται ότι η Ιταλία θα πέσει στη δέκατη θέση, κάτω από τη Βραζιλία<sup>13</sup> (Πίνακας 1.3).

Πίνακας 1.3: Εγκατεστημένη αιολική ισχύς-μεταβολή ανά έτος, Ιταλία<sup>14</sup>.

Έτος	Εγκατεστημένη ισχύς	
	MW	Μεταβολή ανά έτος
2009	4,898	38,44 %
2010	5,814	18,7 %
2011	6,936	19,3 %
2012	8,144	17,42 %
2013	8,552	5,01 %
2014	8,703	1,77 %
2015	9,126	4,86 %

<sup>12</sup> [http://www.econews.gr/wp-content/uploads/2016/02/2\\_10\\_16\\_Brian\\_EURenewables2014.gif](http://www.econews.gr/wp-content/uploads/2016/02/2_10_16_Brian_EURenewables2014.gif)

<sup>13</sup>EWEA: The European Wind Energy Association. Wind in power: 2013 European statistics. 2014.

<sup>14</sup>EWEA: The European Wind Energy Association. Wind in power: 2015 European statistics. 2016.



### 1.4.3 Λιθουανία

Το μεγαλύτερο ποσοστό της ανανεώσιμης ενέργειας στη Λιθουανία είναι από καυσόξυλα. Η κύρια πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές είναι η υδροηλεκτρική ενέργεια.

**Πίνακας 1.4: Ποσοστό ενέργειας ανά πηγή, Λιθουανία<sup>15</sup>**

Ενέργεια ανά πηγή	Ποσοστό %
Βιομάζα	86,5
Βιοκαύσιμα	4,4
Υδροηλεκτρική	3,9
Αιολική	3,8
Βιοαέριο	1,1
Γεωθερμική	0,3

Η Λιθουανία είναι ακόμη πίσω σε αρκετές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική, η ηλιακή, η γεωθερμική ενέργεια, τα αστικά απόβλητα και η βιομάζα. Ωστόσο, η ποσότητα της βιομάζας ανά κάτοικο στη Λιθουανία έχει ένα από τα υψηλότερα ποσοστά στην Ευρωπαϊκή Ένωση και εκτιμάται ότι το 2020 η Λιθουανία θα είναι η πρώτη στην ΕΕ, στην ποσότητα της διαθέσιμης βιομάζας για την παραγωγή βιοκαυσίμων. Η προβλεπόμενη παραγωγή βιοκαυσίμων από το 2020 είναι 0,25 τόνους ανά κάτοικο<sup>16</sup>.

Η αιολική ενέργεια είναι μια μορφή ανανεώσιμης ενέργειας που χρησιμοποιείται στη Λιθουανία. Στο τέλος του 2011 η εγκατεστημένη ισχύς αιολικής ενέργειας στη Λιθουανία ήταν 179 MW και το μερίδιο της αιολικής ενέργειας στη συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ήταν 3,8 % (Πίνακας 1.5).

**Πίνακας 1.5: Εγκατεστημένη και παραγόμενη ισχύς από αιολική ενέργεια, Λιθουανία 2007-2013<sup>17</sup>.**

Έτος	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Εγκατεστημένη ισχύς (MW)	3	3	37	72	140	60	16
Παραγωγή (MW)	51	54	91	163	203	263	279

### 1.4.4 Πορτογαλία

Το 2010, περισσότερο από το 50 % του συνόλου της ετήσιας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στην Πορτογαλία ήταν από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Οι σημαντικότερες πηγές για το έτος αυτό ήταν η υδροηλεκτρική (30 %) και η αιολική ενέργεια (18 %), με τη βιοενέργεια (5 %) και την ηλιακή ενέργεια (0,5 %) να αντιπροσωπεύουν το υπόλοιπο ποσοστό. Το 2001, η πορτογαλική κυβέρνηση ξεκίνησε ένα νέο μέσο ενεργειακής πολιτικής, το πρόγραμμα E4 (Ενεργειακή Απόδοση και ενδογενών πηγών ενέργειας), που αποτελείται από ένα σύνολο πολλών και διαφοροποιημένων μέτρων που αποσκοπούν στην προώθηση μιας συνεκτικής και ολοκληρωμένης προσέγγισης για την προσφορά και ζήτηση ενέργειας. Με την προώθηση της ενεργειακής απόδοσης και της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, το πρόγραμμα επιδιώκει να αναβαθμίσει την ανταγωνιστικότητα της πορτογαλικής οικονομίας και για να εκσυγχρονίσει τον κοινωνικό ιστό της χώρας, προστατεύοντας παράλληλα το περιβάλλον με τη μείωση των εκπομπών αερίων και ιδιαίτερα

<sup>15</sup>EWEA: The European Wind Energy Association. *Wind in power: 2013 European statistics*. 2014.

<sup>16</sup>Applied research. *Lithuanian Renewable Energy Promotion Action Plan 2010-2020 years*. Vilnius, 2015.

<sup>17</sup>EWEA: The European Wind Energy Association. *Wind in power: 2013 European statistics*. 2014.



του CO<sub>2</sub>, το οποίο ευθύνεται για τις κλιματικές αλλαγές<sup>18</sup>. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η αύξηση στη παραγωγή της ενέργειας, προερχόμενη από ανανεώσιμες πηγές, κατά 28 %, από το 2005 έως το 2010.

Το 2014 και πιο συγκεκριμένα κατά τον Ιανουάριο αυτού του έτος, καταγράφηκε κάλυψη του 91 % των ενεργειακών απαιτήσεων για αυτό τον μήνα, από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ωστόσο από τον αριθμό αυτό το 78 % χρησιμοποιήθηκε και το υπόλοιπο 14 το εξήγαγε η χώρα.

Τέλος η Πορτογαλία έχει τον δεύτερο μεγαλύτερο σταθμό φωτοβολταϊκής ενέργειας στον κόσμο (Σχήμα 1.5), ο οποίος ολοκληρώθηκε το Δεκέμβριο του 2008. Το συγκρότημα, ο οποίος ονομάζεται φωτοβολταϊκός σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας Amareleja καλύπτει μια έκταση 250 στρεμμάτων. Το εργοστάσιο ηλιακής ενέργειας 46 MW παράγει αρκετή ηλεκτρική ενέργεια για 30.000 σπίτια και εξοικονομεί περισσότερους από 89.383 τόνους ετησίως από τις εκπομπές αερίων. Επίσης, στην παραγωγή από τον Ιανουάριο του 2007, η ηλιακή μονάδα παραγωγής ενέργειας.



Σχήμα 1.5: Φωτοβολταϊκός σταθμός Amareleja, Πορτογαλία<sup>19</sup>

Το Δεκέμβριο του 2013, η εγκατεστημένη ισχύς της αιολικής ενέργειας στην Πορτογαλία ήταν 4.731 MW. Η αιολική ενέργεια μάλιστα είχε μερίδιο στην εξοικονόμηση από τη συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά 23 % και εξοικονόμηση σχεδόν 8.182.900 τόνους εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Οι μεγάλοι κατασκευαστές ανεμογεννητριών στην πορτογαλική αγορά είναι οι Enercon, Vestas, Gamesa και Nordex<sup>20</sup>.

#### 1.4.5 Ισπανία

Στην Ισπανία έχει τεθεί ως στόχος η κάλυψη του 30 % των ενεργειακών απαιτήσεων σε ηλεκτρισμό, από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Από αυτό το ποσοστό το 50 % (δηλαδή 15 % του συνολικού) θα προέρχεται από αιολική ενέργεια. Κατά το έτος 2006, το ποσοστό αυτό έφτασε το 20 % και τον Ιανουάριο του 2009 πραγματοποιήθηκε η υψηλότερη καταγραφή του με 34,8 %.

Ορισμένες περιοχές της Ισπανίας είναι πρωτοπόρες στην Ευρώπη στη χρήση της τεχνολογίας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και σχεδιάζουν να φθάσουν το 100 % της παραγωγής της ενέργειας τους από ανανεώσιμες

<sup>18</sup> Rosenthal, Elisabeth. Portugal Makes the Leap to Renewable Energy. NYT, 2015.

<sup>19</sup>[http://wikivisually.com/wiki/Category:Pumped-storage\\_hydroelectric\\_power\\_stations\\_in\\_Portugal](http://wikivisually.com/wiki/Category:Pumped-storage_hydroelectric_power_stations_in_Portugal)

<sup>20</sup>e2p energias endogenas de portugal. Parques Eólicosem Portugal: Wind Farms in Portugal. December 2013.





πηγές σε λίγα χρόνια. Μάλιστα η CastillaLeón και η Galicia, είναι κοντά σε αυτό το στόχο. Το 2006 παρήγαγαν περίπου το 70 % από τη συνολική απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια, από ανανεώσιμες πηγές.

Επιπλέον οι κοινότητες Extremadura και Castilla-LaMancha, το 2006 κατάφεραν να καλύψουν τη συνολική τους απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια με την αξιοποίηση πυρηνικής ενέργειας.

Το 2005 η Ισπανία έγινε η πρώτη χώρα στον κόσμο που απαίτησε την εγκατάσταση φωτοβολταϊκών στα νέα κτίρια και η δεύτερη στον κόσμο (μετά το Ισραήλ) που απαίτησε την εγκατάσταση των ηλιακών συστημάτων για τη θέρμανση νερού<sup>21</sup> (Πίνακας 1.6).

**Πίνακας 1.6: Συνεισφορά της ανανεώσιμης ενέργειας στις συνολικές απαιτήσεις ενέργειας, ποσοστό κάλυψης, Ισπανία.**

Έτος	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Ποσοστό	18,4 %	20,2 %	20,4 %	26,4 %	35,3 %	32,5 %	31,9 %	42,4 %	42,8 %	37,4 %

Μέχρι το τέλος του 2015 η Ισπανία ήταν η πέμπτη μεγαλύτερη παραγωγός αιολικής στον κόσμο ενέργειας με 23.031 MW εγκατεστημένης ισχύος, παρέχοντας 48.118 GWh ενέργειας και το 19 % της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας κατά το έτος αυτό. Το 2014, έκανε ρεκόρ με την αιολική ενέργεια να αντιπροσωπεύει το 20,2 % της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ισπανία, καθιστώντας την τη δεύτερη πιο σημαντική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας μετά την πυρηνική ενέργεια (22 %) και μπροστά από την παραγωγή ενέργειάς με την καύση άνθρακα (16,5 %). Κατά τα προηγούμενα έτη η αιολική ενέργεια κάλυψε το 16 % της ζήτησης το 2010, 13,8 % το 2009 και 11,5 % το 2008.

Μετά την οικονομική κρίση του 2008 και την δεινή κατάσταση της ισπανικής οικονομίας κατά την επόμενη περίοδο οι νέες εγκαταστάσεις των νέων ανεμογεννητριών παρέμειναν στάσιμες μεταξύ του 2012 και 2015 με σχεδόν 23.000 MW εγκατεστημένης ισχύος για αυτή τη περίοδο<sup>22</sup> (Πίνακας 1.7).

**Πίνακας 1.7: Αιολική ενέργεια στην Ισπανία, εγκατεστημένη ισχύς και παραγωγή<sup>23</sup>.**

Έτος	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Εγκατεστημένη ισχύς (MW)	18.860	19.706	21.166	22.757	23.003	23.031	23.031
Συνολική παραγωγή (GWh)	38.253	43.545	42.465	48.508	54.713	51.032	48.118

#### 1.4.6 Ηνωμένο Βασίλειο

Μέχρι το 2004 το 4,65 % των αναγκών της ηλεκτρικής ενέργειας του Ηνωμένου Βασιλείου προερχόταν από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, (συμπεριλαμβανομένης της υδροηλεκτρικής ενέργειας). Το ποσοστό αυτό το 1990 ήταν στο 2,55 %. Μάλιστα από το 2011 αυξήθηκε στο 8,7 %. Η συνολική συνεισφορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη συνολική καταναλώσιμη ενέργεια του Ηνωμένου Βασιλείου για το 2011 ήταν 3,8 %.

Αυτό περιελάμβανε 8,7 % ηλεκτρική ενέργεια, 2,2 % θερμότητα και 2,9 % καύσιμα για τις μεταφορές προερχόμενα όλα από ανανεώσιμες πηγές. Η κυβέρνηση του Ηνωμένου Βασιλείου έθεσε ως στόχο οι ανανεώσιμες πηγές ηλεκτρικής ενέργειας να παρέχουν το 10 % της συνολικής κατανάλωσης ηλεκτρικής

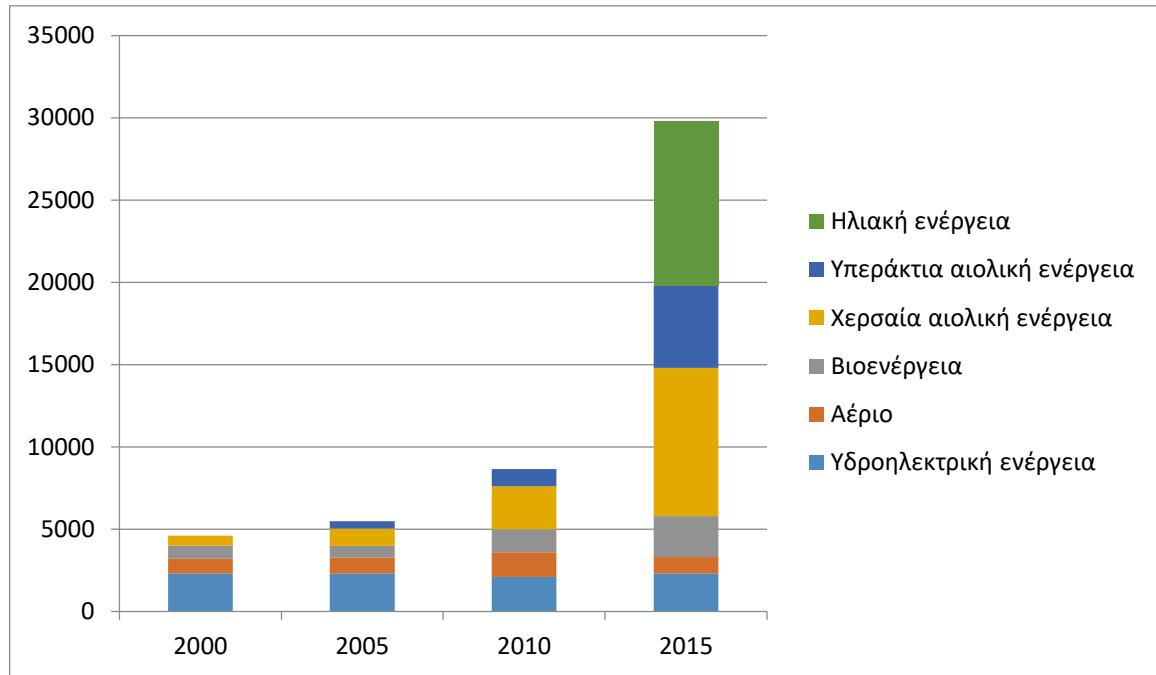
<sup>21</sup> Red Electrica Corporation. Red Electrica de Espana Annual Report. Red Electrica Corporation, 2015.

<sup>22</sup>Red Eléctrica de España. Statistical data of electrical system. January 2017.

<sup>23</sup>Red Eléctrica de España. Statistical data of electrical system. January 2017.



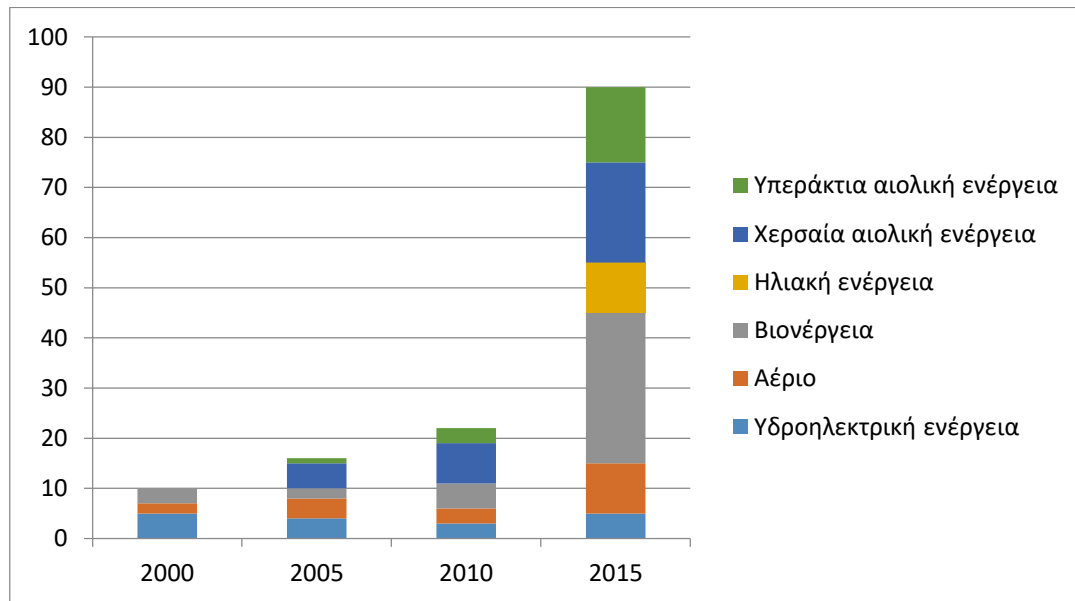
ενέργειας έως το 2010, ο οποίος ωστόσο δεν εκπληρώθηκε. Το Ηνωμένο Βασίλειο συμφώνησε με τους στόχους της ΕΕ για να καλύψει από ανανεώσιμες πηγές έως το έτος 2020 ένα ποσοστό της τάξης του 20 % της συνολικής ενέργειας που χρειάζεται η χώρα. Στόχος του Ηνωμένου Βασιλείου είναι να επιτευχθεί το 15 % της συνολικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Υπουργείο Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής (DECC) του Ηνωμένου Βασιλείου ανακοίνωσε ότι θα επιχειρήσει να φτάσει στην επίτευξη αυτού του στόχου, προσφέροντας 30 % για ηλεκτρική ενέργεια, 12 % για θερμότητα και 10 % καύσιμα για τις μεταφορές<sup>24</sup> (Σχήμα 1.6, Σχήμα 1.7).



Σχήμα 1.6: Εγκατεστημένη ισχύς (MW) από ΑΠΕ, Ηνωμένο Βασίλειο 2000 έως 2015<sup>25</sup>

<sup>24</sup> Energy and Industrial Strategy. Electricity Market Reform: Contracts for Difference. Department for Business, 2016.

<sup>25</sup> Department of Energy and Climate Change. Digest of UK energy statistics' (DUKES) - Chapter 6: Renewable Sources of energy. 2015.



Σχήμα 1.7: Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWh) από ΑΠΕ, Ηνωμένο Βασίλειο 2000 έως 2015<sup>26</sup>

Το Ηνωμένο Βασίλειο θεωρείται ως μία από τις καλύτερες τοποθεσίες για την αιολική ενέργεια στον κόσμο και η καλύτερη στην Ευρώπη. Η αιολική ενέργεια είχε συνεισφορά στο 11 % της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο Ηνωμένο Βασίλειο το 2015 και 17 % το Δεκέμβριο του 2015. Επιτρέποντας, με κόστος τη ρύπανση, ιδιαίτερα από εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από άλλες μορφές παραγωγής, η χερσαία αιολική ενέργεια είναι η φθηνότερη μορφή ενέργειας στο Ηνωμένο Βασίλειο. Το 2016 το Ηνωμένο Βασίλειο παρήγαγε περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από την αιολική ενέργεια από ό, τι από τον άνθρακα<sup>27</sup>.

Η αιολική ενέργεια προσφέρει ένα αυξανόμενο ποσοστό ενέργειας στο Ηνωμένο Βασίλειο και πλέον υπολογίζεται πως υπάρχουν 7.198 ανεμογεννήτριες με συνολική εγκατεστημένη ισχύ περίπου 14,5 GW: 9395 MW η ισχύς των χερσαίων και 5.098 MW των υπεράκτιων. Αυτό τοποθέτησε το Ηνωμένο Βασίλειο αυτή τη στιγμή ως έκτη μεγαλύτερη παραγωγός χώρα της αιολικής ενέργειας στον κόσμο (πίσω από Κίνα, ΗΠΑ, Γερμανία, Ινδία και Ισπανία), αφού ξεπέρασε τη Γαλλία και την Ιταλία το 2012. Οι δημοσκοπήσεις της κοινής γνώμης δείχνουν μια σταθερά ισχυρή υποστήριξη για την αιολική ενέργεια στη Βρετανία, με σχεδόν τα τρία τέταρτα του πληθυσμού να συμφωνεί με τη χρήση της, ακόμη και άνθρωποι οι οποίοι ζουν κοντά σε χερσαίες ανεμογεννήτριες (

Πίνακας 1.8).

<sup>26</sup>Department of Energy and Climate Change. Digest of UK energy statistics' (DUKES) - Chapter 6: Renewable Sources of energy. 2015.

<sup>27</sup>renewable UK. New records set in best ever year for British wind energy generation. 5 January 2016.





**Πίνακας 1.8: Εγκατεστημένη ισχύς, παραγόμενη ισχύς, ποσοστό χρήσης, Ηνωμένο Βασίλειο 2009-2016<sup>28</sup>.**

Έτος	Χωρητικότητα (MW)	Παραγωγή (MW ανά ώρα)	Ποσοστό χρήσης
2009	4,051	6,904	2,01
2010	5,204	7,950	2,28
2011	6,540	12,675	3,81
2012	8,871	20,710	5,52
2013	10,976	24,500	7,39
2014	12,440	28,100	9,30
2015	13,602	40,442	11,0
2016	15,031	41,500	11,5

---

<sup>28</sup>renewable UK. New records set in best ever year for British wind energy generation. 5 January 2016.

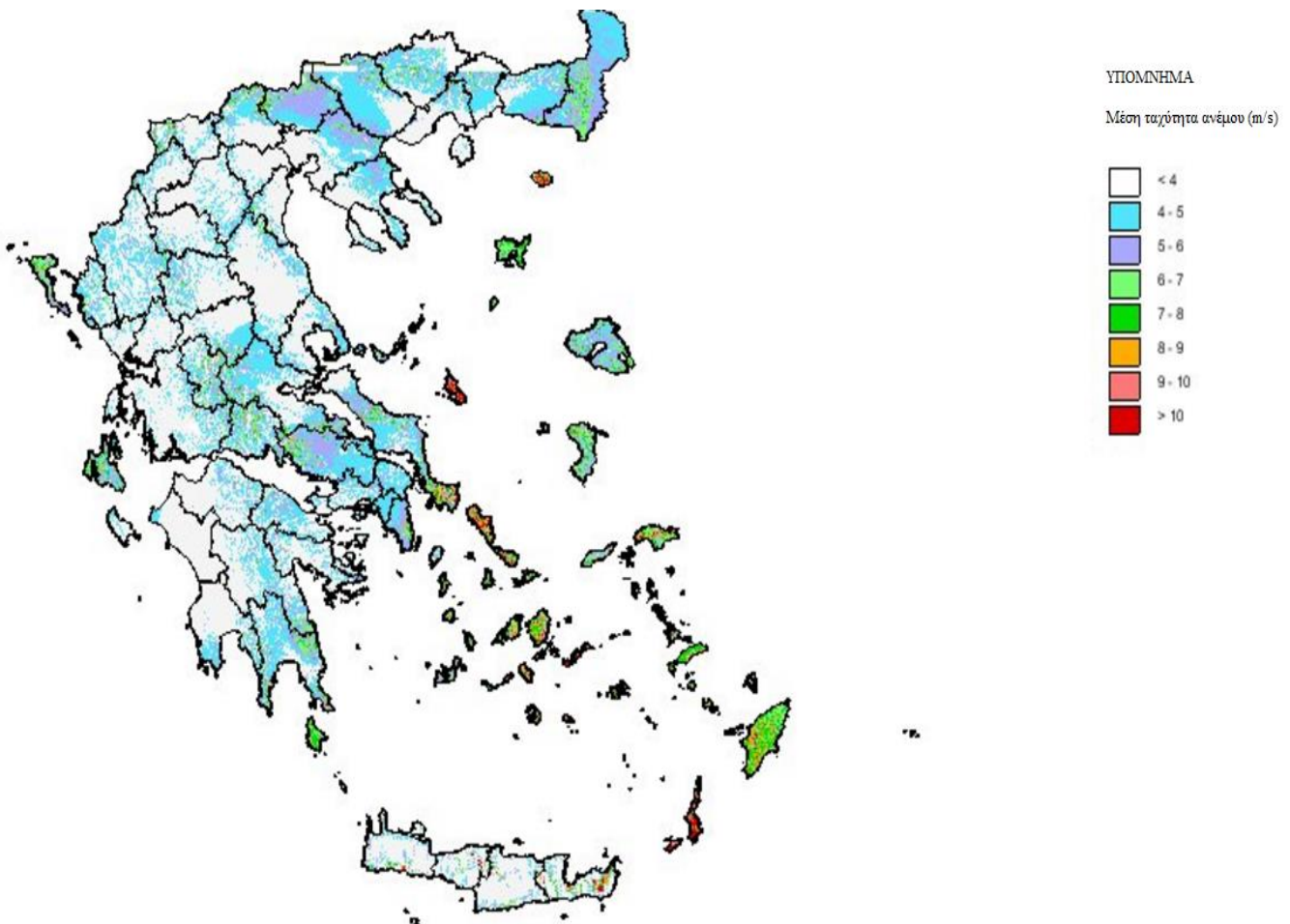


## Κεφάλαιο 2 Αιολική ενέργεια

### 2.1 Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα

#### 2.1.1 Αξιοποίηση αιολικής ενέργειας

Η Ελλάδα θεωρείται ως μια χώρα με αρκετά αξιόλογο αιολικό δυναμικό, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν αρκετοί φορείς οι οποίοι έχουν ασχοληθεί με τη μελέτη του αιολικού δυναμικού. Μερικοί από αυτούς είναι η εθνική μετεωρολογική υπηρεσία, η υπηρεσία φάρων, το Εθνικό Αστεροσκοπείο, η ΔΕΗ, το ΚΑΠΕ, αλλά και διάφορα εκπαιδευτικά ιδρύματα (ΑΕΙ, ΤΕΙ)<sup>29</sup> (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Χάρτης αιολικού δυναμικού<sup>30</sup>

Οι πιο πρόσφατες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του Εθνικού Προγράμματος ενέργειας, από το ΚΑΠΕ και τη πλειοψηφία της Ελλάδος πλην της Κρήτης. Με βάση αυτές τις μετρήσεις συντάχθηκε ένας

<sup>29</sup>EWEA: The European Wind Energy Association. Wind in power: 2015 European statistics. 2016.

<sup>30</sup>ΚΑΠΕ. Θεματικοί Χάρτες Εκτίμησης του Τεχνικά και Οικονομικά Εκμεταλλεύσιμου Δυναμικού της Αιολικής Ενέργειας στον Ελληνικό Χώρο. 2001.



αιολικός χάρτης (Σχήμα 2.1), ο οποίος είναι διαθέσιμος στην ιστοσελίδα του ιδρύματος και μπορεί να δώσει χρήσιμες πληροφορίες για το αιολικό δυναμικό ανά περιοχή. Οι μετρήσεις αυτές έδειξαν πως το υψηλότερο αιολικό δυναμικό βρίσκεται στις περιοχές της νότιας Εύβοιας, στην ανατολική Πελοπόννησο, στην ανατολική Θράκη και στα νησιά του Αιγαίου. Στην υπόλοιπη χώρα, κυρίως σε ορεινές εκτάσεις όπου το αιολικό δυναμικό είναι υψηλότερο, υπάρχει δυνατότητα εγκατάστασης αιολικών εφαρμογών, ωστόσο σε αυτές τις περιπτώσεις πρέπει να ληφθούν υπόψη παράμετροι όπως το κόστος σύνδεσης, οι διαδρομές και η πρόσβαση στις εγκαταστάσεις αυτές, ώστε να γίνει μια εκτίμηση για τον αν η εγκατάσταση είναι οικονομικά συμφέρουσα<sup>31</sup>.

**Πίνακας 2.1: Συνολική αιολική ισχύς ανά νομό (μητρώο αδειών παραγωγής ενέργειας ΚΑΠΕ)<sup>32</sup>.**

A/A	Νομός	Ισχύς (MW)	A/A	Νομός	Ισχύς (MW)
1	Εύβοιας	736,8	19	Κορινθίας	88,3
2	Βοιωτίας	576,6	20	Χαλκιδικής	74,2
3	Αρκαδίας	416,5	21	Κεφαλονιάς	70,8
4	Κοζάνης	294,4	22	Μεσσηνίας	62,5
5	Φωκίδας	285,4	23	Κυκλάδων	57,6
6	Αργολίδας	260,4	24	Δράμας	57,3
7	Αχαΐας	248,8	25	Πειραιώς	51,5
8	Λακωνίας	237,6	26	Μαγνησίας	50,0
9	Φλώρινας	193,2	27	Ηλείας	46,0
10	Αιτωλοακαρνανίας	185,3	28	Κέρκυρας	39,3
11	Φθιώτιδας	171,3	29	Λευκάδος	39,1
12	Αττικής	163,6	30	Καρδίτσας	30,0
13	Κιλκίς	152,0	31	Ξάνθης	30,0
14	Ευρυτανίας	137,9	32	Δωδεκανήσου	29,9
15	Έβρου	112,9	33	Λάρισας	21,9
16	Ροδόπης	105,3	34	Ηρακλείου	14,5
17	Σερρών	97,4	35	Ημαθίας	14,0
18	Θεσπρωτίας	92,0	36	Πρεβέζης	14,0

Από το αρχείο του μητρώου αδειών παραγωγής ενέργειας του ΚΑΠΕ, προκύπτει πως η μεγαλύτερες σε ισχύ κατασκευές αιολικών πάρκων βρίσκονται στην Αργολίδα (50MW), την Χαλκιδική και την Αχαΐα (49,5 MW).

Ωστόσο, παρά το γεγονός πως το επενδυτικό ενδιαφέρον είναι αρκετά μεγάλο, η Ελλάδα ακόμη υστερεί σε αιολικές εφαρμογές και έργα. Η εγκατεστημένη ισχύς κατά το έτος 1999 ήταν στα 100MW και ως το 2007 έφτασε τα 871MW. Έως το 2015, που πραγματοποιήθηκαν και η τελευταίες μετρήσεις η τιμή αυτή έφτασε τα 2.152MW, αυξήθηκε δηλαδή σημαντικά αλλά ο αριθμός αυτός παραμένει πολύ μικρός συγκριτικά με άλλες χώρες (Γερμανία 44.946MW)<sup>33</sup>.

<sup>31</sup>EWEA: The European Wind Energy Association. Wind in power: 2015 European statistics. 2016.

<sup>32</sup>Μηλάρας, Σωκράτης. Αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα, Διπλωματική εργασία. Αθήνα: ΕΜΠ, Σχολή Χημικών Μηχανικών, 2008.

<sup>33</sup>EWEA: The European Wind Energy Association. Wind in power: 2015 European statistics. 2016.



Πίνακας 2.2: Αιτήσεις για χορήγηση άδειας παραγωγής ενέργειας από αιολικά πάρκα (Απρίλιος 2008).<sup>34</sup>.

A/A	Νομός	Ισχύς (MW)
1	Λάρισας	222
2	Εύβοιας	101,2
3	Αρκαδίας	69
4	Σερρών	62
5	Κιλκίς	48
6	Λακωνίας	39,1
7	Φλώρινας	38
8	Γρεβενών	36
9	Αχαΐας	21,1
10	Αχαΐας	18,7
11	Φωκίδας	17
12	Αρκαδίας	16
13	Λακωνίας	16
14	Κορινθίας	10
15	Αρκαδίας	4
16	Αργολίδας	2,55

Από τον παραπάνω πίνακα (

Πίνακας 2.2), προκύπτει πως τον Απρίλιο του 2008 η συνολική ισχύ των αιολικών πάρκων για τα οποία κατατέθηκαν αιτήσεις ξεπέρασε τα 700 MW. Επιπλέον η Λάρισα παρουσιάζεται ως η πόλη με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για επένδυση με αιολικά πάρκα, λόγω κυρίως των μεγάλων εκτάσεων της.

Η Ελλάδα είναι μια χώρα πλούσια σε αιολικό δυναμικό, ωστόσο παραμένει στις τελευταίες θέσεις της Ε.Ε. με βάση την εγκατεστημένη ισχύ. Παρά το γεγονός ότι στις αρχές τις δεκαετίας του 80 ξεκίνησε με αντίστοιχα προγράμματα με τη Δανία η εξέλιξη της δεν είχε τους αντίστοιχους ρυθμούς. Σύμφωνα με πολλούς ένα βασικό αίτιο αυτού είναι το μονοπώλιο της ΔΕΗ στην αγορά παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έως τα τέλη της δεκαετίας του 90<sup>35</sup>.

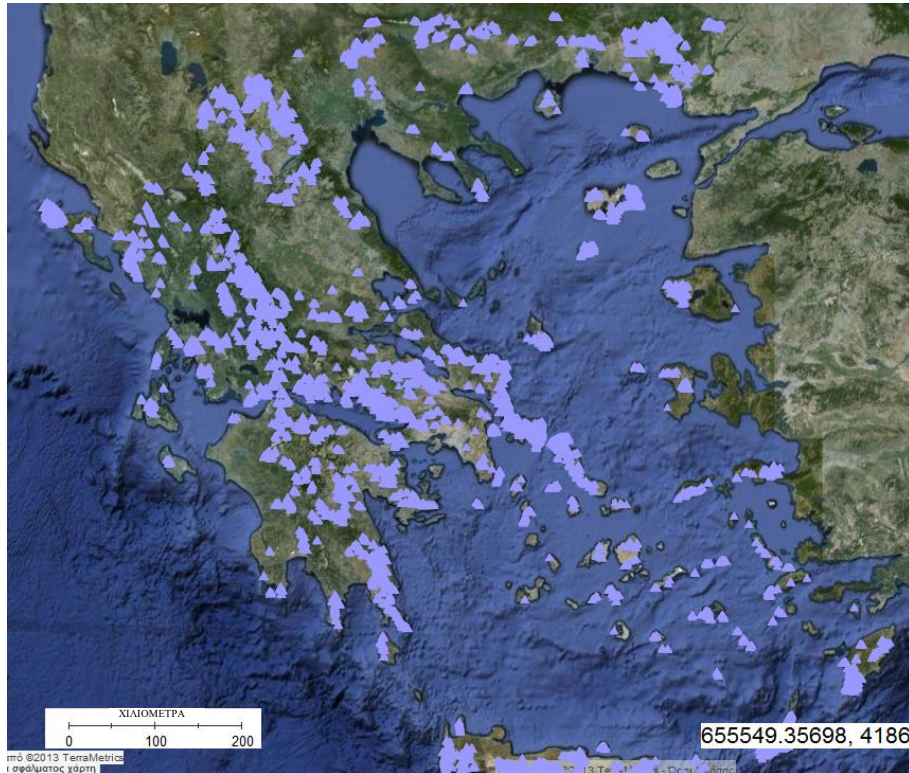
## 2.2 Υποδομές

Το περασμένο έτος η Ελλάδα πέτυχε τη δεύτερη καλύτερη της επίδοση στην εγκατεστημένη αιολική ισχύ με 238,55 MW (καλύτερη επίδοση 313 MW το 2011).

Σύμφωνα με στοιχεία που εξέδωσε η Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ), το σύνολο της αιολικής ισχύς για το 2016 ήταν: 2374,3 MW, αυξημένο κατά 11,2 % συγκριτικά με το 2015 (Σχήμα 2.2).

<sup>34</sup>Μηλάρας, Σωκράτης. Αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα, Διπλωματική εργασία. Αθήνα: ΕΜΠ, Σχολή Χημικών Μηχανικών, 2008.

<sup>35</sup>EWEA: The European Wind Energy Association. Wind in power: 2015 European statistics. 2016.



Σχήμα 2.2: Τα αιολικά πάρκα στην Ελλάδα<sup>36</sup>

### 2.3 Υπεράκτιο αιολικό πάρκο

Η διαρκής αναζήτηση τοποθεσιών οι οποίες να είναι ικανές να παρέχουν υψηλό αιολικό δυναμικό, συνεχή λειτουργία και υψηλές ταχύτητες, οδήγησαν στη κατασκευή αιολικών πάρκων στη θάλασσα. Η θέση των πάρκων αυτών μπορεί να είναι κοντά σε ακτές εφόσον υπάρχει αρκετή απόσταση ώστε να μην επηρεάζεται η φυσική βιοποικιλότητα της κατοικήσιμης περιοχής. Συνεπώς συνιστάται μια απόσταση της τάξης των πέντε έως δέκα χιλιομέτρων για την κατασκευή μιας τέτοιας εγκατάστασης.

Οι κατασκευές αυτές παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα απέναντι σε αυτές τις ξηράς. Οι αναταράξεις στη ροή του ανέμου είναι μειωμένες, λόγω της επιφάνειας της θάλασσας, κάτι που βοηθά στην ομαλότερη λειτουργία του πάρκου, στη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής των ανεμογεννητριών και του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού και κατά συνέπεια μεγαλύτερη αξιοπιστία του με λιγότερες διακοπές στη λειτουργία του (Σχήμα 2.3).

<sup>36</sup> <http://renewablegreece.wikispaces.com>





Σχήμα 2.3: Υπεράκτιο αιολικό πάρκο<sup>37</sup>.

Το χαρακτηριστικό που καθιστά αυτές τις κατασκευές ιδιαίτερες είναι η πάκτωση των πύργων των ανεμογεννητριών σε διάφορα εδάφη και βάθη. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι πύργοι πακτώνονται έως τριάντα μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας, διότι σε μεγαλύτερο βάθος οι απαιτήσεις για να διατηρηθεί ένας πύργος σταθερός είναι πολύ μεγάλες και το κόστος του πύργου ανάλογα υψηλό. Ένα ακόμη πρόβλημα στα υπεράκτια αιολικά πάρκα, είναι οι καλωδιώσεις και η σύνδεση τους με το δίκτυο. Τα καλώδια τοποθετούνται στο βυθό θαμμένα ώστε να προστατεύονται, κάτι που σημαίνει πως η εγκατάσταση θα πρέπει να γίνει με ιδιαίτερη προσοχή και είναι δύσκολη χρονοβόρα<sup>38</sup>. Επιπλέον η σύνδεση τους στο δίκτυο εξαρτάται από δύο παράγοντες, την απόσταση του πάρκου από τη ξηρά και την ονομαστική του ισχύς. Οι παράγοντες αυτοί διαφέρουν από πάρκο σε πάρκο.

### 2.3.1 Ελλάδα

Στη χώρα μας δεν υπάρχουν αυτή τη στιγμή εγκαταστάσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων παρά το γεγονός πως το αιολικό δυναμικό είναι υψηλό και υπάρχει σχετικό ενδιαφέρον.

Τα θαλάσσια αιολικά πάρκα γενικά παρουσιάζουν ένα αρκετά υψηλό κόστος εγκατάστασης συγκριτικά με τα αιολικά πάρκα που βρίσκονται στη ξηρά. Το κόστος αυτό αυξάνεται σε συνάρτηση με την απόσταση από την ακτή και το βάθος της θάλασσας, με αποτέλεσμα ορισμένες φορές να είναι διπλάσιο και τριπλάσιο συγκριτικά με των αιολικών πάρκων στη ξηρά.

Μάλιστα τα υπεράκτια αιολικά πάρκα παρουσιάζουν και δυσκολίες στη σύνδεση τους με τα ευρύτερα δίκτυα ενέργειας. Η πλειοψηφία των νησιών είναι μη διασυνδεδεμένα με τα κεντρικά τους δίκτυα, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα των περιορισμό στην εγκατάσταση αιολικής ισχύς. Η διασύνδεση αυτή βοηθά στη μεγιστοποίηση της απόδοσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενώ παράλληλα μειώνει το κόστος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τη μείωση της επιβάρυνσης των καταναλωτών για τη χρήση του ρεύματος και τη μείωση των ρύπων του περιβάλλοντος.

<sup>37</sup><http://www.econews.gr/wp-content/uploads/2011/09/uperaktia-aiolika-parka.jpg>

<sup>38</sup>WWF Ελλάς. Θαλάσσιες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αθήνα, 2015.



Το 2010 η κυβέρνηση προχώρησε στην επιλογή δώδεκα παράκτιων περιοχών στη χώρα για την εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων έως το 2017<sup>39</sup>. Η συνολική έκταση από αυτές τις περιοχές φτάνει τα 275 km<sup>2</sup> με την μέση έκταση να είναι 25 km<sup>2</sup>. Η επιλογή αυτών των περιοχών πραγματοποιήθηκε μέσα από ορισμένα κριτήρια τα οποία τέθηκαν:

- Αποκλείστηκαν οι περιοχές όπου ενδεχόμενη ανάπτυξη θαλάσσιου πάρκου θα ήταν ασύμβατη με άλλες χρήσεις σε ζώνη 6 ναυτικών μιλίων.
- Επιπλέον, αποκλείστηκαν περιοχές όπου το βάθος της θάλασσας ήταν μεγαλύτερο των 50 μέτρων.
- Αποκλείστηκαν οι θέσεις οι οποίες ενδεχομένως να προκαλέσουν επιπτώσεις στο περιβάλλον.
- Αποκλείστηκαν οι περιοχές όπου μια εγκατάσταση θα προκαλούσε οπτική όχληση.

Τελικά οι περιοχές που επιλέχθηκαν ήταν οι ακόλουθες: Αλεξανδρούπολη, Θάσος, Κέρκυρα, Άγιος Ευστράτιος, Κάρπαθο, Σαμοθράκη, Κύμη, Λήμνος, Λευκάδα, Κρυονέρι και Φανάρι Ροδόπης, με συνολική ισχύς για τις εγκαταστάσεις 1,2 GW.

Πέρα από αυτές τις δώδεκα υπήρχαν επιπλέον 24 αιτήσεις υπό αξιολόγηση, οι οποίες αφορούν σε παραγόμενη ενέργεια (συνολική) 4.917,5MWh. Οι πλειοψηφία των αιτήσεων παρατηρείται στις περιοχές της Λήμνου, της Κέρκυρας, στη Θράκη και ενδιαφέρον παρατηρείται στις περιοχές των Διαπόντιων, της Άνδρου, της Κάσου και άλλων διάσπαρτων περιοχών. Οι αιτήσεις αυτές ακολουθούν τη διαδικασία του νόμου 3468/2006.

### Στόχοι για το 2020

Το Εθνικό Σχέδιο Δράσης αναφέρει πως σύμφωνα με την ΕΕ ως το 2020 το 20 % της συνολικής κατανάλωσης της ενέργειας θα πρέπει να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Επίσης αναφέρει πως είναι απαραίτητη η εγκατάσταση μονάδων με συνολική ισχύς 750 0MW έως το 2020 και τα 300 MW από αυτά να έχουν προέλευση από υπεράκτια αιολικά πάρκα. Όλες οι πιθανές τοποθεσίες, εξετάστηκαν ώστε να υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης τους με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να γίνεται η μέγιστη δυνατή απορρόφηση της ενέργειας που παράγεται. Μετά από έρευνα που έγινε από το αρμόδιο υπουργείο, καταλληλότερες για σύνδεση με το δίκτυο κρίθηκαν οι περιοχές που βρίσκονται γύρω από την Εύβοια, στα παράλια της Θράκης και στην περιοχή των Διαπόντιων νήσων της Κέρκυρας<sup>40</sup>.

### 2.3.2 Ευρώπη

Στόχος της ΕΕ για το έτος 2020, είναι να εγκατασταθούν περίπου 40 GW σε υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις, δηλαδή για τα επόμενα δώδεκα έτη να πραγματοποιείται ετήσια αύξηση της τάξης του 28 %. Σύμφωνα με τον οργανισμό EWEA (European Wind Energy Association), προκύπτουν τα εξής στατιστικά για την υπεράκτια αιολική βιομηχανία της Ευρώπης:

- Κατά το διάστημα αυτό υπήρξαν συνδεδεμένες στο δίκτυο 118 υπεράκτιες ανεμογεννήτριες οι οποίες παρήγαγαν συνολικά 333 MW και 16 υπεράκτια αιολικά πάρκα ήταν υπό κατασκευή. Οι ανεμογεννήτριες που προαναφέρθηκαν βρίσκονται στα αιολικά πάρκα: Rodsand και Poseidon στη Δανία, Alpha Ventus στη Γερμανία, Gunfleet Sands, Robin Rigg και Thanet στην Αγγλία.
- Έχουν τοποθετηθεί συνολικά 263 ανεμογεννήτριες, οι οποίες αποδίδουν συνολικά 440MW, σε 7 αιολικά πάρκα: Behvind στο Βέλγιο. Rodsand και Poseidon στη Δανία, BARD Offshore I στη Γερμανία, Gabbard, Gunfleet and Thanet στο Ηνωμένο Βασίλειο.
- Έγιναν οι βάσεις για την εγκατάσταση 163 ανεμογεννητριών σε συνολικά 9 πάρκα: στο Belwind του Βελγίου, τα Rodsand και Poseidon της Δανίας, Τα B31110 I και BAPI Offshore I της Γερμανίας και τα Greater Gabbard, Sheringham Shoal, Thanet και Walney στο Ηνωμένο Βασίλειο.

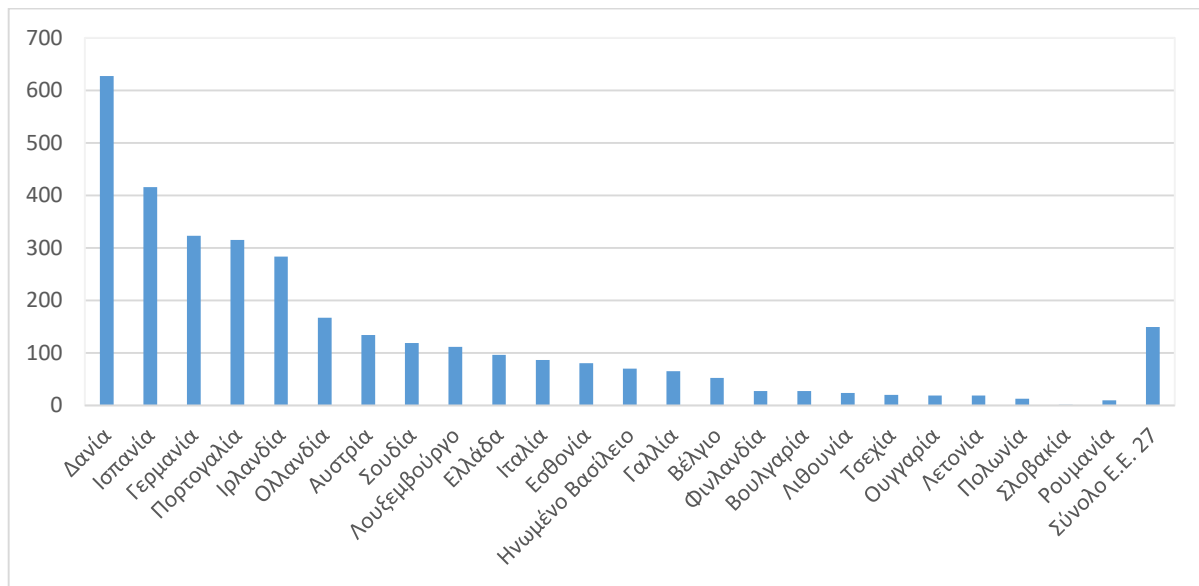
<sup>39</sup>WWF Ελλάς. Θαλάσσιες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αθήνα, 2015.

<sup>40</sup>WWF Ελλάς. Θαλάσσιες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αθήνα, 2015.



- Σε λειτουργία τέθηκαν 4 από τα αιολικά πάρκα που προαναφέρθηκαν: το Poseidon στη Δανία, το Alpha Ventus στη Γερμανία, τα Gunfleet Sands και Robin Rigg στο Ηνωμένο Βασίλειο.
- Τέλος πραγματοποιήθηκαν οι προκαταρκτικές εργασίες, χωρίς ωστόσο να εγκατασταθούν ανεμογεννήτριες ή θεμέλια, σε 3 πάρκα: Global Tech 1 and Nordergrönne στη Γερμανία και Ortnonde στο Ηνωμένο Βασίλειο<sup>41</sup>.

Όλα τα παραπάνω συνεισέφεραν ώστε η εγκατεστημένη ισχύς των υπεράκτιων αιολικών εγκαταστάσεων στην Ευρώπη να αγγίζει τα 3000MW.



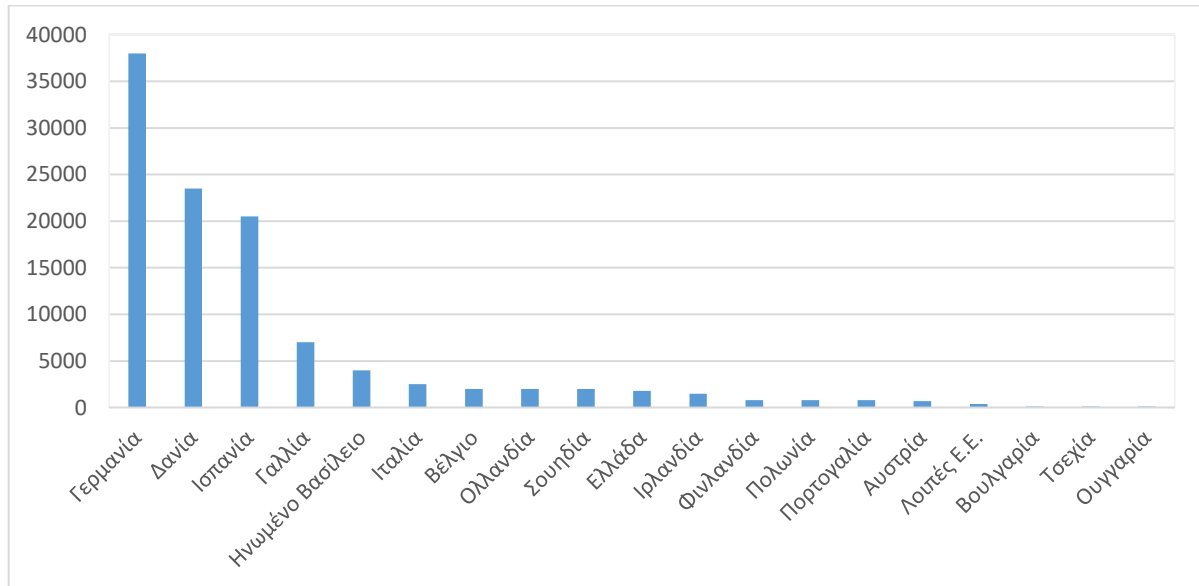
Σχήμα 2.4: Εγκατεστημένη ισχύς σε kWh ανά 1000 κατοίκους στις χώρες της Ε.Ε.<sup>42</sup>.

Όσον αφορά τον εργασιακό τομέα σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες φαίνεται πως η Γερμανία είναι η πρώτη χώρα στην Ευρώπη στην προσφορά εργασίας στον τομέα της αιολικής ενέργειας. Συγκεκριμένα απασχολεί περίπου 38000 εργαζομένους, τη στιγμή που στην Ελλάδα ο αριθμός αυτός είναι μόλις στους 1800. Τέλος σε χώρες όπως η Τσεχία και η Ουγγαρία όπου η αιολική ενέργεια είναι ακόμη υποανάπτυκτη δεν υπάρχει μεγάλη ζήτηση στην αγορά εργασίας που αφορά την αιολική ενέργεια, με αποτέλεσμα τα νούμερα τους να είναι εξαιρετικά χαμηλά.

<sup>41</sup> Wind Europe. The European offshore wind industry: Key trends and statistics 2016. windeurope.org, January 2017.

<sup>42</sup> Wind Europe. The European offshore wind industry: Key trends and statistics 2016. windeurope.org, January 2017.





Σχήμα 2.5: Άμεσες θέσεις απασχόλησης στην αιολική ενέργεια στην Ε.Ε.<sup>43</sup>.

### HornsRev 2

Τη στιγμή που η Ελλάδα ψάχνει τρόπους να συνδυάσει τα αιολικά πάρκα με άλλες δραστηριότητες, στην υπόλοιπη Ευρώπη ο τομέας αυτός εξελίσσεται με γοργούς ρυθμούς. Συγκεκριμένα, στη Δανία υπερδιπλασιάστηκαν κατά τα τελευταία χρόνια τα αιολικά πάρκα, καθώς προέκυψε πολύ μεγάλο ενδιαφέρον και επενδύθηκαν σημαντικά κεφάλαια. Πλέον στη Δανία οι ανεμογεννήτριες καλύπτουν το 20 % της συνολικής καταναλωμένης ηλεκτρικής ενέργειας.

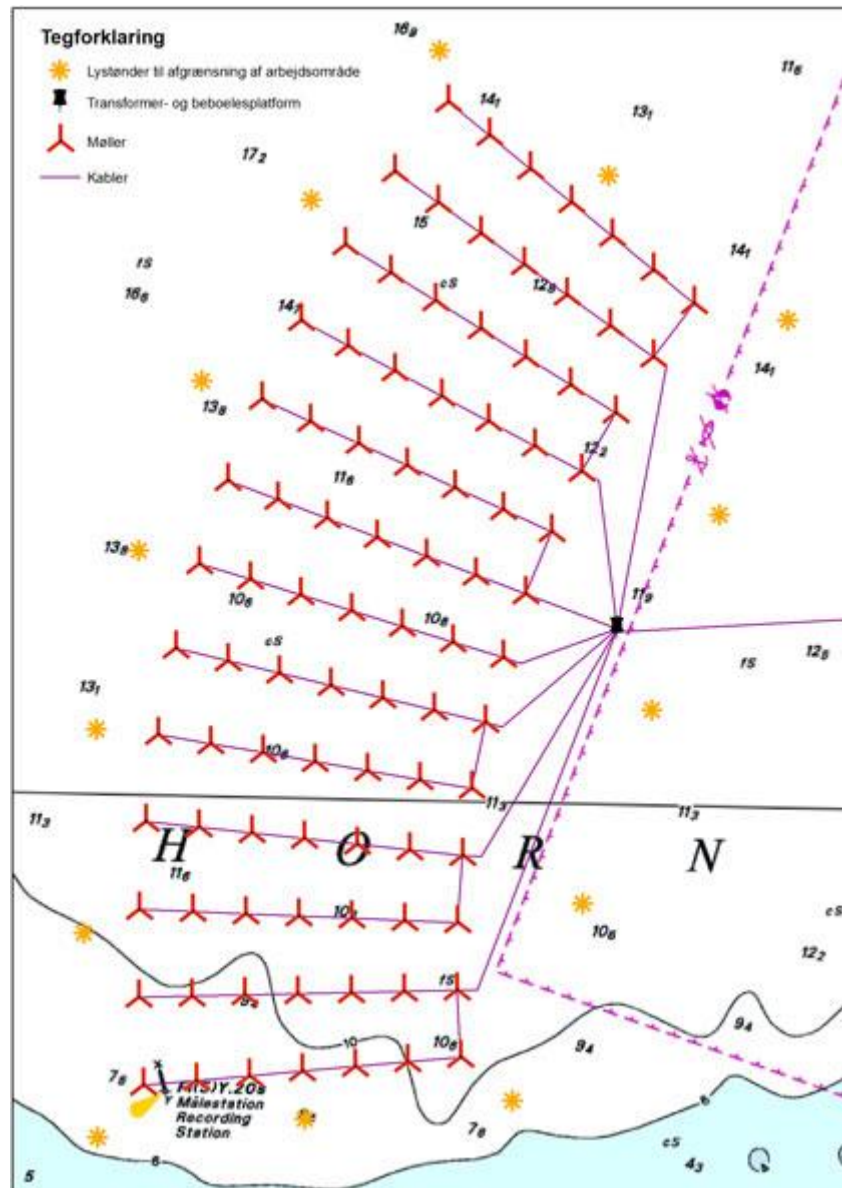
Επιπλέον το μεγαλύτερο αιολικό πάρκο παγκοσμίως βρίσκεται στη Δανία. Η εγκατάσταση αυτή έχει έκταση 35 τετραγωνικά χιλιόμετρα εντός των οποίων βρίσκονται 91 ανεμογεννήτριες της εταιρίας Siemens, με συνολική ισχύ 2,3MWανά ώρα.

Το πάρκο αυτό κατασκευάστηκε ώστε να καλύψει τις ανάγκες σε ηλεκτρισμό από 200 χιλιάδες νοικοκυριά, σύμφωνα με ανακοίνωση της εταιρίας Dong Energy.

Το κόστος της εγκατάστασης ανήλθε στα 469 εκατομμύρια € και είναι το ένατο υπεράκτιο αιολικό πάρκο που κατασκευάζεται στη Δανία από το 1991<sup>44</sup> (Σχήμα 2.6).

<sup>43</sup> EurObserv'ER. The EurObserv'ER barometers. 2016. <https://www.eurobserv-er.org/>.

<sup>44</sup>Dong Energy. Horns Rev 2. London, 2010.



Σχήμα 2.6: HornsRev 2 – Σχέδιο εγκατάστασης<sup>45</sup>.

### Thanet offshore wind farm

Το αιολικό πάρκο Thanet βρίσκεται 11 χιλιόμετρα από την ακτή Thanet, στη περιοχή Kent στο Ηνωμένο Βασίλειο. Είναι ένα από τα 15 έργα αιολικής ενέργειας του δεύτερου γύρου αιτήσεων, το οποίο ξεκίνησε από την Crown Estates, μια ανεξάρτητη εμπορική επιχείρηση. Είναι επίσης το μεγαλύτερο σε λειτουργία υπεράκτιο αιολικό πάρκο στον κόσμο μέχρι σήμερα και ανήκει στη σουηδική εταιρεία ενέργειας Vattenfall.

Το αιολικό πάρκο έχει εγκατεστημένη ισχύ 300 MW, η οποία είναι αρκετή για να τροφοδοτήσει 240.000 σπίτια και έχει ως διάρκεια ζωής 40 έτη.

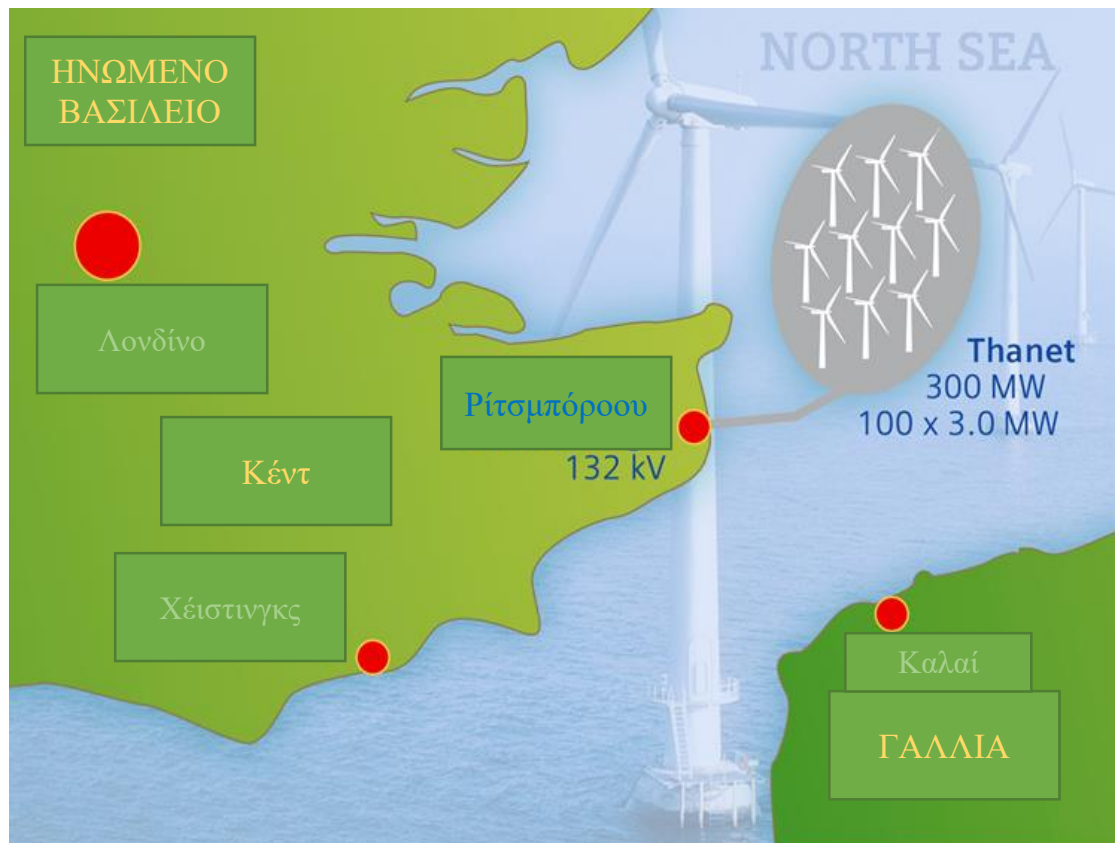
<sup>45</sup> <http://www.lorc.dk/offshore-wind-farms-map/horns-rev-2>



Το αιολικό πάρκο Thanet εγκρίθηκε προς κατασκευή το Δεκέμβριο του 2006. Η κατασκευή άρχισε τον Ιανουάριο του 2008 και ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2010, με την εγκατάσταση της τελευταίας τουρμπίνας. Το εκτιμώμενο κόστος του έργου ανέρχεται στα 780 εκατομμύρια λίρες.

Το αιολικό πάρκο Thanet παράγεται 2-2.8 MW της τροφοδοσίας κατά την εκτέλεση της δοκιμής, στις 16 Μαΐου 2010.

Η εταιρεία του έργου Thanet Offshore Wind Ltd αρχικά είχε σχεδιαστεί το 2003 από την Warwick Energy σύμφωνα με τις αιτήσεις πιστοποίησης Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα Γύρος 2. Το 2007, η εταιρία Christoffersen, Robb & Co (CRC) αγόρασε το έργο και το έβγαλε στην αγορά. Η Warwick Energy συνέχισε να διαχειρίζεται το έργο μέχρι τον Οκτώβριο του 2008. Το Νοέμβριο του 2008 Vattenfal απέκτησε την CRC, και συνέχισε τη διαχείριση του έργου<sup>46</sup>.



Σχήμα 2.7: Thanet – Τοποθεσία πάρκου<sup>47</sup>.

Η Siemens πραγματοποίησε τις μελέτες σχεδιασμού του δικτύου πλέγματος. Κατασκεύασε επίσης το χερσαίο υποσταθμό και παρείχε δύο 180-MVA μετασχηματιστές ισχύος. Τα δύο τριφασικά υποθαλάσσια καλώδια υψηλής τάσης, 132kV παρασχέθηκαν από την ομάδα Prysmian με έδρα την Ιταλία. Ο εργολάβος οικοδομών W.W. Martin ανέλαβε το έργο για την κατασκευή του χερσαίου υποσταθμού και τη συντήρηση του κτιρίου.

<sup>46</sup> power-technology. Thanet Offshore Wind Farm, Kent, United Kingdom. 2015. <http://www.power-technology.com/projects/thanetwindfarm/>.

<sup>47</sup> [http://www.siemens.com/press/pool/de/pressebilder/power\\_transmission/300dpi/EPT200809064-01\\_300dpi.jpg](http://www.siemens.com/press/pool/de/pressebilder/power_transmission/300dpi/EPT200809064-01_300dpi.jpg)



Το πάρκο διαθέτει 100 ανεμογεννήτριες ισχύς 3MW, τύπου Vestas V90 και η έκτασή του φτάνει τα 35km<sup>2</sup>. Η απόσταση μεταξύ κάθε τουρμπίνας είναι 500 μέτρα κατά μήκος των γραμμών και 800 μεταξύ των στηλών. Οι ανεμογεννήτριες εγκαθίστανται σε βάθος 20-25m. Κάθε ανεμογεννήτρια έχει ύψος 115m έως το υψηλότερο σημείο του ρότορα της.

Ο χερσαίος υποσταθμός περιλαμβάνει δύο μετασχηματιστές ισχύος 180 MVA, καθιστώντας το, το πρώτο αιολικό πάρκο του κόσμου με δύο μετασχηματιστές ισχύος. Ο υποσταθμός είναι συνδεδεμένος με το δίκτυο με γραμμές μεταφοράς 33 / 132kV, οι οποίες ενισχύουν τη δύναμη από 33kV σε 132kV.

Το χερσαίο δίκτυο σύνδεσης διαθέτει ένα σύστημα αποζημίωσης αέργου ισχύος με τη χρήση του αντισταθμιστή Static Var (SVC). Παρέχει την απαραίτητη διόρθωση για την αύξηση της ποιότητας τάσης και λειτουργεί σύμφωνα με το σύστημα παροχής δύναμης της Βρετανίας. Οι υποσταθμοί διαθέτουν επίσης τεχνολογίες διακοπών υψηλής τάσης για να παρέχουν επαρκή προστασία και τεχνολογία ελέγχου<sup>48</sup>.



Σχήμα 2.8: Thanet– Εγκαταστάσεις<sup>49</sup>.

### Επενδύσεις στην Ευρώπη

Οι επενδύσεις στην υπεράκτια αιολική ενέργεια στην Ευρώπη συνέχισαν να αυξάνονται με έντονο ρυθμό κατά τη διάρκεια του 2016. Έντεκα έργα έφτασαν στο τελικό στάδιο επένδυσης (Final Investment Decision) το 2016, με συνολικές επενδύσεις αξίας πάνω από 18 εκατομμύρια €. Αυτό αντιπροσωπεύει μια αύξηση της τάξης του 39 % σε σχέση με το 2015. Συνολικά, 4,9 GW ισχύς χρηματοδοτήθηκαν σε πέντε χώρες. Πάνω από το μισό αυτής της τιμής ήταν στο Ηνωμένο Βασίλειο.

<sup>48</sup> power-technology. Thanet Offshore Wind Farm, Kent, United Kingdom. 2015. <http://www.power-technology.com/projects/thanetwindfarm/>.

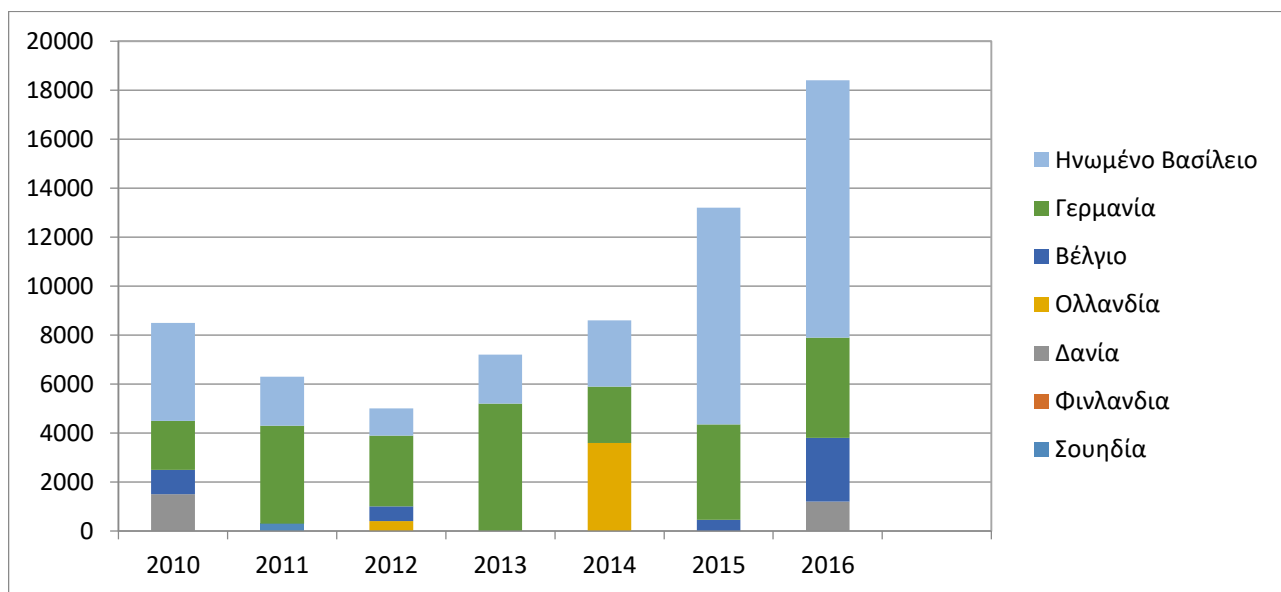
<sup>49</sup> <http://www.power-technology.com/uploads/newsarticle/1062252/images/211534/large/8l-thanet.jpg>



Πίνακας 2.3: Επενδύσεις σε αιολικά πάρκα, Ευρώπη 2016<sup>50</sup>.

Χώρα	Συνολικές νέες επενδύσεις (δισεκατομμύρια €)	Χρηματοδοτήσεις με βάση την ισχύ (MW)
Βέλγιο	2,300	679
Δανία	1,000	400
Φινλανδία	120	40
Γερμανία	4,289	1,235
Αγγλία	10,493	2,594
Συνολικά	18,202	4,948

Συνολικά, η επένδυση στην υπεράκτια αιολική βιομηχανία στην Ευρώπη, κατά τα τελευταία χρόνια γνώρισε την αύξηση με μέσο ετήσιο ρυθμό 30 %. Αυτό οφείλεται στο σταθερό επίπεδο των επενδύσεων στις μεγάλες αγορές όπως η Γερμανία και το Ηνωμένο Βασίλειο. Με 10,5 δισεκατομμύρια, το Ηνωμένο Βασίλειο είχε το μεγαλύτερο επίπεδο των επενδύσεων το 2016. Συνολικά, η χώρα έχει προσελκύσει 31.3 δισεκατομμύρια από το 2010 για νέες χρηματοδοτήσεις, καθιστώντας την μεγαλύτερη δύναμη στην αγορά αιολικής ενέργειας τη δεδομένη περίοδο.



Σχήμα 2.9: Επενδύσεις σε αιολικά πάρκα 2010-2016<sup>51</sup>.

## 2.4 Πλεονεκτήματα υπεράκτιας αιολικής ενέργειας συγκριτικά με τα αιολικά πάρκα στη στεριά

Η τρέχουσα εργασία πραγματεύεται τη μελέτη των αιολικών πάρκων υπεράκτια και την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας που επικρατεί στις υπεράκτιες περιοχές. Η ενέργεια αυτή θεωρείται ζωτικής σημασίας για το μέλλον, για τις χώρες με μεγάλη πυκνότητα σε πληθυσμό, όπου η εύρεση της γης για τη κατασκευή αιολικού πάρκου είναι δυσκολότερη. Η τεχνολογία αυτή παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα όπως η δυσκολία στη κατασκευή πύργων ανεμογεννητριών οι οποίοι πρόκειται να εγκατασταθούν σε σημεία με μεγάλο βάθος στη

<sup>50</sup> Wind Europe. The European offshore wind industry: Key trends and statistics 2016. windeurope.org, January 2017.

<sup>51</sup> Wind Europe. The European offshore wind industry: Key trends and statistics 2016. windeurope.org, January 2017.





θάλασσα. Επιπλέον το κόστος για τη κατασκευή και τη συντήρηση αιολικών πάρκων αυτού του τύπου είναι ιδιαίτερα υψηλό.

Ωστόσο τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από τις υπεράκτιες εγκαταστάσεις είναι πολλά και σημαντικά, με αποτέλεσμα να καθιστούν τέτοιες κατασκευές συμφέρουσες προς τη κοινωνία.

Αναλυτικότερα τα σημαντικότερα από τα πλεονεκτήματα των υπεράκτιων αιολικών πάρκων σε σύγκριση με τα συμβατικά που βρίσκονται στη στεριά, είναι:

- Περισσότερες επιλογές περιοχών για τη κατασκευή αιολικών πάρκων. Όπως αναφέρεται και παραπάνω σε πυκνοκατοικημένες περιοχές είναι συνηθισμένο φαινόμενο να μην υπάρχουν διαθέσιμες εκτάσεις γης για τη κατασκευή αιολικών πάρκων ή οι διαθέσιμες περιοχές να προορίζονται να αξιοποιηθούν για γεωργικούς σκοπούς. Άλλοι παράγοντες που μπορούν να εμποδίσουν τη κατασκευή αιολικού πάρκου σε μια συγκεκριμένη περιοχή είναι η οπτική όχληση που δημιουργείται από τις ανεμογεννήτριες, αλλά και η επιθυμία για τη διατήρηση του φυσικού περιβάλλοντος σε μια περιοχή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αναζήτηση νέων περιοχών με τις θαλάσσιες περιοχές να λύνουν τα παραπάνω προβλήματα και να παρουσιάζονται ως οι καταλληλότερες.
- Οι υψηλές ταχύτητες του ανέμου. Πλεονέκτημα άξιο αναφοράς είναι η ταχύτητα του ανέμου στις παραθαλάσσιες περιοχές, όπου παρουσιάζεται υψηλότερη συγκριτικά με τη στεριά. Μάλιστα μελέτες έχουν δείξει πως η ταχύτητα αυτή μπορεί να αυξηθεί σε ποσοστά της τάξης του 70 % της φυσιολογικής, καθώς η ανεμογεννήτρια απομακρύνεται από τη στεριά.
- Μεγαλύτερη σταθερότητα στη παροχή του ανέμου. Στη θάλασσα οι περίοδοι νηνεμίας είναι σπάνιο φαινόμενο και όταν συμβούν διαρκούν για πολύ μικρά διαστήματα και συνεπώς ένα αιολικό πάρκο θα έχει παροχή ανέμου για μεγαλύτερη διάρκεια με αποτέλεσμα τη καλύτερη απόδοση συγκριτικά με ένα συμβατικό στη στεριά της ίδιας δυναμικότητας.
- Οι Ευρωπαϊκές ακτές. Σε αποστάσεις μικρότερες των πενήντα χιλιομέτρων από τις ακτές της Ευρώπης παρατηρούνται πολύ ισχυροί άνεμοι οι οποίοι ορισμένες φορές είναι ικανοί να υπερκαλύπτουν τη συνολική κατανάλωση της Ευρώπης σε ηλεκτρική ενέργεια. Στη πράξη η εκμετάλλευση της συνολικής αυτής ενέργειας για διάφορους λόγους (πολιτικούς, τεχνικούς, οικονομικούς) δεν είναι δυνατή, ωστόσο δηλώνει πως η υπεράκτια ενέργεια για την Ευρώπη είναι ένα πολύ ισχυρό χαρτί που μπορεί κάποια στιγμή να φανεί χρήσιμο για την απεξάρτηση από άλλες χώρες.
- Η τραχύτητα του εδάφους. Στη θάλασσα δεν υπάρχουν μεγάλες μεταβολές ανάλογα με το υψόμετρο λόγω της χαμηλής τραχύτητας στην επιφάνεια της. Αντίθετα στη στεριά όπου παρουσιάζονται μεγάλη τραχύτητα στο έδαφος, η ταχύτητα του ανέμου διαφέρει σημαντικά με το υψόμετρο και κατά συνέπεια με το ύψος της ανεμογεννήτριας.
- Μειωμένες αναταράξεις στους ανέμους. Λόγω της μικρής διαφοράς της θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας της θάλασσας και του αέρα που πνέει πάνω από αυτή, σε αντίθεση με την αντίστοιχη διαφορά που επικρατεί στη στεριά, οι αναταράξεις που προκαλούνται στη θάλασσα είναι λιγότερες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να προκύπτουν μικρότερα μηχανικά φορτία και μικρότερη καταπόνηση των ανεμογεννητριών. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό παρατηρώντας πως μια ανεμογεννήτρια που στη στεριά έχει 20 χρόνια ζωής σε περίπτωση που τοποθετηθεί στη θάλασσα μπορεί να επιβιώσει 25 με 30 χρόνια<sup>52</sup>.

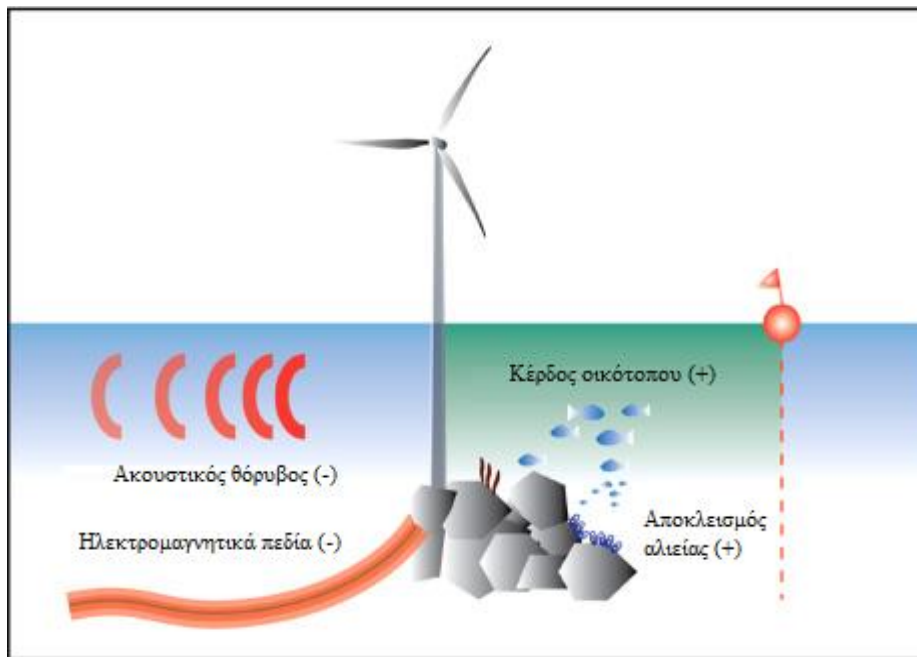
---

<sup>52</sup> Τσολάκης, Χρήστος Ε., και Σοφία Χ. Χρυσοβιτισιώτη. Μελέτη κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών νησιού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αιγάλεω: Τ. Ε. Ι. Πειραιά, Ιούνιος 2014.



## 2.5 Επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην τοπική κοινωνία

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αποτελούν μια μορφή ενέργειας φιλικότερη προς το περιβάλλον συγκριτικά με τις συμβατικές πηγές, όπως είναι το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, καθώς ελαττώνουν σημαντικά τις εκπομπές αερίων από τις καύσεις ωστόσο έχουν και αυτές ορισμένες επιπτώσεις. Τόσο τα παράκτια όσο και τα αιολικά πάρκα στη στεριά μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στο περιβάλλον όπως τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που δημιουργούν τα υποθαλάσσια καλώδια στα υπεράκτια πάρκα ή η καταστροφή της φυσικής ομορφιάς του περιβάλλοντος για τα αιολικά πάρκα στη στεριά. Επιπλέον με τη κατασκευή αιολικών πάρκων πολλές φορές παρουσιάζονται και ορισμένα κοινωνικά προβλήματα καθώς μπορούν να επηρεάσουν ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως το ψάρεμα (αιολικά πάρκα)<sup>53</sup>.



Σχήμα 2.10: Επιπτώσεις υπεράκτιου αιολικού πάρκου στο περιβάλλον<sup>54</sup>.

Πιο αναλυτικά μερικές από τις αρνητικές συνέπειες που μπορούν να προκύψουν από τη κατασκευή υπεράκτιων αιολικών πάρκων είναι:

- Οι αλλαγές στα ρεύματα μιας περιοχής. Η υδρογραφία μιας τοποθεσίας δεν μεταβάλλεται συνήθως, τουλάχιστον σε μεγάλο βαθμό από την εγκατάσταση και τη λειτουργία αιολικών πάρκων. Ωστόσο ορισμένες φορές είναι η πιθανή η μεταβολή της ροής των υδάτων και κατά συνέπεια να μεταβληθούν οι ιδιότητες των ιζημάτων της περιοχής εξαιτίας της αντίστασης που παρουσιάζουν οι πυλώνες της εγκατάστασης. Επιπλέον σε περίπτωση που επηρεαστεί η υδρογραφία μιας περιοχής, πιθανό σενάριο είναι να επηρεαστεί και η μορφολογία των γειτονικών σε αυτή ακτών. Συνεπώς πριν την επιλογή μιας τοποθεσίας για την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου, απαραίτητη προϋπόθεση είναι να μελετηθούν η τοπική υδρογραφία, τα θαλάσσια ρεύματα αλλά και η ποιότητα νερού της περιοχής.
- Ο θόρυβος και η δόνηση. Υπάρχουν δυο κατηγορίες θορύβου που προκαλούνται από ένα αιολικό πάρκο. Ο ακουστικό θόρυβος στο περιβάλλον, του οποίου η ένταση συνδέεται άμεσα με τον τρόπο με

<sup>53</sup> Bailey, Helen, Kate L Brookes, και Paul M Thompson. Assessing environmental impacts of offshore wind farms: lessons learned and recommendations for the future. BioMed Central Ltd., 2004.

<sup>54</sup> <http://iopscience.iop.org/1748-9326/9/3/034012/downloadFigure/figure/erl492511f1>.



τον οποίο θεμελιώθηκε ο πυλώνας και ο θόρυβος που προκαλείται κατά τη λειτουργία του αιολικού πάρκου. Για παράδειγμα σε περιπτώσεις όπου ο πυλώνας δεν είναι μηγγμένος στον πυθμένα υπάρχει ικανοποιητική μείωση στο θόρυβο αυτό, δημιουργώντας ωστόσο κινδύνους προς τα νεαρά ψάρια τα οποία ζουν στην επιφάνεια. Επιπλέον κατά τη λειτουργία του αιολικού πάρκου προκαλούνται διάφορες δονήσεις οι οποίες οφείλονται επίσης στους πυλώνες των ανεμογεννητριών και συγκεκριμένα στα κιβώτια των ταχυτήτων και τις γεννήτριες. Ο θόρυβος αυτός υπολογίζεται στα 80 με 150dB για 1μPa πίεση για τα μήκη κύματος του ακουστικού φάσματος των ψαριών και τον υπόλοιπων θηλαστικών. Στη δεύτερη κατηγορία θορύβου προκύπτουν θετικές αλλά και αρνητικές συνέπειες για το περιβάλλον. Παρόλο που η ένταση του δε προκαλεί προβλήματα στον προσανατολισμό των θηλαστικών της περιοχής, δε μπορεί να ειπωθεί με βεβαιότητα πως δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά τους. Κατατάσσεται στην ίδια κατηγορία με τους θορύβους από τα κύματα και τις βάρκες, καθώς έχει το ίδιο εύρος συχνοτήτων με αυτούς τους θορύβους. Ο ήχος ο οποίος παράγεται από τις ανεμογεννήτριες μπορεί να δημιουργήσει σύγχυση στα ψάρια καθώς εμπλέκεται με τους ήχους επικοινωνίας τους και να τα αποπροσανατολίσει. Περαιτέρω έρευνες απαιτούνται στην επιρροή του θορύβου αυτού στα ψάρια καθώς δε μπορεί να ειπωθεί με σιγουριά η επιρροή του στην εύρεση τροφής των ψαριών, την αναπαραγωγή τους αλλά και τη μετανάστευση τους<sup>55</sup>.

- Πρόκληση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Στις εγκαταστάσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων, χρησιμοποιούνται θωρακισμένα υποβρύχια καλώδια για τις διάφορες διασυνδέσεις εντός του πάρκου αλλά και αυτού με το κεντρικό δίκτυο. Τα καλώδια αυτά δε προκαλούν τη δημιουργία ηλεκτρικών πεδίων, ωστόσο βρίσκονται ανάμεσα σε μαγνητικά πεδία τα οποία με τη σειρά τους επάγουν ηλεκτρικά στο κινούμενο νερό. Ορισμένα είδη ψαριών τα οποία χρησιμοποιούν γεωμαγνητικά πεδία με σκοπό να προσανατολιστούν, παρουσιάζουν ευαισθησίες στα μαγνητικά πεδία και αποπροσανατολίζονται. Οι πρόσφατες έρευνες που πραγματοποιήθηκαν σε υπεράκτια αιολικά πάρκα στο Ηνωμένο Βασίλειο, κατέδειξαν πως η πιθανότητες ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο να προκαλέσει ζημιά στα ψάρια της περιοχής δεν είναι πολλές, παρόλα αυτά διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή.

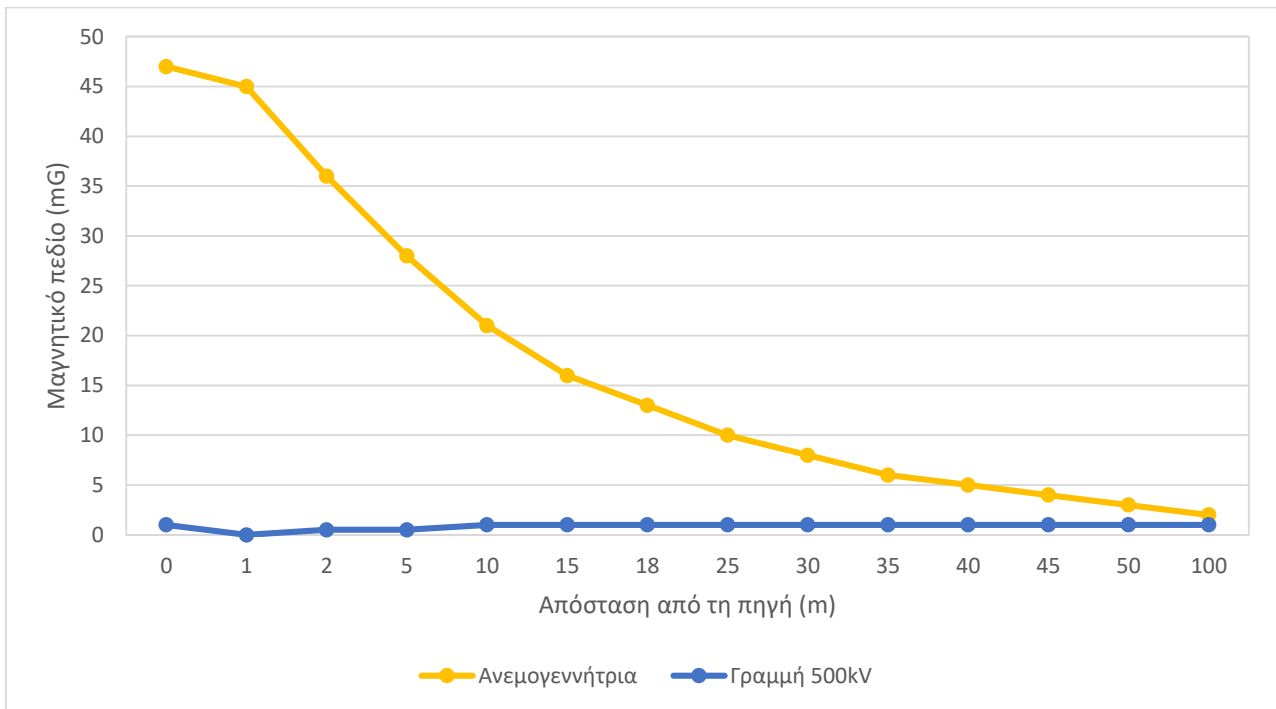
Στο παρακάτω γράφημα (Σχήμα 2.11) φαίνεται η μεταβολή των μαγνητικών πεδίων ανάλογα με την απόσταση τους από τη πηγή, για μια ανεμογεννήτρια και μια γραμμή τάσης 500kV<sup>56</sup>.

---

<sup>55</sup> Bergström, Lena, Lena Kautsky, Torleif Malm, Hans Ohlsson, και Magnus Wahlberg. Effects of wind power on marine life – a summary. Vindval.

<sup>56</sup> Bergström, Lena, Lena Kautsky, Torleif Malm, Hans Ohlsson, και Magnus Wahlberg. Effects of wind power on marine life – a summary. Vindval.





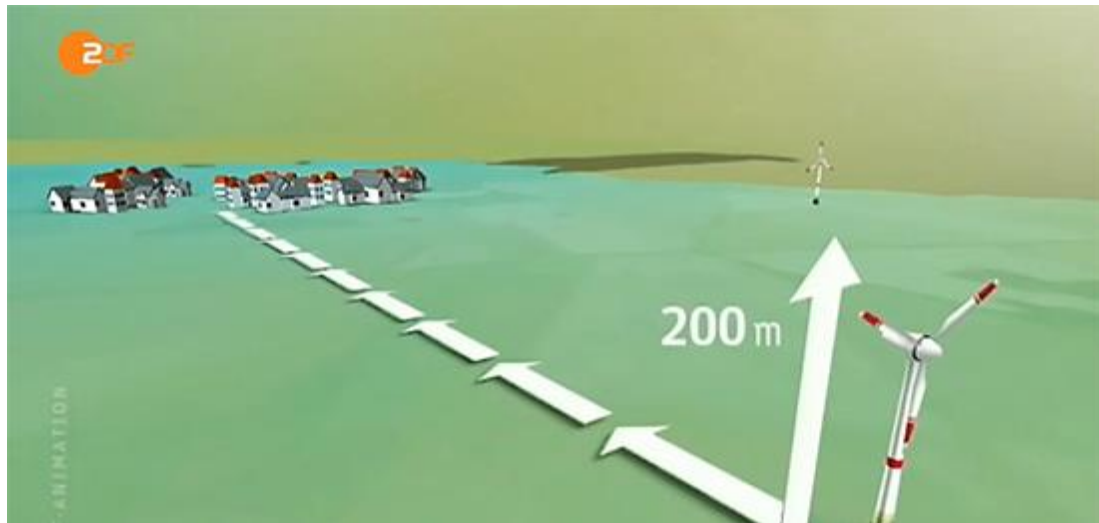
Σχήμα 2.11: Επίδραση μαγνητικών πεδίων με βάση την απόσταση<sup>57</sup>.

- Κίνδυνοι για τα πουλιά. Οι εγκαταστάσεις ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου, μπορούν να προκαλέσουν διάφορες επιπτώσεις στα πουλιά ανάλογα με τη περιοχή της εγκατάστασης. Μεγαλύτερος κίνδυνος παρατηρείται στα θαλασσοπούλι και τα αποδημητικά, καθώς αυτά τα είδη συγκρούονται με τα πτερύγια των ανεμογεννητριών και πολλές φορές μάλιστα τα πουλιά τραυματίζονται σοβαρά ή χάνουν τη ζωή τους από τις συγκρούσεις αυτές. Επιπλέον προκαλείται η μετακίνηση των πουλιών που αναζητούν νέους τόπους να αποικίσουν και πολλές φορές η εξαφάνιση τους. Συνεπώς τέτοιες εγκαταστάσεις θα πρέπει να πραγματοποιούνται μακριά από περιοχές «περάσματα» αποδημητικών πουλιών και σε περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η αποφυγή αυτή να δημιουργούνται μεγάλοι και πλατιοί διάδρομοι ανάμεσα στις ανεμογεννήτριες<sup>58</sup>.
- Οπτική όχληση. Ανάλογα με τη περιοχή της εγκατάστασης και τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν σε αυτή η οπτική όχληση διαφέρει. Σύμφωνα με έρευνες ένα αιολικό πάρκο το οποίο βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη των 15 χιλιομέτρων από την ακτή προκαλεί πολύ μικρή οπτική όχληση. Ωστόσο απαραίτητος είναι ο φωτισμός των πτερυγίων των ανεμογεννητριών καθώς μπορούν να προκαλέσουν ατυχήματα κατά τη διέλευση πλοίων κοντά σε αυτές.

Στη Γερμανία και συγκεκριμένα στη Βαυαρία, προσδιορίστηκε πως η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών και της ακτής πρέπει να είναι δέκα φορές το ύψος της ανεμογεννήτριας. Δηλαδή όπως βλέπουμε στη παρακάτω εικόνα για μια ανεμογεννήτρια ύψους 200 μέτρων, η ελάχιστη απόσταση από την ακτή πρέπει να είναι δυο χιλιόμετρα.

<sup>57</sup>[https://www.researchgate.net/profile/Melissa\\_Whitfield\\_Aslund/publication/260217370/figure/fig3/AS:203021163208706@1425415425880/Comparing-magnetic-fields-around-wind-turbines-and-a-500kV-transmission-line-Mean.png](https://www.researchgate.net/profile/Melissa_Whitfield_Aslund/publication/260217370/figure/fig3/AS:203021163208706@1425415425880/Comparing-magnetic-fields-around-wind-turbines-and-a-500kV-transmission-line-Mean.png)

<sup>58</sup> Bailey, Helen, Kate L Brookes, και Paul M Thompson. Assessing environmental impacts of offshore wind farms: lessons learned and recommendations for the future. BioMed Central Ltd., 2004.



Σχήμα 2.12: Επιπτώσεις υπεράκτιου αιολικού πάρκου στο περιβάλλον<sup>59</sup>.

- Σύγκρουση μεταξύ των συμφερόντων για τη συγκεκριμένη περιοχή της θάλασσας. Πριν την υλοποίηση ενός αιολικού πάρκου θα πρέπει πρώτα να μελετηθεί αν η συγκεκριμένη περιοχή χρησιμοποιείται ήδη ως δίοδος γραμμών ναυσιπλοΐας, αεροπορικών γραμμών, πετρελαιαγωγών, σωλήνων φυσικού αερίου ή χαρακτηρίζεται ως περιοχή με κοιτάσματα πρώτων υλών, περιοχή στρατιωτικής ή περιοχή με αλιευτικό ενδιαφέρον. Τέλος για τις περιοχές που χαρακτηρίζονται ως περιοχές με στρατιωτικό ενδιαφέρον η εκάστοτε κυβέρνηση θα πρέπει να βρίσκει λύση και να λαμβάνει τα κατάλληλα μέτρα<sup>60</sup>.

## 2.6 Παράγοντες ανάπτυξης της υπεράκτιας τεχνολογίας

Με τη κατασκευή υπεράκτιων αιολικών πάρκων δημιουργούνται νέες προδιαγραφές για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, αλλά και την διακοπή της εξάρτησης των συμβατικών μεθόδων για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα δημιουργούνται νέες προκλήσεις ώστε να αναπτυχθούν νέες τεχνολογίες για την αντιμετώπιση των διάφορων συνθηκών που επικρατούν στη θάλασσα. Πριν τη κατασκευή ενός αιολικού πάρκου υπάρχουν διάφοροι παράγοντες οι οποίοι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη<sup>61</sup>.

<sup>59</sup><http://www.windbyte.co.uk/index2.html>

<sup>60</sup> Bergström, Lena, Lena Kautsky, Torleif Malm, Hans Ohlsson, και Magnus Wahlberg. Effects of wind power on marine life – a summary. Vindval.

<sup>61</sup> Bailey, Helen, Kate L Brookes, και Paul M Thompson. Assessing environmental impacts of offshore wind farms: lessons learned and recommendations for the future. BioMed Central Ltd., 2004.



### 2.6.1 Ο πάγος



Σχήμα 2.13: Ανεμογεννήτρια καλυμμένη από πάγο<sup>62</sup>.

Ένα από τα προβλήματα που μπορούν να παρουσιαστούν και να επηρεάσουν τη λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας είναι ο πάγος. Σε περιοχές με χαμηλές θερμοκρασίες θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ο θαλάσσιος αλλά και ο ατμοσφαιρικός πάγος και η πιθανότητα να εμποδίζουν την ανεμογεννήτρια από την ομαλή λειτουργία της. Η εμφάνιση του πάγου στα πτερύγια του δρομέα της ανεμογεννήτριας μπορεί να προκαλέσει διάφορα προβλήματα στη σχεδίαση των παράκτιων ανεμογεννητριών, την προστασία των ομάδων συντήρησης και την οικονομική απόδοση του αιολικού πάρκου<sup>63</sup>.

Η εμφάνιση θαλάσσιου πάγου προκαλεί πολλές φορές προβλήματα με επιπλέον μηχανικό φορτία τα οποία ασκούνται στο πύργο της ανεμογεννήτριας και ο ατμοσφαιρικός πάγος προκαλεί διάφορα προβλήματα τα οποία είναι συνδεδεμένα και με το ύψος του δρομέα. Συνεπώς πρέπει να μελετηθεί το ρίσκο για τη πιθανή μείωση του χρόνου ζωής και των υπόλοιπων κινδύνων και να προκύψει το κατάλληλο οικονομικό πλάνο για την αγορά εξοπλισμού και την αποφυγή των παραπάνω κινδύνων.

Αναλυτικότερα ζημιές οι οποίες μπορούν να προκληθούν σε μια ανεμογεννήτρια από τον πάγο είναι:

- προβλήματα λειτουργίας στις συσκευές που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του ανέμου
- μεταβολές στις στάθμες του θορύβου
- μειωμένη απόδοση του συστήματος
- μεγάλα μηχανικά φορτία στη θεμελίωση
- μεγάλες δονήσεις
- κίνδυνος τραυματισμού της ομάδας συντήρησης από εκτόξευση πάγων

<sup>62</sup>[http://eolos.umn.edu/sites/g/files/pua1541/f/styles/panopoly\\_image\\_original/public/media/bladeicingandfouling.png?itok=nkh\\_nFR5](http://eolos.umn.edu/sites/g/files/pua1541/f/styles/panopoly_image_original/public/media/bladeicingandfouling.png?itok=nkh_nFR5).

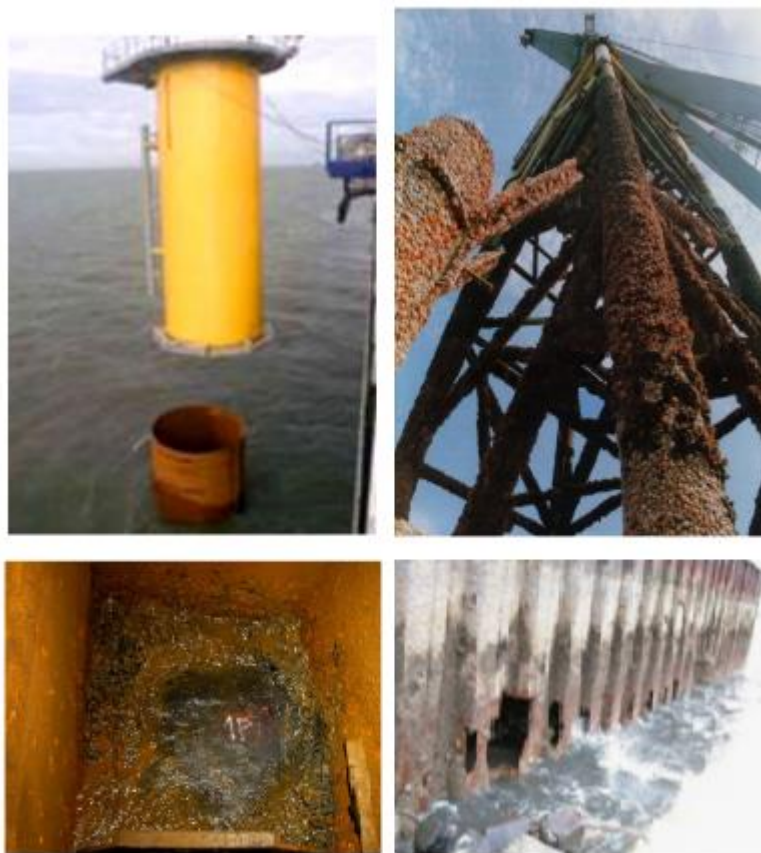
<sup>63</sup> Northern Power Systems. Engineering Bulletin Energy Production Estimating. 2014.



- δυσκολίες στην πρόσβαση
- περιορισμένος χρόνος για την εγκατάσταση του πάρκου<sup>64</sup>

### 2.6.2 Η Διάβρωση

Η διάβρωση των υλικών είναι ένα πρόβλημα που στη θάλασσα είναι εντονότερο και έχει ως αποτέλεσμα την κατακόρυφη αύξηση στο κόστος της συντήρησης των εγκαταστάσεων των υπεράκτιων αιολικών πάρκων συγκριτικά με τα πάρκα στη στεριά. Η διάβρωση στα μέταλλα στη θάλασσα είναι ένα φαινόμενο το οποίο προκαλείται από πολλούς παράγοντες όπως η ποσότητα του άλατος, η συγκέντρωση οξυγόνου, η θερμοκρασία και άλλα. Η εξάλειψη της διάβρωσης είναι πρακτικά αδύνατη, ωστόσο με τη χρήση των κατάλληλων μεθόδων μπορεί να μειωθεί σημαντικά και να βρεθεί στα αποδεκτά επίπεδα<sup>65</sup>.



Σχήμα 2.14: Το φαινόμενο της διάβρωσης στις ανεμογεννήτριες<sup>66</sup>.

Ένας τρόπος αντιμετώπισης του φαινομένου της διάβρωσης είναι το βάψιμο των επιφανειών τα οποία είναι σε επαφή με το περιβάλλον, με επιστρώσεις ψευδάργυρου ή κάποιου παραγώγου του πετρελαίου. Σε περίπτωση όπου οι επιφάνειες είναι μεγάλες και λείες υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης εποξειδικής επίστρωσης, εφόσον το πάχος της επίστρωσης ελέγχεται με ακρίβεια. Επίσης με τη χρησιμοποίηση αντιδιαβρωτικών υλικών

<sup>64</sup> Bailey, Helen, Kate L Brookes, και Paul M Thompson. Assessing environmental impacts of offshore wind farms: lessons learned and recommendations for the future. BioMed Central Ltd., 2004.

<sup>65</sup> Lossin, M. Corrosion protection for offshore wind turbines.

<sup>66</sup>van der Mijle Meijer, Harald. Corrosion in offshore wind energy: 'a major issue'. TNO, 2009.



όπως είναι το ανοξειδωτο ατσάλι, ο χαλκός και το πλαστικό μπορεί να μειωθεί σημαντικά η διάβρωση στις εγκαταστάσεις.

Όσο αφορά το εσωτερικό της ατράκτου, εκεί η θερμοκρασία θα πρέπει να διατηρείται στους 15 βαθμούς και η ατμόσφαιρα σε αυτή ξηρή με σκοπό τη προστασία των ηλεκτρονικών συσκευών αλλά και την αποφυγή επιπλέον συστήματος θέρμανσης λαδιού. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται συστήματα θέρμανσης και αφύγρανσης της ατμόσφαιρας, εντός της ατράκτου. Ο αέρας εισέρχεται εντός μέσω ειδικών φίλτρων σε δυο μονάδες οι οποίες είναι υπεύθυνες για την αφύγρανση και τη θέρμανση και λειτουργούν παράλληλα. Οι δυο μικρές αυτές μονάδες χρησιμοποιούνται για λόγους εφεδρείας και ευελιξίας αντί να χρησιμοποιηθεί μια μεγάλη μονάδα. Σε περιπτώσεις όπου χρειάζεται σύστημα για το λιώσιμο των πάγων στα πτερύγια, χρησιμοποιούνται μονάδες θέρμανσης οι οποίες στέλνουν ζεστό αέρα εντός των πτερυγίων ο οποίος εξατμίζεται μέσω μιας βαλβίδας στη κορυφή τους.

Η θέρμανση των ανεμόμετρων και των ανεμοδεικτών πραγματοποιείται μέσω ηλεκτρικών καλωδίων, ενώ για τα κιβώτια ταχυτήτων, τη γεννήτρια και των μετασχηματιστή υπάρχουν ξεχωριστά συστήματα ψύξης εξωτερικά της ατράκτου<sup>67</sup>.

---

<sup>67</sup> Lossin, M. Corrosion protection for offshore wind turbines.





## Κεφάλαιο 3 Δομή, μεταφορά και εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε υπεράκτια αιολικά πάρκα.

### 3.1 Δομή των ανεμογεννητριών

Η δομή των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται σε υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι ίδια με αυτή των συμβατικών πάρκων στη ξηρά. Ωστόσο, παρατηρούνται διαφορές σε ορισμένους τεχνολογικούς παράγοντες. Ενδεικτικά οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι:

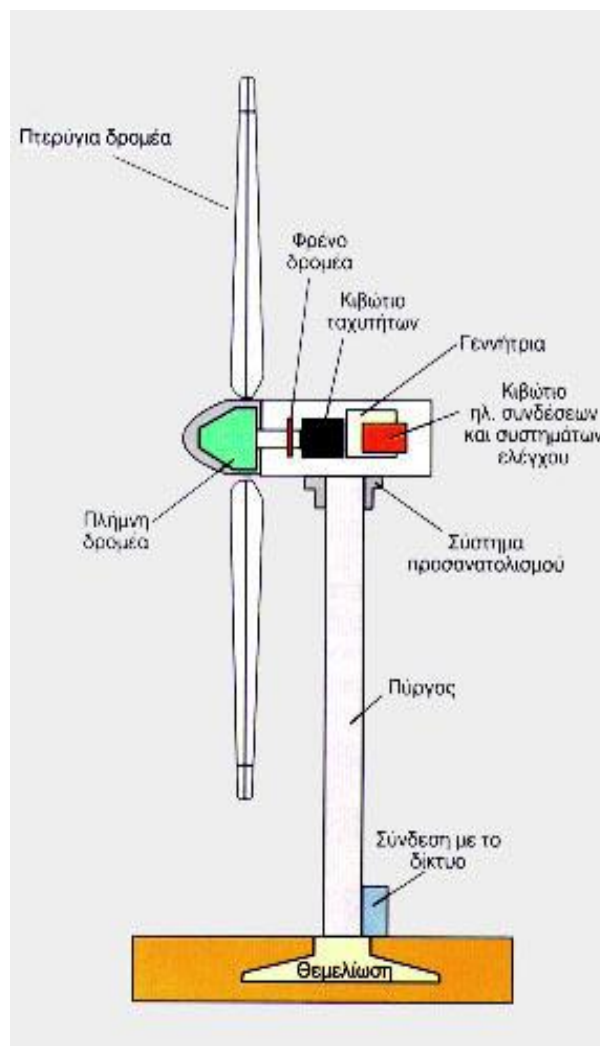
- Οι ανεμογεννήτριες των υπεράκτιων πάρκων είναι μεγαλύτερου μεγέθους με μεγαλύτερη παραγωγή ισχύος. Η επιλογή αυτή γίνεται καθώς το κόστος για την εγκατάσταση και τη συντήρηση των ανεμογεννητριών στα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι μεγαλύτερο και έτσι κρίνεται πιο συμφέρουσα η τοποθέτηση ανεμογεννητριών με μεγάλη παραγωγή ισχύος, ώστε να γίνει συντομότερα και η απόσβεση.
- Υπάρχουν αλλαγές στη θεμελίωση των ανεμογεννητριών, ώστε να είναι σε θέση να αντέχουν τα φορτία από τα κύματα και τα θαλάσσια ρεύματα.
- Το ύψος των πύργων είναι μικρότερο καθώς στη θάλασσα υπάρχει μικρότερη εξάρτηση της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος, συγκριτικά με τη στεριά.
- Στις ανεμογεννήτριες των υπεράκτιων αιολικών πάρκων υπάρχει ένα συγκεκριμένο σημείο που έχει σχεδιαστεί για την ασφαλή αποβίβαση από βάρκες και καράβια αλλά και την προσγείωση ελικοπτέρων. Έτσι το προσωπικό συντήρησης μπορεί να προσεγγίσει τις ανεμογεννήτριες με ασφάλεια, με το κόστος ωστόσο να αυξάνεται σημαντικά και την εγκατάσταση να γίνεται περισσότερο πολύπλοκη. Επίσης σε πολλές περιπτώσεις σχεδιάζεται και ένας ειδικός χώρος που προσφέρει καταφύγιο στο προσωπικό όταν επικρατούν απότομες αλλαγές των καιρικών συνθηκών.
- Στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες πολλές φορές είναι εγκατεστημένο ένα σύστημα για τη παρακολούθηση της κατάστασης τους και την αναφορά ενδεχόμενων ηλεκτρολογικών και μηχανολογικών βλαβών. Το σύστημα αυτό ονομάζεται CMS (Condition Monitoring System) και προσφέρει τη δυνατότητα προγραμματισμού της ανεμογεννήτριας ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες. Κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αξιοπιστίας και τη μείωση των απρόσμενων διακοπών στη λειτουργία του πάρκου.
- Τέλος στα υπεράκτια πάρκα συναντώνται περισσότερα στοιχεία εφεδρείας καθώς όπως προαναφέρθηκε η προσέγγιση του εξοπλισμού από το προσωπικό συντήρησης είναι δυσκολότερη από ότι στα πάρκα στη στεριά.

Στο Σχήμα 3.1 διακρίνονται τα στοιχεία που αποτελούν τη δομή μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα (αναλύεται παρακάτω ο ορισμός). Τα βασικότερα στοιχεία είναι:

- Ο δρομέας: αποτελείται από τη πλήμνη και τα πτερύγια, τα οποία είναι κατασκευασμένα από κατάλληλα υλικά ώστε να έχουν αεροδυναμικό χαρακτήρα.
- Το φρένο του δρομέα: ο μηχανισμός με τον οποίο διακόπτεται η λειτουργία του δρομέα για λόγους έκτακτης ανάγκης ή για συντήρηση. Το φρένο μπορεί να είναι μηχανικό, υδραυλικό ή ηλεκτρικό.
- Το κιβώτιο ταχυτήτων: είναι ο μηχανισμός που μετατρέπει τις χαμηλές περιστροφικές ταχύτητες των πτερυγίων στις υψηλές ταχύτητες των γεννητριών. Αποτελεί ένα ακριβό και βαρύ εξάρτημα και για το λόγο αυτό διεξάγονται έρευνες ώστε να βελτιστοποιηθεί στο μέλλον.
- Η γεννήτρια: η σύνδεση της με το κιβώτιο ταχυτήτων πραγματοποιείται μέσω του άξονα χαμηλής ταχύτητας και η λειτουργία της είναι η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική ισχύ μέσω του μετασχηματιστή του δικτύου. Μπορεί να είναι σύγχρονη ή ασύγχρονη, ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής.



- Το σύστημα προσανατολισμού: αποτελείται από έναν σερβοκινητήρα που είναι υπεύθυνος για τη περιστροφή της ατράκτου με σκοπό ο δρομέας να διατηρείται κάθετος στη κατεύθυνση του ανέμου, κάτι που συμβάλει στη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης της αιολικής ενέργειας.
- Ο πύργος: όπως και στις συμβατικές ανεμογεννήτριες ο πύργος είναι ο συνδετικός σωλήνας ανάμεσα στη θεμελίωση και στην άτρακτο της ανεμογεννήτριας. Στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες το ύψος του πύργου είναι μικρότερο καθώς δεν υπάρχει εξάρτηση του ύψους με τη ταχύτητα του ανέμου<sup>68</sup>.
- Η διασύνδεση με το δίκτυο: θα αναλυθεί παρακάτω.
- Η θεμελίωση: η θεμελίωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών διαφέρει σε σχέση με αυτών στη ξηρά και χωρίζεται σε 5 είδη: Monopile, Gravity-based Structure, Tripod, Jacket και Tri-pile. Τα είδη αυτά θα αναλυθούν περισσότερο σε παρακάτω κεφάλαιο<sup>69</sup>.



Σχήμα 3.1: Η δομή της ανεμογεννήτριας<sup>70</sup>.

<sup>68</sup> Jamieson, Peter. Offshore Wind Turbines. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 2011.

<sup>69</sup> Jamieson, Peter. Offshore Wind Turbines. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 2011.

<sup>70</sup><http://1.bp.blogspot.com/-9IWNZT0i1Tg/Tw3YTEbFL4I/AAAAAAAAAAD4/2U6V54RvP5o/s400/wind.jpg>.





Επιπλέον στοιχεία που υπάρχουν στις υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι:

- Η άτρακτος: ο χώρος στον οποίο βρίσκονται τα περισσότερα από τα λειτουργικά μέρη της ανεμογεννήτριας (κιβώτιο ταχυτήτων, γεννήτρια). Τοποθετείται στη κορυφή του πύργου και το μέγεθος της προσφέρει τη δυνατότητα στο προσωπικό συντήρησης να εισέλθει εντός αυτής για την απαραίτητη συντήρηση. Επιπλέον εκεί βρίσκεται και ο χώρος για τη προσγείωση των ελικοπτέρων.
- Το ανεμόμετρο: είναι το όργανο μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου. Αφού υπολογίσει τη ταχύτητα στέλνει τα δεδομένα σε έναν ελεγκτή ο οποίος ρυθμίζει τη κατάσταση της ανεμογεννήτριας. Σε περίπτωση που η ταχύτητα είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη τιμή ο ελεγκτής ενεργοποιεί την ανεμογεννήτρια, σε περίπτωση που η ταχύτητα ξεπεράσει τη μέγιστη τιμή η ανεμογεννήτρια απενεργοποιείται<sup>71</sup>.
- Ο ανεμοδείκτης: όργανο το οποίο ρυθμίζει το μηχανισμό προσανατολισμού με τη κατάλληλη διεύθυνση, μετά από υπολογισμούς της κατεύθυνσης του ανέμου.
- Ο άξονας υψηλής ταχύτητας: είναι ο μηχανισμός ο οποίος βάζει σε κίνηση την γεννήτρια.
- Ο άξονας χαμηλής ταχύτητας: δέχεται τη κίνηση του από τον δρομέα.
- Κλίση πτερυγίου: υπάρχει ένα ειδικό αυτόματο σύστημα το οποίο ελέγχει τη ταχύτητα του δρομέα και προκαλεί τη περιστροφή των πτερυγίων γύρω από τον άξονα τους. Επίσης επιτρέπει τα πτερύγια να έχουν άμεση συμβολή στο φρενάρισμα του δρομέα όταν οι άνεμοι κρίνονται πολύ ισχυροί.

## 3.2 Κατηγορίες ανεμογεννητριών

Στις μέρες μας, με την εξέλιξη της τεχνολογίας και τις συνεχόμενες έρευνες για την εύρεση νέων καινοτομιών στις ανεμογεννήτριες, έχουν προκύψει διάφορα είδη ανεμογεννητριών. Συγκεκριμένα μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες με διάφορες υποκατηγορίες στην κάθε μια. Μια ανεμογεννήτρια λοιπόν μπορεί να κατηγοριοποιηθεί με βάση:

- τη θέση της γεννήτριας της
- τον προσανατολισμό της στον άνεμο
- τον αριθμό των πτερυγίων της
- τη μέθοδο για τον έλεγχο της ισχύος

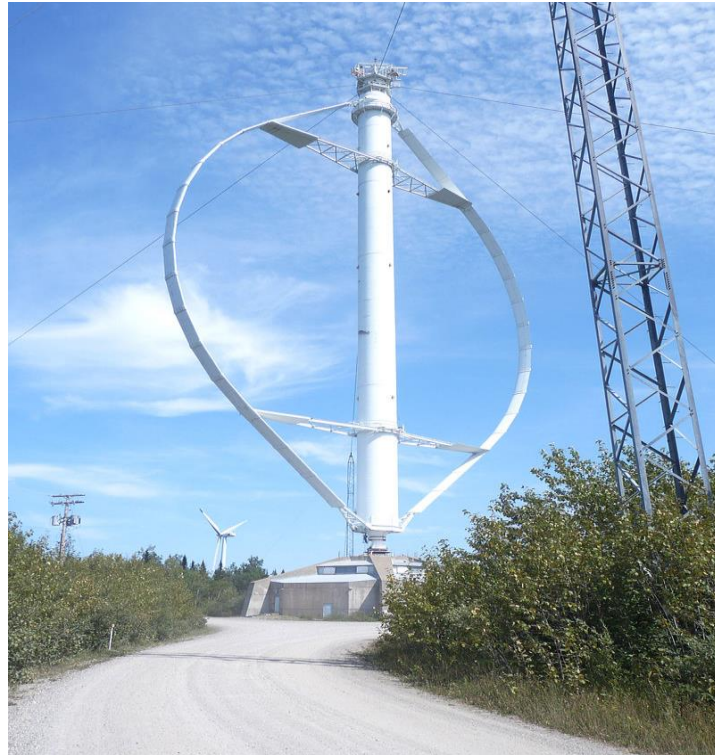
### 3.2.1 Επιλογή βάσει της θέσης της γεννήτριας

Στη κατηγορία αυτή υπάρχουν δυο επιμέρους υποκατηγορίες:

**α) Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα (VAWT):** ανεμογεννήτριες με άξονα περιστροφής κάθετο στο έδαφος. Είναι απλές στη λειτουργία και το σχεδιασμό τους και θεωρούνται κατάλληλες για μικρές μονάδες σε απομακρυσμένες περιοχές όπου η συχνή συντήρηση δεν είναι εφικτή. Ο δρομέας σε αυτές τις ανεμογεννήτριες είναι εξαιρετικά σταθερός και με μεγάλη μηχανική αντίσταση. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται μια ανεμογεννήτρια τύπου VAWT<sup>72</sup>.

<sup>71</sup> Houlby, G. T., και B. W. Byrne. Foundations for offshore wind turbines. The Royal Society, 2003.

<sup>72</sup> Houlby, G. T., και B. W. Byrne. Foundations for offshore wind turbines. The Royal Society, 2003.



Σχήμα 3.2: Ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα – VAWT<sup>73</sup>.

**β) Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (HAWT):** αποτελούν τις πιο συνηθισμένες ανεμογεννήτριες όπου ο δρομέας με τη περιστροφή του προκαλεί τη μετατροπή της γραμμικής κίνησης του αέρα σε περιστροφική για τη γεννήτρια που στη συνέχεια παράγει την ηλεκτρική ενέργεια. Οι περισσότερες εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων σήμερα χρησιμοποιούν αυτού του τύπου τις ανεμογεννήτριες<sup>74</sup>.

---

<sup>73</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/Vertical\\_axis\\_wind\\_turbine](https://en.wikipedia.org/wiki/Vertical_axis_wind_turbine).

<sup>74</sup> Houlby, G. T., και B. W. Byrne. Foundations for offshore wind turbines. The Royal Society, 2003.



Σχήμα 3.3: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα – HAWT<sup>75</sup>.

### 3.2.2 Επιλογή βάσει του προσανατολισμού τους στον άνεμο

Ένα άλλο κριτήριο με το οποίο μπορούν να ταξινομηθούν οι ανεμογεννήτριες είναι με βάση τον προσανατολισμό τους στον άνεμο. Σε αυτή τη κατηγορία υπάρχουν οι εξής δυο επιμέρους υποκατηγορίες:

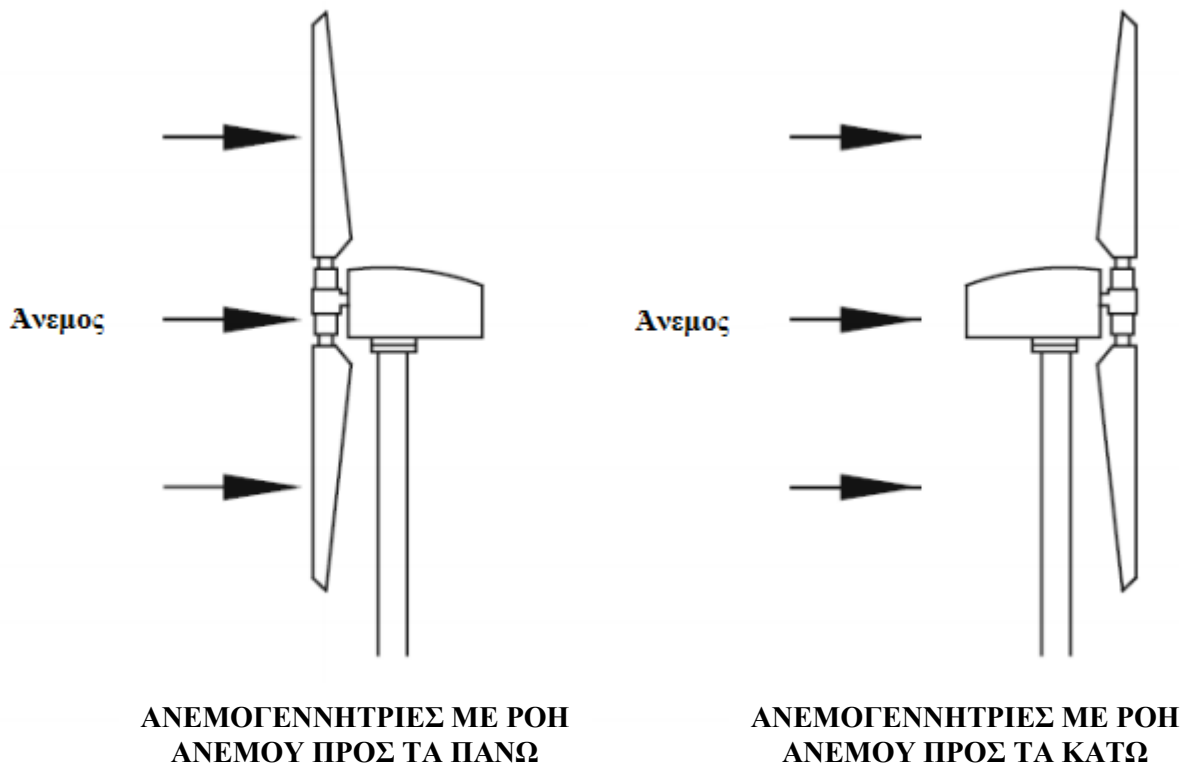
**α) Ανεμογεννήτριες με πνοή ανέμου προς τα πάνω (Upwind turbines):** Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες σε αιολικά πάρκα είναι τέτοιου τύπου. Σε αυτές ανεμογεννήτριες ο δρομέας έχει προσανατολισμό προς τον άνεμο και ως αποτέλεσμα δεν σκιάζεται από τον πύργο. Ωστόσο είναι απαραίτητη η ύπαρξη συστήματος προσανατολισμού με σκοπό να κρατά ο δρομέας την επιθυμητή θέση και να μην επηρεάζεται από τις αλλαγές του ανέμου. Επιπλέον η άτρακτος θα πρέπει να βρίσκεται σε απόσταση για να μην υπάρχει ο κίνδυνος σύγκρουσης της με τον πύργο και τα πτερύγια να είναι κατασκευασμένα από κατάλληλα υλικά ώστε να μη κινδυνεύουν να λυγίσουν από τους δυνατούς ανέμους.

**β) Ανεμογεννήτριες με πνοή ανέμου προς τα κάτω (Downwind turbines):** Σε αυτή τη περίπτωση ο δρομέας τοποθετείται στο πίσω μέρος της κατασκευής και δε χρειάζεται οδήγηση από σύστημα προσανατολισμού καθώς η άτρακτος ακολουθεί παθητικά την κατεύθυνση του ανέμου. Παρόλα αυτά ο δρομέας δέχεται σκίαση από τον πύργο με αποτέλεσμα τις μεταβολές στη παραγωγή αιολικής ισχύς<sup>76</sup>.

---

<sup>75</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/Vertical\\_axis\\_wind\\_turbine](https://en.wikipedia.org/wiki/Vertical_axis_wind_turbine).

<sup>76</sup> Jamieson, Peter. Offshore Wind Turbines. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 2011.



Σχήμα 3.4: Οι δυο κατηγορίες με βάση τη πνοή του ανέμου<sup>77</sup>.

### 3.2.3 Επιλογή βάσει του αριθμού των πτερυγίων τους

Κριτήριο για την επιλογή ανεμογεννήτριας μπορεί να είναι και ο αριθμός των πτερυγίων τους. Οι δυο δημοφιλέστερες ανεμογεννήτριες στην αγορά είναι των δυο και των τριών πτερυγίων.

**α) Ανεμογεννήτρια δύο πτερυγίων:** Στη περίπτωση αυτής της ανεμογεννήτριας τα πτερύγια περιστρέφονται ταχύτερα από ότι σε αυτές των τριών πτερυγίων κάτι που προκαλεί την αύξηση του αεροδυναμικού θορύβου. Επιπλέον ο δρομέας τους δέχεται μεγάλα μηχανικά φορτία λόγω των μεταβολών στις ταχύτητες του ανέμου και δυσκολεύεται να ισορροπήσει. Στις μέρες και μετά την έναρξη της παραγωγής ανεμογεννητριών τριών πτερυγίων, οι ανεμογεννήτριες των δυο πτερυγίων δε χρησιμοποιούνται συχνά σε εφαρμογές. Μάλιστα οι περισσότερες εταιρίες που παρήγαγαν τέτοιου είδους ανεμογεννήτριες πλέον έχουν στραφεί και παράγουν μόνο ανεμογεννήτριες τριών πτερυγίων.

**β) Ανεμογεννήτρια τριών πτερυγίων:** Στα αιολικά πάρκα ο σχεδιασμός που συναντάται περισσότερο στις ανεμογεννήτριες είναι τριών πτερυγίων με πνοή ανέμου προς τα πάνω και με σύστημα προσανατολισμού. Η σχεδίαση αυτή είναι γνωστή και ως «δανική κατασκευή» και αποτελεί τη πιο δημοφιλή επιλογή στην αγορά.

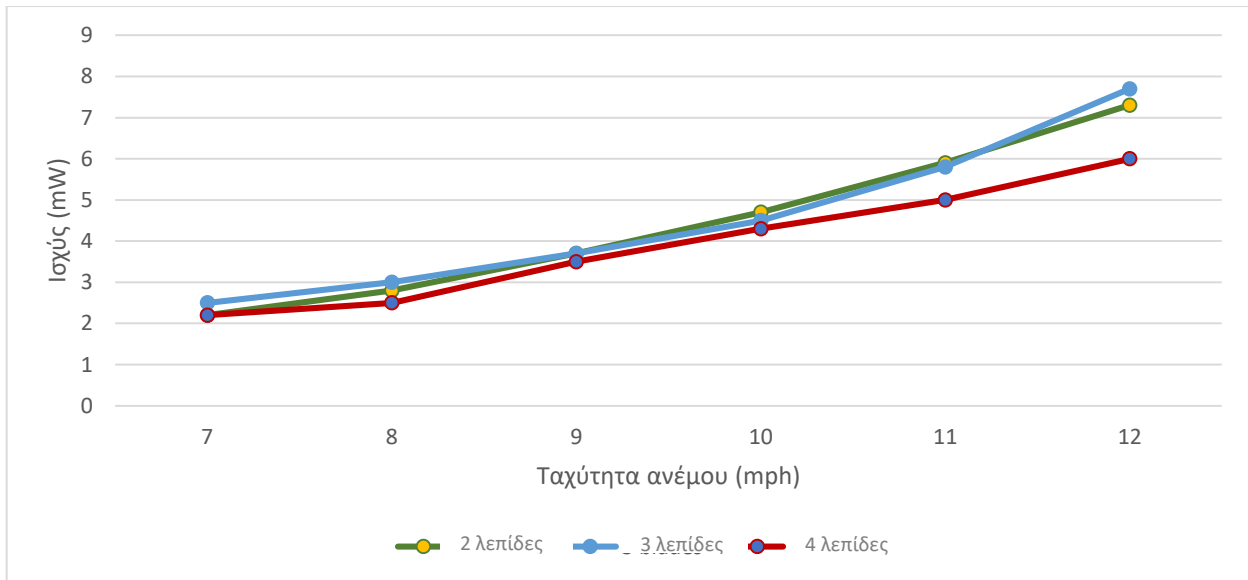
Τέλος, υπάρχουν και οι ανεμογεννήτριες με τέσσερα πτερύγια, ωστόσο δεν αποτελούν δημοφιλή επιλογή και δε θα αναλυθούν στη παρούσα εργασία.

Στο Σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η καμπύλη ισχύος και η παραγόμενη ισχύς με βάση τη ταχύτητα του ανέμου για ανεμογεννήτριες δυο, τριών και τεσσάρων πτερυγίων. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από το γράφημα, οι

<sup>77</sup><https://userscontent2.emaze.com/images/21335918-8e36-43f1-ba99-da513278b83b/902b819ee87bd44b2acdfda9f1671501.PNG>



ανεμογεννήτριες τριών πτερυγίων είναι οι πιο αποδοτικές για μεγάλες ταχύτητες ανέμου. Ωστόσο για εφαρμογές όπου η ταχύτητα του ανέμου δε ξεπερνά τα 10m/h, οι ανεμογεννήτριες δυο πτερυγίων μπορούν να έχουν επίσης αρκετά καλή επίδοση<sup>78</sup>.



Σχήμα 3.5: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννητριών με βάση τον αριθμό των πτερυγίων<sup>79</sup>.

### 3.2.4 Επιλογή βάσει της μεθόδου για τον έλεγχο της ισχύος

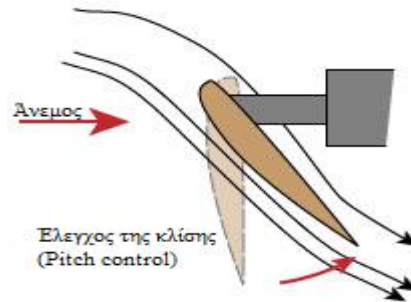
Ο σχεδιασμός των ανεμογεννητριών πραγματοποιείται με σκοπό τη παραγωγή της μέγιστης ισχύς τους για ταχύτητες της τάξης των 15 m/s. Αυτός θεωρείται και ο βέλτιστος σχεδιασμός καθώς οι ταχύτητες μεγαλύτερες αυτής της τιμής είναι εξαιρετικά σπάνιες. Η ισχύ που παράγεται από την ανεμογεννήτρια πρέπει να ελέγχεται ώστε να είναι δυνατή η αποφυγή καταστροφών διάφορων μερών της ανεμογεννήτριας κατά τη διάρκεια αντίξοων καιρικών συνθηκών και πολύ ισχυρών ανέμων, ακόμη και αν πρόκειται να σπαταληθεί ποσοστό από την ενδεχόμενη παραγόμενη ισχύς.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, αναπτύχθηκαν διάφοροι τρόποι ώστε να ελέγχεται η παραγόμενη ισχύς. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι:

**α) Με τη μέθοδο της μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων:** Η μέθοδος αυτή είναι γνωστή και ως pitch control και χρησιμοποιεί τον ελεγκτή του συστήματος ώστε σε περίπτωση που ξεπεραστεί η μέγιστη τιμή της ισχύς εξόδου να αλλάξει η κλίση των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας ώστε να μειωθεί η γωνία πρόσπτωσης του ανέμου σε αυτά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνονται σημαντικά η αντίσταση στον άνεμο και η ροπή στον δρομέα και κατά συνέπεια η παραγόμενη ισχύς. Με τη χρήση αυτής της μεθόδου παρατηρείται αύξηση της διάρκειας ζωής της ανεμογεννήτριας αλλά και καλύτερη εκμετάλλευση των ανίσχυρων ανέμων.

<sup>78</sup> Jamieson, Peter. Offshore Wind Turbines. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 2011.

<sup>79</sup><http://blogs.bu.edu/ek130wind/files/2012/10/power-curve-number-avg.png>



Σχήμα 3.6: Μεταβολή της κλίσης των πτερυγίων<sup>80</sup>.

**β) Με τη μέθοδο της ενεργής επιβράδυνσης:** Η μέθοδος αυτή, γνωστή και ως “Active Stall”, εφαρμόζεται κατά κύριο λόγο σε ανεμογεννήτριες με μεγάλη ισχύ, συνήθως μεγαλύτερη του 1MW, όπου υπάρχει η δυνατότητα της μεταβολής της κλίσης των πτερυγίων, που όμως δεν έχουν αρκετά επίπεδα μεταβολής της γωνίας πρόσπτωσης. Σε περίπτωση υπερφόρτωσης της γεννήτριας, ο ελεγκτής είναι υπεύθυνος για τη στροφή των πτερυγίων στην αντίθετη κατεύθυνση από αυτή που έχει χρησιμοποιηθεί στη μέθοδο pitch control και ως αποτέλεσμα αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης και μειώνεται η ροπή. Με τη χρήση αυτής της μεθόδου ο έλεγχος της ισχύς γίνεται με μεγάλη ακρίβεια και η ανεμογεννήτρια έχει τη δυνατότητα λειτουργίας σε επίπεδα μέγιστης απόδοσης για τις περισσότερες ταχύτητες ανέμου.

**γ) Με τη μέθοδο της παθητικής επιβράδυνσης:** Στις ανεμογεννήτριες που κατασκευάζονται ώστε να χρησιμοποιούν τη μέθοδο παθητικής επιβράδυνσης (“Passive Stall”), τα πτερύγια είναι κατασκευασμένα με βάση τις αρχές της αεροδυναμικής και η γεωμετρία του είναι τέτοια που κατά τη διάρκεια ισχυρών ανέμων οι αναταράξεις προκαλούνται στη πλευρά του πτερυγίου που δεν είναι πρόσωπο στον άνεμο. Επιπλέον με τις αναταράξεις αυτές αποτρέπεται η άνωση από το πτερύγιο προς το δρομέα, η ανεμογεννήτρια περιλαμβάνει λιγότερα κινητά μέρη, παρουσιάζει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και το ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου της είναι σχετικά φθινό<sup>81</sup>.

### 3.3 Ηλεκτρικό μέρος ανεμογεννήτριας

Σκοπός της ηλεκτρικής γεννήτριας είναι η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας, δηλαδή της ενέργειας που παράγεται από τα πτερύγια, σε ηλεκτρική. Ωστόσο, στη περίπτωση των ηλεκτρικών γεννητριών των ανεμογεννητριών η βασική διαφορά σε σχέση με τις άλλες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μεταβαλλόμενη ροπή στον δρομέα, λόγω του ανέμου. Στις εγκαταστάσεις αυτές χρησιμοποιούνται γεννήτριες σύγχρονες ή ασύγχρονες ανάλογα με τη περίπτωση και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν στην εκάστοτε εφαρμογή.

#### 3.3.1 Ανεμογεννήτριες ασύγχρονης γεννήτριας σταθερών στροφών

Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών χρησιμοποιούνται διότι προσφέρουν απλότητα στη κατασκευή τους, δε περιέχουν μετατροπέα ο οποίος οδηγεί σε μικρότερο εύρος αρμονικών στην έξοδο, είναι ελαφρότερες και οικονομικότερες. Παρόλα αυτά ο τύπος αυτός των γεννητριών είναι η παροχή στροφών από το δίκτυο, λόγω της απευθείας σύνδεσής τους με αυτό, με αποτέλεσμα να μην εκμεταλλεύονται στο έπακρο την ταχύτητα του ανέμου κάθε στιγμή. Με τις μεταβολές του ανέμου προκαλούνται μεταβολές στη μηχανική ροπή του άξονα, κάτι που οδηγεί στην εμφάνιση καταπονήσεων και βλαβών στην ανεμογεννήτρια. Για τους λόγους αυτούς η

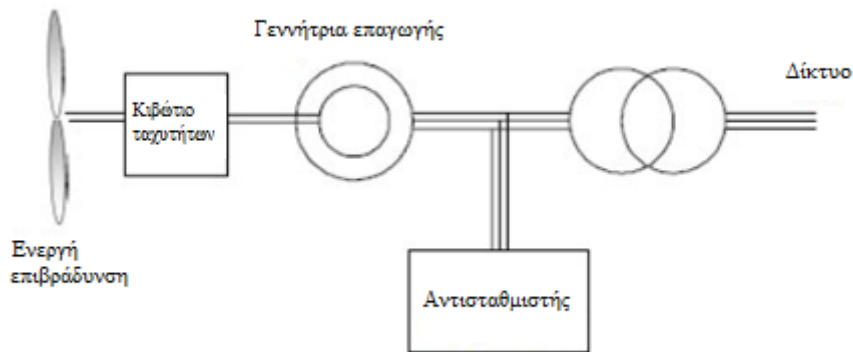
<sup>80</sup>[http://www.greenrhinoenergy.com/renewable/wind/images/wec\\_Pitch\\_Control.jpg](http://www.greenrhinoenergy.com/renewable/wind/images/wec_Pitch_Control.jpg)

<sup>81</sup> Houlby, G. T., και B. W. Byrne. Foundations for offshore wind turbines. The Royal Society, 2003.





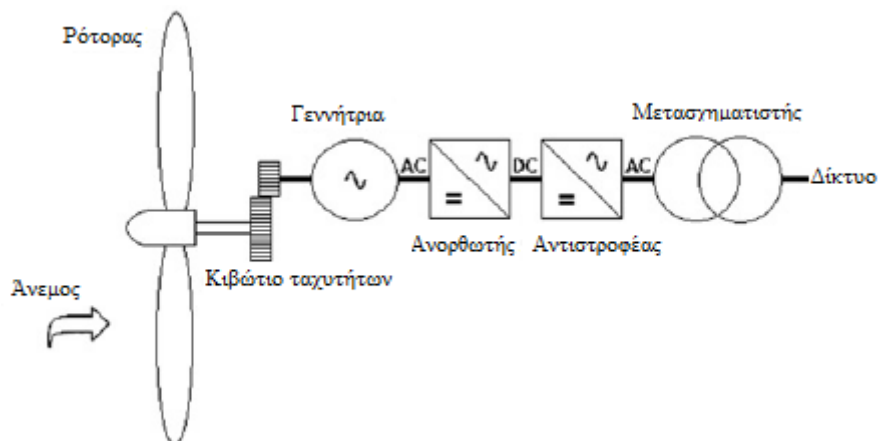
διασύνδεση αυτή αποφεύγεται στις μέρες μας. Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται το κύκλωμα μιας ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών<sup>82</sup>.



Σχήμα 3.7: Κύκλωμα ανεμογεννήτριας σταθερών στροφών<sup>83</sup>.

### 3.3.2 Ανεμογεννήτριες ασύγχρονης γεννήτριας μεταβλητών στροφών

Οι πιο συνηθισμένες ανεμογεννήτριες σήμερα είναι αυτές των μεταβλητών στροφών, οι οποίες ακολουθούν τις ταχύτητες του ανέμου παρέχοντας τη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση. Επιπλέον δέχονται πολύ λιγότερες μηχανικές καταπονήσεις σε σχέση με αυτές των σταθερών στροφών, έχουν τη δυνατότητα αφαίρεσης του κιβωτίου ταχυτήτων και τη μείωση του ακουστικού θορύβου. Με τη βοήθεια του μετατροπέα υπάρχει η δυνατότητα της ρύθμισης της άεργου ισχύος με βάση τις απαιτήσεις του συστήματος, κάτι που μπορούσε να πραγματοποιηθεί μόνο στους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας. Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζεται το κύκλωμα ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών.



<sup>82</sup> Muller, S., M. Deicke, και W. Rik. Doubly fed induction generator systems for wind turbines. IEEE Industry Applications Magazine, 2002.

<sup>83</sup> Τσιώλης, Σπύρος. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.). Πειραιάς: Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα, 2006.



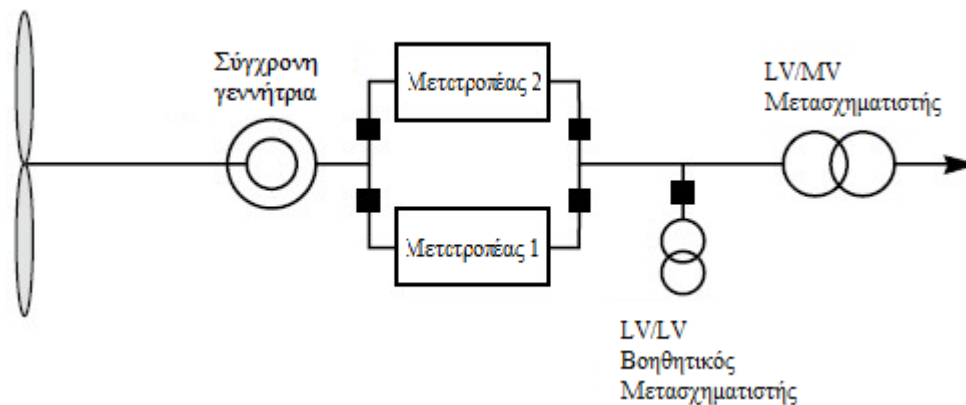


Σχήμα 3.8: Κύκλωμα ανεμογεννήτριας μεταβλητών στροφών<sup>84</sup>.

### 3.3.3 Ανεμογεννήτριες σύγχρονης γεννήτριας μεταβλητών στροφών

Με τη τοπολογία αυτή ακόμη και όταν μεταβάλλεται η ταχύτητα περιστροφής με την αλλαγή του ανέμου ή λόγω σφάλματος δικτύου, η μεταβολή αυτή εξομαλύνεται από τον δρομέα. Επιπλέον στο κύκλωμα δεν υπάρχει κιβώτιο ταχυτήτων και ως αποτέλεσμα μειώνεται το κόστος και ο θόρυβος. Ωστόσο το βάρος της γεννήτριας είναι μεγάλο και η ισχύς που παράγει η γεννήτρια μεταφέρεται μέσω του μετατροπέα κάτι που έχει ως αποτέλεσμα τη μη ομαλή λειτουργία του συστήματος υπό μη φυσιολογικές καταστάσεις και συγκεκριμένα στην ικανότητα αδιάλειπτης παροχής ισχύος.

Στο Σχήμα 3.9 ακολουθεί το κύκλωμα ανεμογεννήτριας με σύγχρονη γεννήτρια μεταβλητών στροφών<sup>85</sup>.



Σχήμα 3.9: Κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας μεταβλητών στροφών<sup>86</sup>.

## 3.4 Θεμελίωση των πύργων

Η θεμελίωση των πύργων στις ανεμογεννήτριες των υπεράκτιων πάρκων αποτελεί μια διαφορετική υπόθεση από αυτή των ανεμογεννητριών της στεριάς και εξελίσσεται συνεχώς με τη πάροδο των χρόνων, καθώς υπάρχει η πρόθεση για την αύξηση της απόστασης από την ακτή και σε μεγαλύτερα βάθη στη θάλασσα. Συνεπώς απαιτείται η εύρεση νέων τρόπων για τη θεμελίωση και τη στήριξη των πύργων, ώστε να είναι δυνατή αυτή η αύξηση στην απόσταση, η οποία με τη σειρά της θα αποφέρει τη παραγωγή μεγαλύτερων ποσοτήτων ενέργειας και ως αποτέλεσμα μεγαλύτερα οικονομικά κέρδη από την εγκατάσταση και μικρότερη περίοδο απόσβεσης. Όπως γίνεται αντιληπτό λοιπόν η επιλογή της κατάλληλης θεμελίωσης αποτελεί μια πολύ σημαντική διαδικασία η οποία εξαρτάται από διάφορους παράγοντες και το κόστος της ανέρχεται περίπου στο 20 % του συνολικού κόστους της εγκατάστασης.

Κατά το έτος 2015 καταγράφηκαν 397 νέες εγκαταστάσεις ανεμογεννητριών στην Ευρώπη από τις οποίες οι 385 ήταν με θεμελίωση τύπου “Monopile” και οι υπόλοιπες 12 με τύπου jacket. Συνολικά υπολογίζεται πως πάνω από 3000 ανεμογεννήτριες έχουν θεμελιωθεί στα ευρωπαϊκά ύδατα από τότε που ξεκίνησε οι

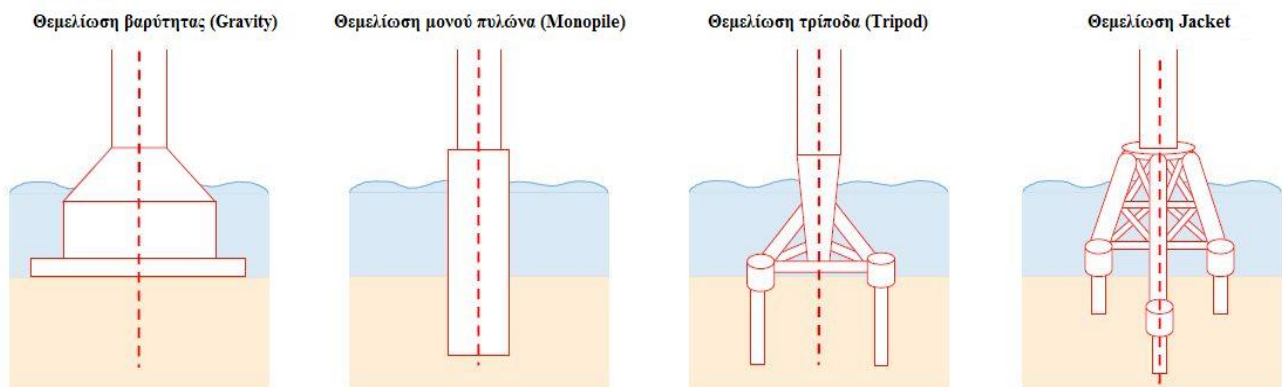
<sup>84</sup>[https://www.researchgate.net/profile/Luis\\_Miguel3/publication/229348659/figure/fig1/AS:300670684024834@1448696885426/Fig-1-Variable-speed-wind-turbine-8.png](https://www.researchgate.net/profile/Luis_Miguel3/publication/229348659/figure/fig1/AS:300670684024834@1448696885426/Fig-1-Variable-speed-wind-turbine-8.png)

<sup>85</sup> Muller, S., M. Deicke, και W. Rik. Doubly fed induction generator systems for wind turbines. IEEE Industry Applications Magazine, 2002.

<sup>86</sup><https://windturbineexpertise.files.wordpress.com/2012/02/wind-turbine-5.jpg>



εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Από αυτές ένα ποσοστό περίπου στο 80 % χρησιμοποιεί ποσοστό τύπου “Monopile”, το 9 % τύπου βαρύτητας (“Gravity”), το 5,4 % τύπου “Jacket”, το 3,6 % τύπου “Tripod” και το 2 % τύπου “Tripile”. Πέρα από τα παραπάνω νούμερα υπάρχουν άλλες τέσσερις ανεμογεννήτριες από τις οποίες οι δυο χρησιμοποιούν πειραματική θεμελίωση και οι άλλες δυο μια νέα θεμελίωση, όπου η ανεμογεννήτριες επιπλέον και ονομάζεται τύπου “Floating”. Προβλέπεται πως ανεμογεννήτριες τέτοιου τύπου μπορούν να προσφέρουν αξιόπιστες λύσεις στο θέμα με το όριο του βάθους του πυθμένα στην εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου. Αυτή τη στιγμή όμως ως πιο αξιόπιστη λύση θεωρείται η θεμελίωση τύπου “Monopile”, η οποία θεωρείται η πλέον σταθερή και οικονομικότερη για περιπτώσεις με βάθος πυθμένα έως 30 μέτρα και υπόστρωμα έως 70 μέτρα.



Σχήμα 3.10: Μορφές θεμελίωσης<sup>87</sup>.

Στην παραπάνω εικόνα (Σχήμα 3.10) αναπαρίστανται οι διάφοροι τύποι θεμελίωσης. Παρακάτω αναλύονται οι διάφοροι τύποι θεμελίωσης, με τη θεμελίωση μονού πυλώνα (τύπου “Monopile”) να αποτελεί την πιο αξιόπιστη και δημοφιλή μέθοδο θεμελίωσης<sup>88</sup>.

#### 3.4.1 Θεμελίωση μονού πυλώνα (monopile)

Η θεμελίωση τύπου monopile πραγματοποιείται με τη χρησιμοποίηση ενός μεταλλικού πασσάλου με κυκλική διατομή, εμπηγμένο, με τη χρήση ενός ειδικού σφυριού, στο πυθμένα της θάλασσας. Η διάμετρος του πασσάλου ανέρχεται στα 4,5 έως 9 μέτρα και το πάχος του επιλέγεται με βάση την νομοθεσία και των παγκόσμιων κανονισμών του American Petroleum Institute (API2000). Για τον υπολογισμό του βάθους της έμπηξης του πασσάλου γίνεται ειδική ξεχωριστή μελέτη. Κατά τη σχεδίαση αυτής της θεμελίωσης τα κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη, είναι η οριζόντια φόρτιση που προκαλεί ο άνεμος, τα κύματα και τα θαλάσσια ρεύματα, αλλά και η πιθανότητα σεισμικών δονήσεων. Τα φορτία που ασκούνται κατακόρυφα θεωρούνται σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις αμελητέα. Σκοπός της σχεδίασης είναι η θεμελίωση να παρουσιάζει υψηλούς βαθμούς δυσκαμψίας και υψηλή ιδιοσυχνότητα με αποτέλεσμα να μην συμπίπτουν η ιδιοπερίοδος της θεμελίωσης με τις υψηλές ιδιοπερίοδους των οριζόντιων φορτίων που ασκούνται στο σύστημα, δηλαδή να αποφευχθεί ένας ενδεχόμενος συντονισμός αυτών. Επίσης, πριν τη διαδικασία της θεμελίωσης απαραίτητος κρίνεται ο έλεγχος του υποστρώματος στον πυθμένα καθώς υπάρχουν κίνδυνοι ρευστοποίησης του σε περίπτωση που το υλικό είναι λεπτό και αμμώδες. Σε περιοχές όπου οι σεισμοί είναι συχνότεροι πραγματοποιούνται ειδικές μελέτες αντοχής. Το συνηθισμένο μήκος για ένα πάσσαλο είναι τα 3/5 του ύψους της ανεμογεννήτριας και το βασικότερο πρόβλημα σε αυτού του τύπου τη θεμελίωση είναι η ευκαμψία της,

<sup>87</sup><http://www.windfarmbop.com/wp-content/uploads/2012/12/Offshore-wind-turbines-foundation-types.jpg>

<sup>88</sup> Uraz, Emre. Offshore Wind Turbine Transportation & Installation Analyses. Visby, Sweden: Gotland University, 2011.



πρόβλημα το οποίο αυξάνεται με την αύξηση του βάθους του πυθμένα και της ταχύτητας του ανέμου. Ωστόσο, με την αύξηση της μάζας στη δύναμη του κύβου μπορεί να παραμείνει άκαμπτο το σύστημα. Αυτό μπορεί να συμβεί με την αύξηση του μήκους, της διαμέτρου και του πάχους της θεμελίωσης, κάτι που θα οδηγήσει όμως και στην αύξηση του συνολικού κόστους. Για το λόγο αυτό η θεμελίωση τύπου monopile χρησιμοποιείται σε ρηγά νερά, μέχρι 30 μέτρα, ώστε να μειωθεί το συνολικό κόστος της εγκατάστασης.

Όταν η διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας περάσει και αποφασιστεί πως πρέπει να αποσυρθεί, αποκόπτεται ένα κομμάτι του πύργου περίπου 2 με 3 μέτρα πάνω από την επιφάνεια του πυθμένα. Η υπόλοιπη κατασκευή παραμένει εκεί ως έχει, καθώς επιπλέον διαδικασίες εξόρυξης της θεμελίωσης μπορούν να προκαλέσουν αναστατώσεις στις γειτονικές περιοχές<sup>89</sup>.

### 3.4.2 Θεμελίωση βαρύτητας

Η εγκατάσταση μιας θεμελίωσης βαρύτητας απαιτεί τα ακόλουθα βήματα τοποθέτησης:

- Προετοιμασία του βυθού. Η ισοπέδωση του βυθού κάτω από τη συνολική έκταση της θεμελίωσης βαρύτητας είναι απαραίτητη.
- Ανύψωση του θεμελίου από τη φορηγίδα μεταφοράς (μπορεί να είναι το ίδιο πλοίο που θα χρησιμοποιηθεί στην εγκατάσταση).
- Τοποθέτηση της θεμελίωσης στην τελική του θέση.
- Πλήρωση/επίχωση της βάσης κάνοντας χρήση κοκκωδών υλικών, όπως είναι άμμος ή χαλίκι, ή πιο πιθανά σκυρόδεμα. Για την επίχωση αυτή απαιτείται ειδικό πλοιάριο.

Η εγκατάσταση μιας τεράστιας προ-κατασκευασμένης θεμελίωσης βαρύτητας έχει χρησιμοποιηθεί στην εγκατάσταση αιολικών μηχανών στη Βαλτική Θάλασσα. Οι αιολικές αυτές μηχανές τοποθετήθηκαν σε πολύ ρηγά νερά και οι εν λόγω μηχανές είναι σχετικά μικρές σε σχέση με τις αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα. Για μεγαλύτερα μεγέθη μηχανών και μεγαλύτερα βάρη εγκατάστασης, μια θεμελίωση βαρύτητας δεν αποτελεί βιώσιμη λύση, καθώς η μεταφορά και εγκατάσταση μιας προ-κατασκευασμένης βάσης από σκυρόδεμα σημαίνει το χειρισμό μιας πολύ ογκώδους και βαριάς κατασκευής.

### 3.4.3 Θεμελίωση τύπου “Jacket”

Η εγκατάσταση μιας θεμελίωσης τύπου “jacket” απαιτεί τα παρακάτω βήματα τοποθέτησης:

- Προετοιμασία του βυθού. Η ισοπέδωση του βυθού κάτω από τους τρεις πασσάλους για την ευθυγραμμισμένη τοποθέτηση της ανεμογεννήτριας μπορεί ανά περίπτωση να είναι απαραίτητη. Αντί για ισοπέδωση του βυθού, μπορεί να γίνει ευθυγράμμιση του “jacket” αργότερα.
- Ανάρτηση της θεμελίωσης από τη φορηγίδα μεταφοράς (μπορεί να είναι το ίδιο πλοιάριο που χρησιμοποιήθηκε για την εγκατάσταση).
- Τοποθέτηση της θεμελίωσης στη θέση της.
- Ανύψωση ενός πασσάλου θεμελίωσης, σταθεροποίηση στην τελική του θέση και έμπηξή του σε ένα συγκεκριμένο βάθος (λιγότερο από το μέγιστο) μέσα στο έδαφος.
- Επανάληψη του τελευταίου βήματος για τους άλλους δύο πασσάλους.
- Έμπηξη και των τριών πασσάλων διαδοχικά στο τελικό τους βάθος.

---

<sup>89</sup> Uraz, Emre. Offshore Wind Turbine Transportation & Installation Analyses. Visby, Sweden: Gotland University, 2011.



- Ευθυγράμμιση της θεμελίωσης για την επίτευξη κατακορυφότητας, βάσει των επιτρεπόμενων ανοχών. Εάν αυτό το βήμα είναι παρόν στη διαδικασία τοποθέτησης, τότε η ισοπέδωση του βυθού δεν είναι απαραίτητη.
- Σύνδεση της θεμελίωσης με τους πασσάλους μέσω υπερπίεσης ή τεχνικών συγκολλήσεως.

Αφού η θεμελίωση της υπεράκτιας αιολικής μηχανής εγκατασταθεί, η φορηγίδα εγκατάστασης μπορεί να συνεχίσει την εγκατάσταση άλλων θεμελιώσεων ή διαφορετικών μερών για την ίδια μονάδα. Όταν η εγκατάσταση της θεμελίωσης έχει ολοκληρωθεί, ένα κυλινδρικό τμήμα του πύργου (στην περίπτωση τρίποδου σχηματισμού) ή μια κατασκευή υπό τη μορφή πλέγματος/δικτυώματος, περίπου 20 μέτρα πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, θα περιμένει για την τοποθέτηση των υπολοίπων μερών. Στην κεφαλή της θεμελίωσης, στο ανώτερο δηλαδή μέρος της, είναι ορατή μια σύνδεση για την υποδοχή του πύργου. Κάτω από τη σύνδεση αυτή τοποθετείται μια πλατφόρμα συντήρησης. Στην περίπτωση που η κατακορυφότητα της θεμελίωσης δεν είναι ικανοποιητική μετά το πέρας της εγκατάστασης της θεμελίωσης, η ευθυγράμμιση της ανεμογεννήτριας με το κατακόρυφο επίπεδο μπορεί να επιτευχθεί κάνοντας χρήση υλικών πληρώσεων μεταξύ των λεπίδων σύνδεσης του πύργου με τη θεμελίωση.

### 3.5 Μεταφορά των αιολικών μηχανών

#### 3.5.1 Τρόποι μεταφοράς στην υπεράκτια θέση

Η μεταφορά και εγκατάσταση των ανεμογεννητριών σε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο πραγματοποιείται με τη χρήση πλοίων, τα οποία μεταφέρουν τα επιμέρους τμήματα των υπό κατασκευή εγκαταστάσεων και έπειτα με τη χρήση γερανών τα ανυψώνουν ώστε να τοποθετηθούν στην τελική τους θέση. Θα πρέπει να σημειωθεί πώς μπορεί να απαιτηθούν διαφορετικά πλοία για τη μεταφορά και την τοποθέτηση των αιολικών μηχανών.

Η μεταφορά των διαφόρων μερών μιας αιολικής μηχανής στην τελική υπεράκτια θέση εγκατάστασης μπορεί να γίνει είτε πλωτά, με τη χρήση ρυμουλκού το οποίο θα μεταφέρει την κατασκευή ενώ αυτή θα επιπλέει μέσα στο νερό, είτε με τη μεταφορά της πάνω στο κατάστρωμα μιας φορηγίδας.

Η πλωτή μεταφορά των μερών μιας αιολικής μηχανής μπορεί να υλοποιηθεί μόνο όταν τα μέρη αυτά ικανοποιούν τις παρακάτω απαιτήσεις:

- Δεν είναι ευάλωτα σε βλάβη λόγω εισόδου νερού. Η απαίτηση αυτή εφαρμόζεται μόνο για μέρη της θεμελίωσης ή του πύργου, χωρίς κιβώτιο,
- Έχουν επαρκή άνωση λόγω της γεωμετρίας τους. Η παροχή επιπλέον δυνάμεων ανάρτησης δε θεωρείται οικονομική λύση. Έτσι, η απαίτηση αυτή αφορά λοιπόν μέλη που έχουν υδατοστεγή τμήματα.

Μελετώντας τους περιορισμούς αυτούς, φτάνουμε στο συμπέρασμα πώς μόνο οι κατασκευές υποστήριξης που προορίζονται για την υπεράκτια θέση μπορούν να θεωρηθούν κατάλληλες για πλωτή μεταφορά. Πλωτή μεταφορά του συνδυασμού της θεμελίωσης με άλλα μέρη ή ακόμα πλωτή μεταφορά μιας πλήρως συναρμολογημένης ανεμογεννήτριας θα μπορούσαν να επιτευχθούν, αποτελούν όμως διαδικασίες μεγάλου κόστους και ρίσκου.

Ένα ακόμα θέμα που ανακύπτει από τη ρυμούλκηση μερών της κατασκευής, αποτελεί το γεγονός πώς αφού φτάσουμε στην τελική θέση εγκατάστασης, η κατασκευή θα πρέπει να διαθέτει τις κατάλληλες εγκαταστάσεις για την τοποθέτησή της στη βάση της. Αυτός ο προβληματισμός αναφέρεται κυρίως σε μέρη του πύργου.

Για ρυμουλκούμενη μεταφορά της κατασκευής στην τελική υπεράκτια θέση εγκατάστασης απαιτούνται δύο ρυμουλκά πλοία. Στην περίπτωση μεταφοράς επί φορηγίδας, ο αριθμός των απαιτούμενων πλοίων εξαρτάται από το συνδυασμό μεταφοράς και εγκατάστασης των διαφόρων μερών από τα ίδια πλοία.



### 3.5.2 Μεταφορά των διαφόρων μερών σε βήματα

Στην περίπτωση μεταφοράς με τη χρήση ρυμουλκών, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

- Μεταφορά της κατασκευής από τις εγκαταστάσεις κατασκευής στην αποβάθρα,
- Ενοικίαση αποβάθρας.
- Ανάρτηση της κατασκευής από την αποβάθρα μέσα στο νερό.
- Σύνδεση της κατασκευής σε ένα ρυμουλκό.
- Μεταφορά στην υπεράκτια θέση.

Στην περίπτωση μεταφοράς επάνω σε φορτηγίδα, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία:

- Μεταφορά της κατασκευής από τις εγκαταστάσεις κατασκευής στην αποβάθρα,
- Ενοικίαση αποβάθρας.
- Φόρτωση της κατασκευής από την αποβάθρα πάνω στη φορτηγίδα.
- Μεταφορά στην υπεράκτια θέση.

### 3.5.3 Τυπικά μέσα μεταφοράς και εγκατάστασης

Η μεταφορά και εγκατάσταση των διαφόρων μερών μιας ανεμογεννήτριας στην τελική τους θέση εντός ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου μπορεί να γίνει με τη χρήση διαφόρων πλοίων. Καθένα από αυτά ενδείκνυται υπό διαφορετικές συνθήκες/απαιτήσεις, ανάλογα με το μέγεθος και τη διάταξη εγκατάστασης κάθε αιολικής μηχανής, αλλά και την τεχνική διαθεσιμότητα κάθε τύπου πλοίου από τα συνεργεία εγκατάστασης. Ακολουθεί μια σύντομη παρουσίαση των συνηθέστερων πλοίων που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά και εγκατάσταση των μερών που απαρτίζουν ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο.



**Σχήμα 3.11: Ρυμουλκό (Towing Tug)<sup>90</sup>.**

---

<sup>90</sup> [http://www.wijngaarden.com/en/projects\\_45/united-kingdom/assistance-to-offshore-windfarm.html](http://www.wijngaarden.com/en/projects_45/united-kingdom/assistance-to-offshore-windfarm.html)





Σχήμα 3.12: Αυτό-ανυψούμενο πλοίο (Jack-up vessel)<sup>91</sup>.



Γερανόπλοιο (Derrick barge ή Crane vessel)<sup>92</sup>.



Γερανόπλοιο με σταθερό γερανό (Sheer leg vessel)<sup>93</sup>.

---

<sup>91</sup> <https://www.thrustmaster.net/wp-content/uploads/2015/02/pic1.jpg>

<sup>92</sup> <https://sal-heavylift.com/solutions/shipping/energy/renewables/>

<sup>93</sup> <http://cranes.tradekey.com/product-info/Sheerleg-Floating-Crane-Barge-Sheerleg-Crane-Vessel-Salvage-Vessel-2170230.html>





Πλοίο πλευρικής μεταφοράς γεωυλικών (Side Stone Vessel)<sup>94</sup>.

### 3.6 Εγκατάσταση των αιολικών μηχανών

#### 3.6.1 Εγκατάσταση του πύργου

Η εγκατάσταση του πύργου μιας αιολικής μηχανής απαιτεί τα παρακάτω βήματα:

- Ανύψωση του πύργου από τη φορτηγίδα μεταφοράς (μπορεί να είναι το ίδιο πλοίο που θα χρησιμοποιηθεί στην εγκατάσταση).
- Τοποθέτηση του πύργου στην κεφαλή της θεμελίωσης κάνοντας χρήση πιλοτικών πασσάλων για την ορθή τοποθέτηση των λεπίδων σύνδεσης.
- Σύνδεση των λεπίδων πύργου-θεμελίωσης χρησιμοποιώντας προεντεταμένα μπουλόνια.

Στην περίπτωση ευνοϊκών καιρικών συνθηκών, η διαδικασία αυτή απαιτεί περίπου δύο μέρες, με τη συνολική της διάρκεια να εξαρτάται φυσικά και από το μέγεθος του πύργου και τον τύπο του πλοιαρίου εγκατάστασης που θα χρησιμοποιηθεί. Τα ηλεκτρικά καλώδια κάθε αιολικής μηχανής σε αυτή τη φάση αναμένεται να βρίσκονται στο εσωτερικό του πύργου, ώστε να είναι διαθέσιμα στο εγγύς μέλλον για τη σύνδεσή τους. Η μόνη διαφορά στον πύργο μιας ανεμογεννήτριας για διατάξεις θεμελίωσης μονού πυλώνα ή τύπου “jacket” έγκειται στην τοποθεσία της πλατφόρμας συντήρησης του πύργου.

#### 3.6.2 Εγκατάσταση του ρότορα

Ο ρότορας (λεπίδες & άξονας) μπορούν να τοποθετηθούν κάνοντας χρήση μιας από τις τρεις παρακάτω επιλογές:

- Ο ρότορας φτάνει και τοποθετείται στη θέση εγκατάστασης ως ένα ενιαίο στοιχείο.
- Οι λεπίδες και ο άξονας του ρότορα φτάνουν στη θέση εγκατάστασης χωριστά και συνδέονται πριν την εγκατάσταση του άξονα πάνω στον πύργο. Ο ρότορας τότε εγκαθίστανται ως ένα ενιαίο στοιχείο.
- Οι λεπίδες και ο άξονας του ρότορα φτάνουν στην υπεράκτια θέση χωριστά και τοποθετούνται χωριστά.

---

<sup>94</sup> <https://www.vanoord.com/activities/side-stone-dumping-vessel>



Η εγκατάσταση του ρότορα ως ένα ενιαίο στοιχείο απαιτεί μια πλατφόρμα εργασίας με πρόσβαση στο ύψος του άξονα κατά την εγκατάσταση. Η πλατφόρμα αυτή θα μπορούσε να είναι μέρος του γάντζου του γερανού. Ο ρότορας τότε συνδέεται με το κιβώτιο κάνοντας χρήση (ειδικών) μπουλονιών, τα οποία θα πρέπει να είναι προεντεταμένης τεχνολογίας. Πρόσβαση στο σημείο σύνδεσης γίνεται από το εσωτερικό του κιβωτίου.

Για την υπεράκτια τοποθέτηση του ρότορα ως ένα ενιαίο στοιχείο θα πρέπει να γίνει κατανοητό πώς η σύνδεση θα πρέπει να γίνει με εξαιρετική ακρίβεια σε ένα πολύ υψηλό υψόμετρο. Ακόμα και υπό τις καλύτερες καιρικές συνθήκες με χαμηλό άνεμο, ο αναρτώμενος ρότορας θα τείνει να κινηθεί με μια συγκεκριμένη συχνότητα. Για την αποφυγή τέτοιων ανεπιθύμητων κινήσεων, ο ρότορας θα πρέπει να συγκρατείται από πρόσθετες στηρίξεις. Θα πρέπει να σημειωθεί πώς η υλοποίηση μιας τέτοιας ακριβούς διαδικασίας σε μια υπεράκτια θέση είναι δύσκολη και χρονοβόρα.

Με στόχο τη βέλτιστη χρήση του χώρου μεταφοράς επί του σχετικού πλοιαρίου, οι λεπίδες θα μπορούσαν να μεταφερθούν χωριστά από τον άξονα στην υπεράκτια θέση, να συνδεθούν μεταξύ τους όταν βρίσκονται στην τελική θέση και τέλος ο πλήρης ρότορας να συνδεθεί με το κιβώτιο. Στην περίπτωση όμως αυτή, απαιτείται επιπλέον χρόνος και ακρίβεια για την υπεράκτια εγκατάσταση του ρότορα με το κιβώτιο, καθώς η ακριβής στήριξη και διαχείριση των τεράστιων λεπίδων δεν είναι εύκολη υπόθεση, ειδικά σε μια υπεράκτια θέση.

Όσον αφορά την τελευταία επιλογή, η σύνδεση των λεπίδων με το κιβώτιο σε μεγάλο ύψος αποτελεί μια διαδικασία πολύ πιο χρονοβόρα από τις δύο παραπάνω, στις οποίες ο ρότορας συνδέεται ως ένα ενιαίο μέρος πάνω στο κιβώτιο.

### 3.6.3 Εγκατάσταση των καλωδίων

Ο αριθμός των υποβρυχίων καλωδίων που είναι παρόντα σε ένα αιολικό πάρκο εξαρτάται από τον τύπο του ρεύματος που τελικώς φτάνει στο χερσαίο υποσταθμό. Ο αριθμός των ηλεκτρικών καλωδίων που είναι παρόντα ανάμεσα στον υπεράκτιο υποσταθμό και στο χερσαίο υποσταθμό ανύψωσης τάσης είναι για παράδειγμα με τη θεώρηση εναλλασσόμενου (AC) ρεύματος (τριφασικό HVAC) πάνω από ένα, ενώ για συνεχές (DC) μόνο ένα καλώδιο απαιτείται ανάμεσα στον υπεράκτιο υποσταθμό και στο χερσαίο.

Ακόμα, γενικώς τα καλώδια δεν τοποθετούνται μαζί για την αποφυγή ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών και για την ελαχιστοποίηση του ρίσκου φθοράς τους από άγκυρες ή πλοία. Αυτό σημαίνει πώς η εγκατάσταση τριών ηλεκτρικών καλωδίων για την ίδια σύνδεση απαιτεί τον τριπλάσιο χρόνο και κόστος από την εγκατάσταση ενός καλωδίου, υπάρχει δηλαδή πλήρης αντιστοιχία.

Όσον αφορά την αρχιτεκτονική της συνδεσιμολογίας εντός του πάρκου, γενικώς υιοθετείται ένα μοντέλο σύμφωνα με το οποίο πέντε κατά μέγιστο αριθμό ανεμογεννήτριες συνδέονται σε μια γραμμή και δέκα κατά μέγιστο αριθμό γραμμές καλωδίων συνδέονται σε ένα υπεράκτιο υποσταθμό.

Θα πρέπει να σημειωθεί πώς η εγκατάσταση όλων των ποντισμένων καλωδίων, των καλωδίων δηλαδή που θα βρίσκονται κάτω από το νερό, αναμένεται να πραγματοποιηθεί μετά την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών, οι οποίες εμπεριέχουν καλώδια σύνδεσης. Κατ' αυτό τον τρόπο, η ανεμογεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο καλωδίων αφού η κατασκευή έχει τοποθετηθεί στην τελική της θέση. Μια εναλλακτική είναι να σχεδιαστεί η καλωδίωση ως αναπόσπαστο κομμάτι της θεμελίωσης. Και τα δύο πάντως αυτά ενδεχόμενα δεν επηρεάζουν τις εναλλακτικές εγκατάστασης των αιολικών μηχανών που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενη ενότητα.

Η σύνδεση των άκρων ενός καλωδίου σε ένα μετασχηματιστή υλοποιείται χρησιμοποιώντας ένα ανυψωτήρα, ο οποίος τοποθετείται στην πλατφόρμα υποστήριξης του μετασχηματιστή. Η σύνδεση υλοποιείται βάσει των παρακάτω βημάτων:

- Τα καλώδια αναρτώνται από τη βυθό κάνοντας χρήση ενός συστήματος ανύψωσης ενός βοηθητικού πλοίου (ρυμουλκό) και με τη βοήθεια δυτών.



- Τα καλώδια μεταφέρονται από τον ανυψωτήρα του βοηθητικού πλοίου στον ανυψωτήρα του υποσταθμού τάσης.
- Τα καλώδια συνδέονται με τον υποσταθμό τάσης.

Η σύνδεση των καλωδίων με τις αιολικές μηχανές υλοποιείται με παρόμοιο τρόπο. Μια διαφορά είναι πώς οι ανεμογεννήτριες ίσως να μην έχουν κάποιο σύστημα ανύψωσης σε χαμηλό ύψος από τη στάθμη της θάλασσας και ότι το βοηθητικό πλοίο πρέπει να ταξιδεύει από τη μια ανεμογεννήτρια, στην άλλη.

Αξίζει να γίνει ένα σχόλιο σχετικά με την προ-εγκατάσταση των καλωδίων πριν από τα λοιπά μέρη του αιολικού πάρκου. Τα καλώδια αυτά αφορούν είτε τα ηλεκτρικά καλώδια μεταξύ ανεμογεννητριών, είτε μεταξύ της ανεμογεννήτριας και του υπεράκτιου υποσταθμού, ή ακόμα και τα καλώδια που συνδέουν τον υπεράκτιο υποσταθμό με την ακτή. Εάν τα καλώδια αυτά προϋπάρχουν πριν από την τοποθέτηση των θεμελίων, θα είναι εύαλωτα σε βλάβες κατά την τοποθέτησή τους. Για παράδειγμα, τα καλώδια μπορεί να φθαρούν από:

- την ίδια τη θεμελίωση κατά την εγκατάστασή της,
- την αγκυροβόληση των πλοιαρίων μεταφοράς ή/και εγκατάστασης,
- την κίνηση του νερού (και συνεπώς του εδάφους) κατά την κίνηση των πλοιαρίων εγκατάστασης, η οποία μπορεί να αποκαλύψει/εκθέσει τα προ-εγκατεστημένα καλώδια. Αργότερα λοιπόν μπορεί να φθαρούν λόγω της έκθεσης αυτής.

Από την άλλη, εάν τα ηλεκτρικά καλώδια δεν προ-εγκατασταθούν, εμφανίζεται η πιθανότητα φθοράς της εγκατεστημένης πλέον ανεμογεννήτριας από την εγκατάσταση των καλωδίων. Η εγκατάσταση των καλωδίων απαιτεί προετοιμασία του εδάφους, τοποθέτηση των καλωδίων και προστασία του βυθού έναντι υποσκαφής. Αυτοί οι κίνδυνοι αναγκάζουν τις φορηγίδες να λειτουργούν πολύ προσεκτικά εντός του αιολικού πάρκου, ώστε να μη δημιουργήσουν φθορές.

#### 3.6.4 Υπεράκτια εγκατάσταση ανεμογεννήτριας σε βήματα

Η εγκατάσταση μιας υπεράκτιας ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- Πιθανή τροποποίηση/προσαρμογή του πλοίου για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση.
- Κινητοποίηση των απαιτούμενων μέσων παραγωγής (εξαρτήματα & προσωπικό).
- Εγκατάσταση της κατασκευής
- Κινητοποίηση του εξοπλισμού προστασίας έναντι υποσκαφής του βυθού.
- Εφαρμογή προστασίας έναντι υποσκαφής του βυθού.
- Κινητοποίηση του εξοπλισμού σύνδεσης των καλωδίων.
- Εγκατάσταση των ηλεκτρικών καλωδίων.
- Πιθανή προστασία (μερών) των ηλεκτρικών καλωδίων έναντι υποσκαφής του βυθού.
- Αποδέσμευση των μέσων παραγωγής

Θα πρέπει να σημειωθεί πώς ο εξοπλισμός εγκατάστασης είναι διαφορετικός από τον εξοπλισμό προστασίας του βυθού έναντι υποσκαφής και από τον εξοπλισμό σύνδεσης των καλωδίων. Κάθε συνεργείο χρειάζεται τη δική του κινητοποίηση και αποδέσμευση, καθώς το συνεργείο προστασίας του βυθού έναντι υποσκαφής ή/και καλωδίων μπορεί να λειτουργεί ταυτόχρονα με άλλες δραστηριότητες.

#### 3.6.5 Παράγοντες χωρητικότητας & διαθεσιμότητας κατά την εγκατάσταση

Κατά το σχεδιασμό της εγκατάστασης ενός αιολικού πάρκου, κάποιος θα περίμενε πώς η πρακτική με το μικρότερο κόστος θα ήταν να φορτώσουμε όσο το δυνατόν περισσότερα μέρη στο πλοίο μεταφοράς, να τα



μεταφέρουμε στην τελική θέση και να τα εγκαταστήσουμε. Με τον τρόπο αυτό, ο χρόνος και το κόστος των μεταφορών από και προς την υπεράκτια τοποθεσία εγκατάστασης θα ήταν ο ελάχιστος δυνατός. Κάνοντας αυτή τη σκέψη, καλό θα ήταν να μην ξεχνάμε πώς για να εγκαταστήσουμε όσο το δυνατόν περισσότερες κατασκευές, θα πρέπει αυτές οι κατασκευές να είναι διαθέσιμες. Οι ακόλουθοι παράγοντες έχουν σημαντικό ρόλο σε αυτό:

- Οι κατασκευαστές θα πρέπει να κατασκευάζουν και να συναρμολογούν όσο το δυνατόν περισσότερα τμήματα των αιολικών μηχανών σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα και να τα διατηρούν αποθηκευμένα.
- Θα πρέπει να υπάρχει αρκετός διαθέσιμος χώρος στις αποβάθρες του λιμανιού, ώστε να διατηρούν το βέλτιστο αποθηκευτικό όγκο που απαιτείται για την εγκατάσταση. Θα πρέπει να σημειωθεί πώς οι αποθηκευτικοί χώροι στις αποβάθρες είναι αρκετά ακριβοί.
- Τα αποθηκευμένα εξαρτήματα στις αποβάθρες θα πρέπει να συμπληρώνονται από νέα, όταν μεταφέρονται για εγκατάσταση από τις φορηγίδες.
- Την ώρα της αναχώρησης από το λιμάνι θα πρέπει να υπάρχει ένα επαρκές χρονικό διάστημα εντός του οποίου αναμένονται ευνοϊκές καιρικές συνθήκες, ώστε να είναι δυνατή η διαδοχική εγκατάσταση αρκετών τμημάτων. Εάν ένα τέτοιο χρονικό διάστημα δεν είναι εφικτό να ευρεθεί, προστίθενται επιπλέον κόστη ενοικίου λόγω παρατεταμένης ανάγκης απασχόλησης των εγκαταστάσεων περί των αποβάθρων.

Οι σκέψεις αυτές αποσκοπούν στη βέλτιστη λειτουργία της διαδικασίας εγκατάστασης, η οποία περιλαμβάνει:

- Μια συνεχή διαδικασία εγκατάστασης, χωρίς διακοπές,
- Επαρκείς ποσότητες των διαφόρων εξαρτημάτων,
- Τη μέγιστη αξιοποίηση της χωρητικότητας κάθε πλοίου.

### **3.7 Παράγοντες καθυστέρησης στην εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων**

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι βασικότεροι παράγοντες που μπορούν να οδηγήσουν στην καθυστέρηση της εγκατάστασης, είτε λόγω μη ικανοποίησης των κριτηρίων εγκατάστασης, είτε λόγω συνθηκών που επηρεάζουν την ασφάλεια της εγκατάστασης. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι πιο σημαντικοί από τους παράγοντες αυτούς, όπως καταγράφηκαν από τους D. Ahn et al <sup>95</sup>.

---

<sup>95</sup> Ahn, Dang, Shin, Subg-chul, Kim, Soo-young, Kharoufi, Hicham, Kim, Hyun-cheol, 2016. Comparative evaluation of different offshore wind turbine installation vessels for Korean west-south wind farm



**Πίνακας 3.1: Παράγοντες καθυστέρησης οι οποίοι επηρεάζουν τη διάρκεια κατασκευής<sup>95</sup>.**

Κατηγορία	Παράγοντες	Περιγραφή
Παράγοντες καθυστέρησης	Κατακρήμνιση	Καθημερινός υετός πάνω από 10 mm ή περισσότερο από 1 mm ανά ώρα
	Παγετός	Θερμοκρασία κάτω από -10°C
	Φως/ορατότητα	Περιορισμός ορατότητας εντός 100 γιάρδων, προκληθείς από βροχή, ομίχλη και χιόνι
	Νυχτερινή εργασία	Ρίσκο στην εργασιακή ασφάλεια λόγω έλλειψης ή βλάβης εργοταξιακού φωτισμού για νυχτερινή εργασία
Περιορισμοί λειτουργικότητας πλοιαρίων	Περιορισμοί λόγω κυματισμού	Σημαντικά μεγάλο ύψος κυματισμών άνω του επιτρεπόμενου ορίου (1,5 m και άνω) για τη διέλευση και την εργασία πλοίων
	Περιορισμοί λόγω ανέμου	Άνεμος ταχύτητας μεγαλύτερης από 10 m/s στα 10 m από το επίπεδο της θάλασσας ή μεγαλύτερης από 12 m/s στην κεφαλή του πυλώνα.
	Περιορισμοί λόγω θαλάσσιων ρευμάτων	Έλλειψη ελέγχου λόγω θαλάσσιων ρευμάτων πάνω από την ακτογραμμή
	Παλιρροϊκό εύρος	Παλίρροια πάνω από τα μεγέθη σχεδιασμού

Συγκεκριμένα, οι περιορισμοί λειτουργικότητας των πλοίων αποτελούν ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων κριτηρίων, καθώς η εγκατάσταση έργων όπως είναι οι ανεμογεννήτριες απαιτούν ακρίβεια τοποθέτησης όσον αφορά τη θέση και το ύψος. Έτσι, οι περισσότεροι στόλοι εγκατάστασης έχουν περιορισμούς για σημαντικά ύψη κυματισμού. Ακόμα, η ταχύτητα του ανέμου αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα για τον προσδιορισμό της ικανότητας ενός γερανού να λειτουργήσει υπό αντίξοες συνθήκες ανέμου. Υπό κανονικές συνθήκες, στην περίπτωση που η ταχύτητα ανέμου υπερβαίνει τα 10 m/s στα 10 m από την επιφάνεια της θάλασσας ή υπερβαίνει τα 12 m/s στο ύψος κεφαλής της ανεμογεννήτριας, η λειτουργία του γερανού απαγορεύεται για λόγους ασφαλείας<sup>96</sup>.

### 3.8 Συνοπτική περιγραφή διαφορετικών διατάξεων εγκατάστασης

Η εγκατάσταση των ανεμογεννητριών σε υπεράκτια αιολικά πάρκα μπορεί να υλοποιηθεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Παλαιότερα, εξαιτίας της μικρής δυνατότητας παραγωγής ενέργειας των ανεμογεννητριών και συνεπώς του μικρού τους μεγέθους, η πιο συχνή λύση ήταν η προκατασκευή της διάταξης στη στεριά και έπειτα η μεταφορά της στη θέση τοποθέτησης. Στις μέρες μας, με τη ραγδαία αύξηση της δυνατότητας παραγωγής ενέργειας των ανεμογεννητριών, έχουμε φτάσει στο σημείο όπου η προκατασκευή (ήτοι συναρμολόγηση) των ανεμογεννητριών στη στεριά αποτελεί μια δύσκολη λύση.

Ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες στη διαμόρφωση ενός αιολικού πάρκου είναι ο τρόπος με τον οποίο θα γίνει η εγκατάσταση των αιολικών μηχανών. Αν αναλογιστούμε τις φυσικές διαστάσεις και τη μάζα μιας ανεμογεννήτριας με ονομαστική ισχύ πάνω από 2 MW, γίνεται κατανοητό πώς η μεταφορά στην τοποθεσία εγκατάστασης και γενικότερα ο χειρισμός μιας τόσο ευάλωτης κατασκευής θα πρέπει να αποτελέσει αντικείμενο μελέτης κατά τη φάση διαστασιολόγησης και σχεδιασμού.

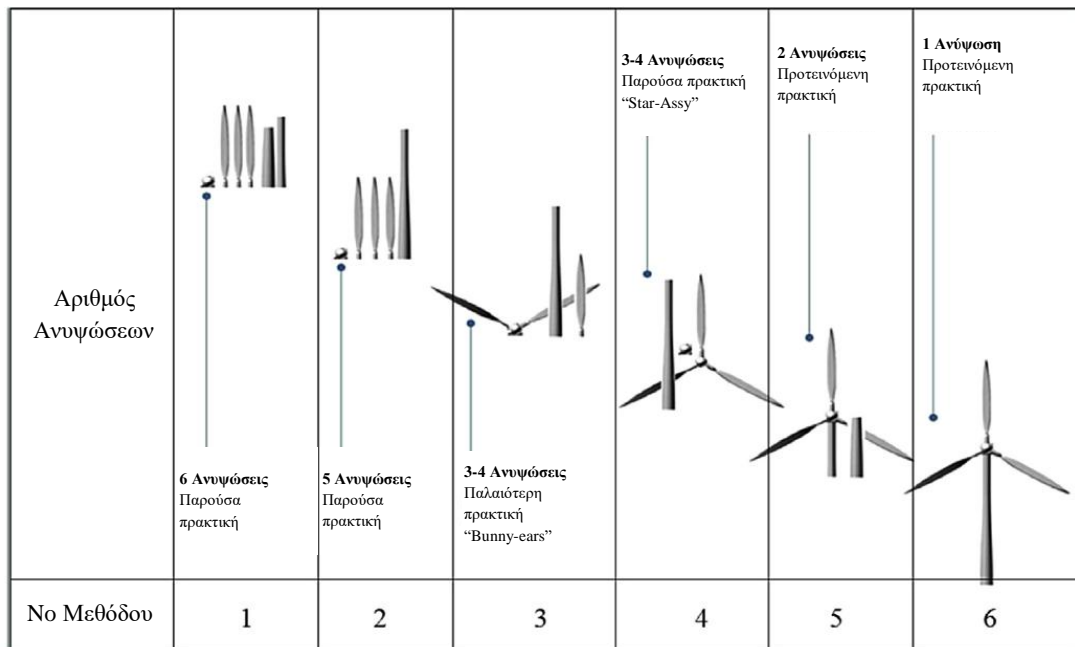
<sup>96</sup> Ahn, Dang, Shin, Subg-chul, Kim, Soo-young, Kharoufi, Hicham, Kim, Hyun-cheol, 2016. Comparative evaluation of different offshore wind turbine installation vessels for Korean west-south wind farm.





Η υιοθέτηση μιας λύσης με συναρμολόγηση των μηχανών στη στεριά ενέχει την απαίτηση ύπαρξης ενός μεγάλου χώρου εργασίας, ενός πλοιαρίου μεταφοράς με κατάστρωμα μεγάλης έκτασης και ένα γερανό μεγάλων δυνατοτήτων. Έτσι, τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται κυρίως η μέθοδος συναρμολόγησης αμέσως στη θέση του έργου. Η συναρμολόγηση στη θέση του έργου προτιμάται κυρίως, καθώς παρακάμπτει την απαίτηση ύπαρξης ενός γερανού μεγάλων δυνατοτήτων. Για την εγκατάσταση με σταδιακή συναρμολόγηση πάνω στη θέση του έργου, μια ξεχωριστή ανάλυση μεταφοράς των επιμέρους μελών θα πρέπει να διενεργηθεί, ανάλογα με τη μέθοδο εγκατάστασης που εφαρμόζεται (Kaiser and Snyder, 2012<sup>97</sup>; Thomsen 2012<sup>98</sup>).

Οι D. Ahn et al.<sup>99</sup> παρατήρησαν πώς ο καλύτερος τρόπος για τη μείωση του χρόνου εγκατάστασης είναι η μείωση του αριθμού των τμημάτων σταδιακής εγκατάστασης. Διερεύνησαν έτσι έξι διαφορετικά ενδεχόμενα εγκατάστασης, τέσσερα από τα οποία αποτελούν σύγχρονες ή παλαιότερες τεχνικές εγκατάστασης αιολικών μηχανών σε υπεράκτια αιολικά πάρκα και δύο τους οποίους πρότειναν. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται διαγραμματικά οι έξι αυτοί τρόποι τοποθέτησης.



Σχήμα 3.13: Μέθοδοι τοποθέτησης αιολικών μηχανών σε υπεράκτια πάρκα<sup>99</sup>.

Στη μελέτη αυτή αναφέρεται χαρακτηριστικά πώς η συσχέτιση χρόνου εγκατάστασης με κάθε τεχνική έχει ως εξής: οι μέθοδοι 1,2 απαιτούν περίπου λιγότερες από δύο ημέρες για την εγκατάσταση, ενώ οι μέθοδοι 3,4,5 απαιτούν κατά μέσο όρο 5 ή περισσότερες μέρες για την εγκατάσταση μιας μηχανής.

### 3.9 Αναλυτική περιγραφή διαφορετικών διατάξεων εγκατάστασης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μια ανεμογεννήτρια αποτελείται από τέσσερα κύρια μέρη:

<sup>97</sup> Kaiser, Mark J., Snyder, Brain F., 2012. Offshore Wind Energy Cost Modeling. Installation and Decommissioning. Springer.

<sup>98</sup> Thomsen, Kurt E., 2012. OFFSHORE WIND: a Comprehensive Guide to Successful Offshore Wind Farm Installation. Elsevier.

<sup>99</sup> Ahn, Dang, Shin, Subg-chul, Kim, Soo-young, Kharoufi, Hicham, Kim, Hyun-cheol, 2016. Comparative evaluation of different offshore wind turbine installation vessels for Korean west-south wind farm





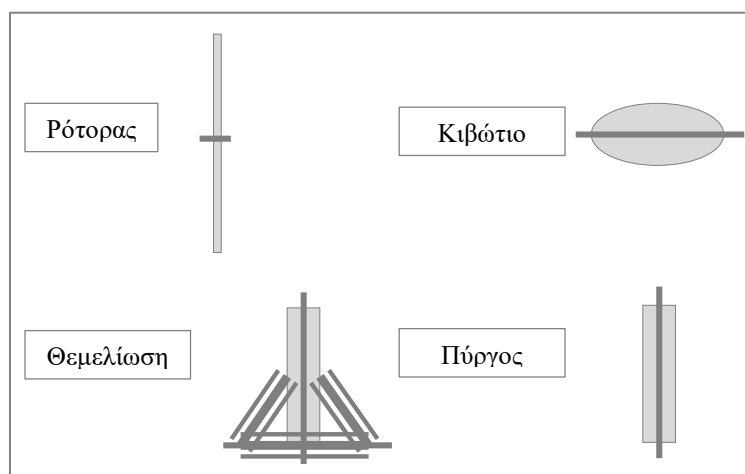
- Θεμελίωση
- Πυλώνας
- Κιβώτιο και κυρίως φρεάτιο
- Ρότορας (ή δρομέας).

Αυτά τα επιμέρους συστατικά προσφέρουν πολλές εναλλακτικές λύσεις εγκατάστασης:

1. Εγκατάσταση των τεσσάρων συστατικών μερών χωριστά, ξεκινώντας δηλαδή με τη θεμελίωση, τότε με τον πυλώνα, με το κιβώτιο και τέλος με το ρότορα (4 μέρη).
2. Εγκατάσταση της θεμελίωσης πρώτα, στη συνέχεια του πύργου μαζί με το κιβώτιο και τελικώς του ρότορα (3 μέρη).
3. Εγκατάσταση της θεμελίωσης πρώτα, στη συνέχεια του πύργου και τελικώς του κιβωτίου μαζί με το ρότορα (3 μέρη).
4. Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης και του πύργου (ένα μέρος), στη συνέχεια του κιβωτίου και τελικώς του ρότορα (3 μέρη).
5. Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης και του πύργου και στη συνέχεια του προ-συναρμολογημένου κιβωτίου με το ρότορα (2 μέρη).
6. Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης, του πύργου και του κιβωτίου (ένα μέρος) και στη συνέχεια του ρότορα (2 μέρη).
7. Εγκατάσταση της θεμελίωσης πρώτα και έπειτα τον προ-συναρμολογημένο πυλώνα, με το κιβώτιο και το ρότορα (2 μέρη).
8. Εγκατάσταση της πλήρους συναρμολογημένης ανεμογεννήτριας (1 μέρος).

Θα πρέπει να τονιστεί πώς οι εναλλακτικές αυτές δεν αφορούν οποιοδήποτε επιπλέον βοηθητικές κατασκευές πέραν των κανονικών διαστάσεων μιας αιολικής μηχανής, όπως είναι για παράδειγμα μια κατασκευή για την προσγείωση ελικοπτέρων, η οποία θα μπορούσε να κατασκευαστεί για λόγους συντήρησης των εγκαταστάσεων.

### 3.9.1 Διάταξη 1 - Εγκατάσταση των κυρίως μερών χωριστά



**Σχήμα 3.14: Διάταξη 1 - Εγκατάσταση των κυρίως μερών χωριστά.**

Όταν κάθε μέρος μιας αιολικής μηχανής εγκαθίσταται χωριστά, περισσότερα μέρη του ίδιου τύπου θα μπορούσαν να μεταφερθούν μαζί στην υπεράκτια θέση τους. Η βιωσιμότητα μιας τέτοιας εναλλακτικής



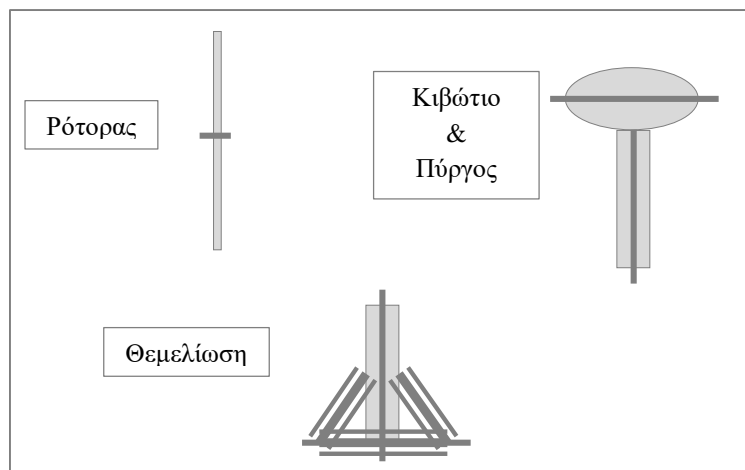
επαφίεται στη μεταφορική δυνατότητα των πλοιαρίων που θα χρησιμοποιηθούν. Μεταφέροντας περισσότερες από μια θεμελιώσεις μαζί, για παράδειγμα, θα ελαχιστοποιούσε το κόστος μεταφοράς και το χρόνο εγκατάστασης. Από την άλλη, μια αρκετά μεγάλη ποσότητα θεμελιώσεων θα έπρεπε να βρίσκεται στη στεριά, έτοιμη για μεταφορά, γεγονός που θα αύξανε τα κόστη αποθήκευσης.

Η χωριστή μεταφορά των θεμελίων θα μπορούσε ακόμη να οδηγήσει στη χρήση μικρότερων πλοιαρίων εγκατάστασης (μικρότερων σε μέγεθος ή/και ικανότητα ανύψωσης). Σε αυτή την περίπτωση όμως, τα πλοιάρια αυτά θα έπρεπε να επισκεφτούν τις τοποθεσίες εγκατάστασης περισσότερες φορές. Λόγω του μεγάλου ύψους του πυλώνα μιας ανεμογεννήτριας με ονομαστική ισχύ μεγαλύτερη από 2 MW (τουλάχιστον 80 m), είναι εύλογη η σκέψη κατασκευής του πύργου σε δύο ή περισσότερα μέρη και όχι σε ένα μέρος. Όμως, ο χρόνος εγκατάστασης αυξάνεται σημαντικά.

Ενώ ένα πλήθος κιβωτίων μπορεί να μεταφερθεί στην τοποθεσία εγκατάστασης ταυτόχρονα, η μεταφορά και η εγκατάσταση του ρότορα εμφανίζει περισσότερες επιπλοκές. Για το μέγεθος των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται σε υπεράκτια πάρκα απαιτούνται διάμετροι ρότορα μέχρι και 126 m. Η μεταφορά τους δεν καθορίζεται έτσι μόνο από το μέγεθός τους, αλλά και από την ευαισθησία τους σε βλάβες. Μια πιθανή μεταφορική επιλογή είναι να διαταχθούν πάνω από ένας ρότορες οριζόντια, ό ένας πάνω από τον άλλο (όχι σε επαφή), μέσω απόθεσής τους σε ένα αρθρωτό πλαίσιο μεταφοράς. Η χρήση δρομέων με διαφορετικές λεπίδες δεν εφαρμόζεται στην πράξη, καθώς απαιτεί ακρίβεια κατά τη συναρμολόγησή τους.

Η ανέγερση των κιβωτίων επί τόπου στην υπεράκτια θέση είναι χρονοβόρα. Ο απαιτούμενος χρόνος εγκατάστασης είναι συγκρίσιμος με το χρόνο εγκατάστασης μιας ολόκληρης ανεμογεννήτριας σε ένα μέρος. Ο χειρισμός λοιπόν και η ανέγερση των δρομέων αμέσως στην υπεράκτια θέση θα πρέπει να αποτελέσουν προϊόν σκέψης κατά το σχεδιασμό, καθώς η ανέγερση μεγάλων δρομέων στην υπεράκτια θέση απαιτεί εξειδικευμένο προσωπικό, το οποίο θα πρέπει να εργάζεται σε υψηλά ύψη και υπό αντίξοες συνθήκες. Μικρές κινήσεις και ελαφρύς αέρας αποτελούν συνήθεις συνθήκες κατά μια υπεράκτια τοποθέτηση, καθιστώντας ως κρίσιμο στοιχείο της διαδικασίας κανένα μέρος της αιολικής μηχανής να μην πέσει στη θάλασσα.

### 3.9.2 Διάταξη 2 - Εγκατάσταση της θεμελίωσης, στη συνέχεια του προ-συναρμολογημένου πύργου με το κιβώτιο και τέλος του ρότορα χωριστά



**Σχήμα 3.15: Διάταξη 2 - Εγκατάσταση της θεμελίωσης, στη συνέχεια του προ-συναρμολογημένου πύργου με το κιβώτιο και τέλος του ρότορα χωριστά.**

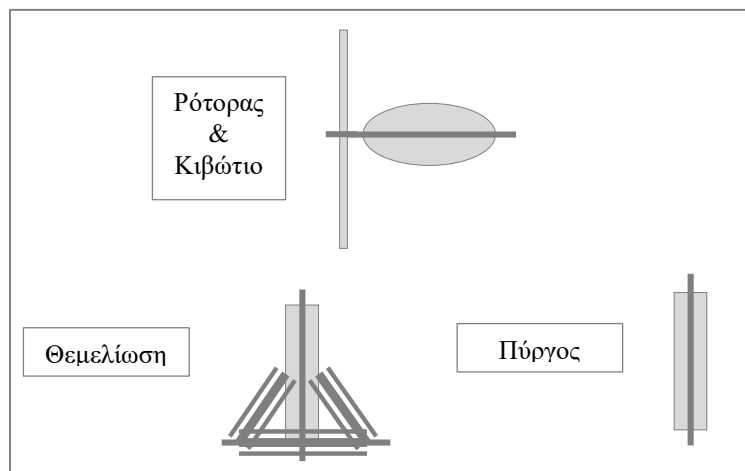
Η διάταξη αυτή βρίσκεται πολύ κοντά από πλευράς ομοιότητας στη διάταξη 1, με την ειδοποιό διαφοράς πώς προ-συναρμολογώντας τον πύργο και το κιβώτιο πριν την εγκατάστασή τους εξοικονομείται σημαντικός χρόνος εγκατάστασης.



Τα θέματα που ανακύπτουν για τη μεταφορά του πύργου είναι συγκρίσιμα με εκείνα για τη μεταφορά των θεμελίων. Ειδική προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην ασφαλή και χωρίς βλάβες μεταφορά των κιβωτίων. Για το λόγο αυτό, η μεταφορά περισσότερων από δύο πύργων ταυτόχρονα σε ένα πλοίο φαίνεται μη εύλογη, εκτός εάν μεταφέρονται σε κατακόρυφη θέση.

Ο απαιτούμενος χώρος μεταφοράς αυξάνεται έτσι ελαφρώς σε σχέση με τη διάταξη 1, γεγονός που μπορεί να αποτελέσει περιοριστικό παράγοντα για τα πλοιάρια εγκατάστασης.

### 3.9.3 Διάταξη 3 – Εγκατάσταση της θεμελίωσης, στη συνέχεια του πύργου και τέλος του κιβωτίου μαζί με το ρότορα

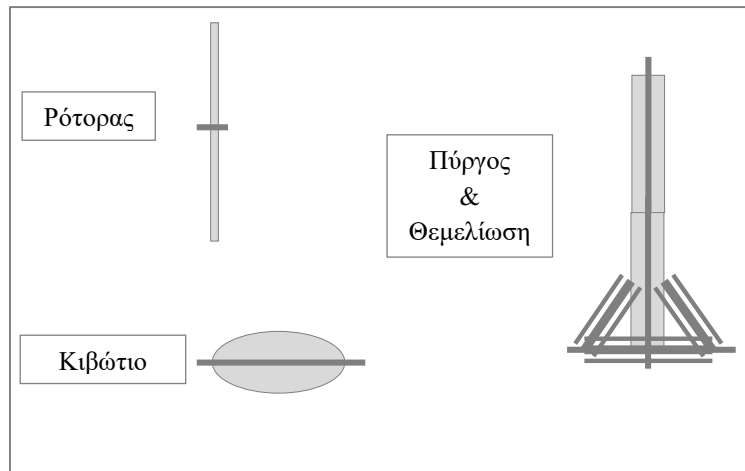


**Σχήμα 3.16: Διάταξη 3 – Εγκατάσταση της θεμελίωσης, στη συνέχεια του πύργου και τέλος του κιβωτίου μαζί με το ρότορα.**

Η μεταφορά και εγκατάσταση της θεμελίωσης και της αιολικής μηχανής ομοιάζει με τη διαδικασία που περιγράφηκε στη διάταξη 1. Η μεταφορά ενός προ-συναρμολογημένου κιβωτίου μαζί με το ρότορα θα μπορούσε να οδηγήσει σε πρακτικά προβλήματα, τα οποία αφορούν το χειρισμό και την υποστήριξη/σταθεροποίηση της κατασκευής κατά τη μεταφορά. Φαίνεται μη ρεαλιστικό το σενάριο να σκεφτούμε την πολλαπλή μεταφορά προ-συναρμολογημένων κιβωτίων και δρομέων λόγω των ειδικών πλαισίων μεταφοράς που θα απαιτούνταν.



### 3.9.4 Διάταξη 4 – Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης με τον πύργο και έπειτα του κιβωτίου και του ρότορα



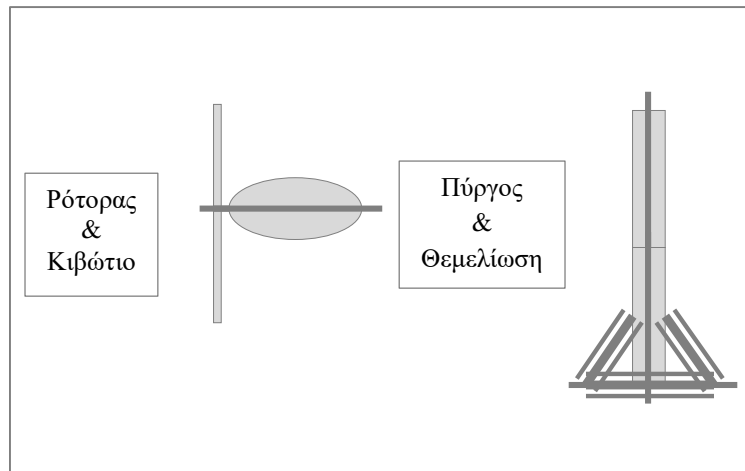
**Σχήμα 3.17:** Διάταξη 4 – Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης με τον πύργο και έπειτα του κιβωτίου και του ρότορα.

Η διάταξη αυτή επίσης ομοιάζει με τη διάταξη 1. Η σημαντική όμως διαφορά τους έγκειται στο γεγονός πώς η προ-συναρμολογημένη κατασκευή είναι πλέον σημαντικά μεγαλύτερη, εκτός και αν υποδιαιρεθεί σε λάμες/διατομές ανοικτού τύπου. Θα πρέπει να σημειωθεί πώς η εγκατάσταση μιας προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης μονού πυλώνα με τον πύργο της δεν είναι δυνατή από κατασκευαστικής άποψης. Για την αποφυγή πιθανών βλαβών, η μεταφορά διαφόρων μερών ταυτόχρονα θα πρέπει να γίνεται μόνο με τα διάφορα μέρη σε κατακόρυφη θέση. Η επιλογή όμως αυτή δεν είναι εφαρμόσιμη στην περίπτωση θεμελιώσεων μονού πυλώνα.

Στην περίπτωση θεμελίωσης τύπου “Jacket”, η θεμελίωση και ο πύργος θα πρέπει να σχεδιαστούν ολοκληρωμένα, ώστε να περιοριστεί ο χρόνος προ-συναρμολόγησης στη στεριά. Περισσότεροι συνδυασμοί “jacket-πύργου” μπορούν να μεταφερθούν κατακόρυφα στη θέση εγκατάστασης και να τοποθετηθούν ο ένας μετά τον άλλο διαδοχικά. Τα στοιχεία που αφορούν τη μεταφορά στη διάταξη αυτή ομοιάζουν με εκείνα που περιγράφηκαν στις προηγούμενες διατάξεις. Η εγκατάσταση των δρομέων έχει κοινά χαρακτηριστικά με εκείνη για τις διατάξεις 1 και 2.



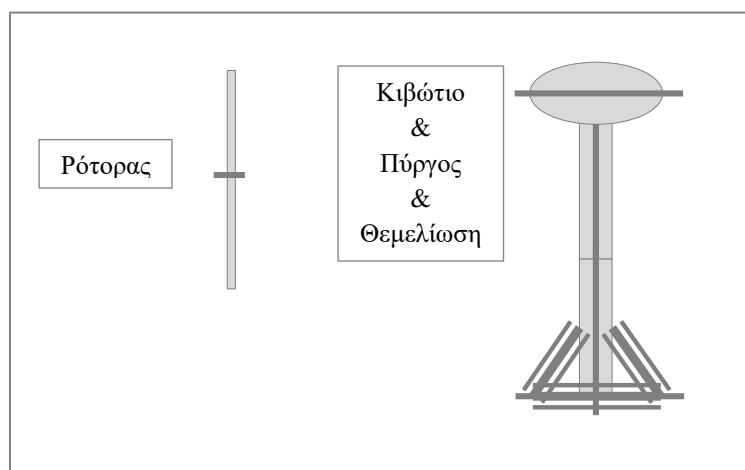
### 3.9.5 Διάταξη 5 – Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης με τον πύργο και έπειτα του προ-συναρμολογημένου κιβωτίου με το δρομέα



**Σχήμα 3.18: Διάταξη 5 – Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης με τον πύργο και έπειτα του προ-συναρμολογημένου κιβωτίου με το δρομέα.**

Η διάταξη αυτή αποτελεί ένα συνδυασμό της διάταξης 3 και 4 που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Τα σχόλια και οι προβληματισμοί που παρουσιάστηκαν σε αυτές και αφορούσαν τη στήριξη των προ-συναρμολογημένων μερών έχουν εφαρμοσιμότητα και σε αυτή τη διάταξη.

### 3.9.6 Διάταξη 6 – Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης με τον πύργο και το κιβώτιο και έπειτα του ρότορα



**Σχήμα 3.19: Διάταξη 6 – Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης με τον πύργο και το κιβώτιο και έπειτα του ρότορα.**

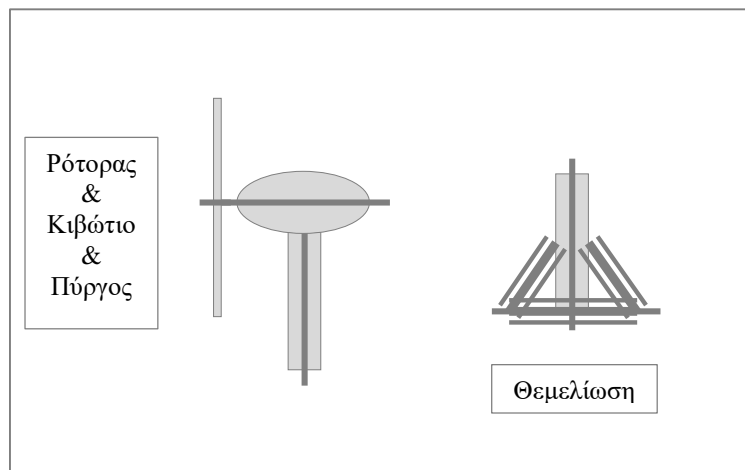
Ως μια επιπλέον επιλογή στη διάταξη 5, η προ-συναρμολογημένη κατασκευή μπορεί να εμπεριέχει και το κιβώτιο, εκτός από τη θεμελίωση και τον πύργο. Η διάταξη αυτή μπορεί να μεταφερθεί με τον ίδιο τρόπο όπως και η διάταξη 5. Όμως, στην περίπτωση αυτή αυξάνεται σημαντικά η μάζα που θα πρέπει να ανυψωθεί κατά την τοποθέτηση της αιολικής μηχανής. Από την άλλη μεριά, μειώνεται σημαντικά ο χρόνος τοποθέτησης σε σχέση με τις προηγούμενες διατάξεις, όπου ένας ή δύο κόμβοι της κατασκευής πρέπει να συνδεθούν επί τόπου



στη θέση εγκατάστασης (σύνδεση πύργου-θεμελίωσης και σύνδεση πύργου-κιβωτίου).

Μια επιπλέον δυσκολία που αφορά τη θεμελίωση με χρήση του τύπου “jacket” αφορά την ευαισθησία του πλήρους πύργου (με το κιβώτιο) σε ταλαντώσεις, οι οποίες προκαλούνται από τη μετακίνηση των πασσάλων εγκατάστασης. Η κατασκευή θα πρέπει λοιπόν στην περίπτωση αυτή να αναλυθεί για τα εν λόγω φορτία.

### 3.9.7 Διάταξη 7 – Εγκατάσταση της θεμελίωσης και στη συνέχεια του προ-συναρμολογημένου πύργου, του κιβωτίου και του ρότορα



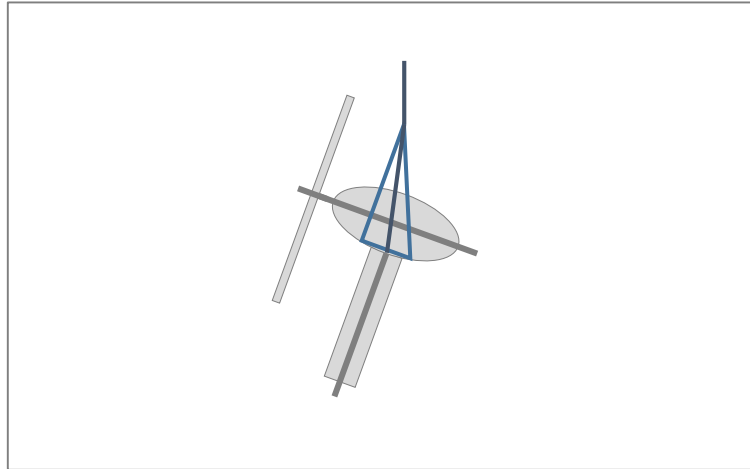
**Σχήμα 3.20: Διάταξη 7 – Εγκατάσταση της θεμελίωσης και στη συνέχεια του προ-συναρμολογημένου πύργου, του κιβωτίου και του ρότορα.**

Η προσέγγιση αυτή αφορά την εγκατάσταση της θεμελίωσης αρχικά και έπειτα την εγκατάσταση του προ-συναρμολογημένου πύργου, του κιβωτίου και του ρότορα. Όσον αφορά τα λογιστικά θέματα που αφορούν τη μεταφορά (το μέγεθος του πλοίου και τον τρόπο μεταφοράς), μια μελέτη περίπτωσης θα πρέπει να διενεργηθεί για τη μεταφορά, θεωρώντας τα φορτία ανέμου για τον πύργο της αιολικής μηχανής μαζί με τα στατικά φορτία λόγω του ρότορα.

Ο τρόπος μεταφοράς του προ-συναρμολογημένου συνόλου θα πρέπει να είναι κατακόρυφος: κάθε υποσύνολο θα πρέπει να φορτωθεί προσωρινά σε μια θεμελίωση η οποία θα κατασκευαστεί πάνω στο πλοίο (για παράδειγμα μια μεγάλη άρθρωση, είτε στο εσωτερικό είτε στο εξωτερικό του πύργου). Αυτό σημαίνει πώς το πλοίο μεταφοράς θα πρέπει να υποστεί τροποποιήσεις για την επιτέλεση του στόχου αυτού. Ο συνολικός χρόνος εγκατάστασης είναι λοιπόν στην περίπτωση αυτή αρκετός, καθώς η ταχύτητα μεταφοράς είναι σχετικά μικρή.

Μια δεύτερη επιλογή μεταφοράς του προ-συναρμολογημένου συνόλου αφορά τη μεταφορά υπό ανάρτηση (free-hanging transport), για την οποία θα πρέπει να γίνουν έλεγχοι επάρκειας του διαθέσιμου γερανού που θα φέρει τον πύργο καθ' όλη τη μεταφορά του.



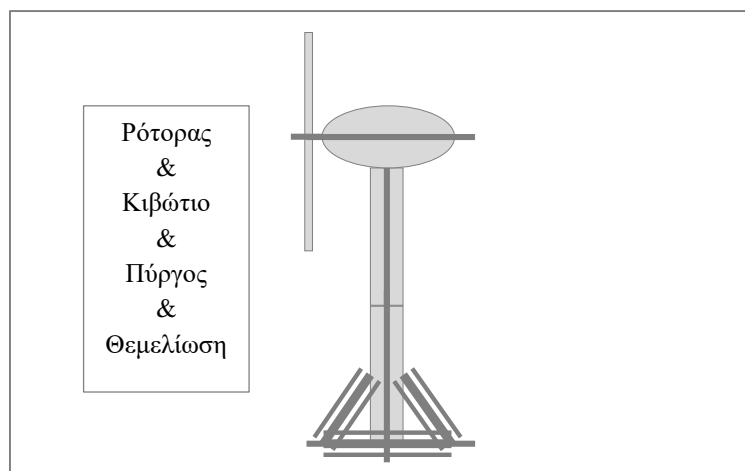


**Σχήμα 3.21: Μεταφορά αιολικής μηχανής υπό ανάρτηση.**

Η εγκατάσταση του προ-συναρμολογημένου συνόλου που απαρτίζεται από τον πύργο, το κιβώτιο και το ρότορα ενέχει κάποιες ακόμα δυσκολίες: ο χειρισμός του συνόλου θα πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε να μη συμβούν βλάβες στο ρότορα. Το σύνολο πύργου-ρότορα θα πρέπει να αναρτηθεί από την προσωρινή στήριξη, εκθέτοντας τουλάχιστον μια λεπίδα του ρότορα σε βλάβη, εάν το σύνολο περιστραφεί περί τον κατακόρυφο άξονα, μιας και μπορεί να έρθει σε επαφή είτε με το καλώδιο ανάρτησης, είτε με κάποιο τμήμα του γερανού. Ο έλεγχος της ευστάθειας του συνόλου αυτού κατά την εγκατάσταση είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί.

Επιπρόσθετα, όταν το σύνολο βρίσκεται υπό ανάρτηση, θα μπορούσε να γύρει με τέτοιο τρόπο, ώστε το κέντρο βάρους να βρίσκεται ακριβώς κάτω από το σημείο ανάρτησης. Επειδή το κέντρο βάρους της διάταξης βρίσκεται αρκετά ψηλά, η συναρμολογημένη κατασκευή θα πρέπει να κρατείται στη θέση της από βοηθητικές γραμμές, ώστε η εγκατάσταση να είναι επιτυχής. Στην περίπτωση αυτή, μια στατική ανάλυση της ευαισθησίας του πλήρους πύργου (με το κιβώτιο) θα πρέπει να διενεργηθεί, έναντι των ταλαντώσεων που οφείλονται στην τοποθέτηση των πασσάλων, όταν οι αιολικές μηχανές φέρονται από θεμελίωση τύπου “jacket”, κατά τη φάση σχεδιασμού και διαστασιολόγησης της αιολικής μηχανής.

### 3.9.8 Διάταξη 8 – Εγκατάσταση της πλήρους προ-συναρμολογημένης αιολικής μηχανής στην τελική υπεράκτια θέση εγκατάστασης





**Σχήμα 3.22: Διάταξη 8 – Εγκατάσταση της πλήρους προ-συναρμολογημένης αιολικής μηχανής στην τελική υπεράκτια θέση εγκατάστασης.**

Αυτή η μέθοδος εγκατάστασης είναι εφαρμόσιμη μόνο για θεμελιώσεις τύπου “jacket” ή βαρύτητας. Η ιδέα είναι να μεταφέρουμε μια ή κατά μέγιστο δύο ανεμογεννήτριες τη φορά στην υπεράκτια θέση εγκατάστασης, να αναρτήσουμε μια πλήρως συναρμολογημένη αιολική μηχανή και να την εγκαταστήσουμε.

Η εγκατάσταση μιας τέτοιας κατασκευής απαιτεί πιθανώς πλοία φτιαγμένα ειδικά για αυτό το σκοπό, αλλά θα μπορούσε να εφαρμοστεί και η χρήση αυτό-ανυψωτικών πλοιαρίων (jack-up). Στην περίπτωση αυτή, η αυξημένη μάζα του συνόλου παίζει σημαντικό ρόλο στη μεταφορά και την τοποθέτηση των μηχανών. Ένα μεγάλο πρόβλημα στην περίπτωση αυτή μπορεί να είναι το ύψος στο οποίο η συνολική κατασκευή θα πρέπει να αναρτηθεί.

Μια ανάλυση ευαισθησίας του συνολικού πύργου (με το κιβώτιο) θα πρέπει να διενεργηθεί, έναντι των ταλαντώσεων που προκαλούνται από την τοποθέτηση των πασσάλων στις περιπτώσεις θεμελιώσεων τύπου “jacket”, σε συμφωνία με όσα περιγράφηκαν στις διατάξεις 6 και 7.

Στην ίδια φιλοσοφία με όσα παρουσιάστηκαν για τη διάταξη 7, η εγκατάσταση θα πρέπει να υλοποιηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην προκληθούν βλάβες στο ρότορα. Η συνολική κατασκευή θα πρέπει να αναρτηθεί από τον πύργο, εκθέτοντας τουλάχιστον μια λεπίδα του ρότορα σε πιθανή βλάβη, αν το σύνολο περιστραφεί γύρω από τον κατακόρυφο άξονα. Ο έλεγχος ευστάθειας του συνόλου κατά την εγκατάσταση είναι ευκολότερος να επιτευχθεί απ’ ότι στη διάταξη 7, λόγω του πλάτους της βάσης τύπου “jacket”. Ακόμα, το η συνολική κατασκευή αναμένεται να γέρνει λιγότερο από την αντίστοιχη στη διάταξη 7, καθώς πλέον το κέντρο βάρους του συνόλου βρίσκεται σε χαμηλότερη θέση.

### **3.10 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διατάξεων**

#### **3.10.1 Διάταξη 1 - Εγκατάσταση των κυρίως μερών χωριστά**

##### Υπέρ

- ✓ Η εγκατάσταση θεμελιώσεων μονού πυλώνα μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πολύ σύντομα χρονικά διαστήματα.
- ✓ Σχετικά μικρή μάζα των μερών που θα αναρτηθούν σε μεγάλο ύψος.
- ✓ Περισσότεροι ρότορες μπορούν να μεταφερθούν σε ένα πλοίο.
- ✓ Μικρός χρόνος μεταφοράς εάν περισσότερα μέρη του ίδιου τύπου μεταφερθούν μαζί.
- ✓ Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μικρότερα πλοία.

##### Κατά

- ✗ Σημαντικός χρόνος εγκατάστασης.
- ✗ Υψηλό ρίσκο προσωπικού κατά την εγκατάσταση των μερών του ρότορα και του κιβωτίου.
- ✗ Δυσκολία στο χειρισμό και την ανάρτηση των διαφόρων μερών του πύργου, του κιβωτίου και του ρότορα.
- ✗ Ο ρότορας είναι ευάλωτος σε βλάβες κατά την υπεράκτια εγκατάσταση.
- ✗ Απαιτούνται πολλά μικρά πλοία εγκατάστασης για ένα σύντομο χρονικό διάστημα, τα οποία θα πηγαίνουν από και προς τη θέση εγκατάστασης συχνά.



### 3.10.2 Διάταξη 2 - Εγκατάσταση της θεμελίωσης, στη συνέχεια του προ-συναρμολογημένου πύργου με το κιβώτιο και τέλος του ρότορα χωριστά

#### Υπέρ

- ✓ Η εγκατάσταση θεμελιώσεων μονού πυλώνα μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πολύ σύντομα χρονικά διαστήματα.
- ✓ Περισσότεροι ρότορες μπορούν να μεταφερθούν σε ένα πλοίο.
- ✓ Δεν απαιτείται υπεράκτιος χρόνος εγκατάστασης για τα κιβώτια.

#### Κατά

- \* Υψηλό ρίσκο για το προσωπικό κατά την εγκατάσταση του ρότορα.
- \* Δυσκολία στο χειρισμό και την ανάρτηση των διαφόρων μερών του ρότορα.
- \* Ο ρότορας είναι ευάλωτος σε βλάβες κατά την υπεράκτια εγκατάσταση.
- \* Σχετικά μεγάλη μάζα των μερών που θα αναρτηθούν σε μεγάλο ύψος.
- \* Απαιτούνται πολλά μικρά πλοία εγκατάστασης για ένα σύντομο χρονικό διάστημα, τα οποία θα πηγαίνουν από και προς τη θέση εγκατάστασης συχνά.
- \* Απαιτούνται μεγαλύτερα πλοία εγκατάστασης σε σχέση με τη διάταξη 1 (μέγεθος και δυνατότητες ανύψωσης για τον προ-συναρμολογημένο πύργο μαζί με το κιβώτιο).

### 3.10.3 Διάταξη 3 – Εγκατάσταση της θεμελίωσης, στη συνέχεια του πύργου και τέλος του κιβωτίου μαζί με το ρότορα

#### Υπέρ

- ✓ Η εγκατάσταση θεμελιώσεων μονού πυλώνα μπορεί να πραγματοποιηθεί σε πολύ σύντομα χρονικά διαστήματα.
- ✓ Δεν απαιτείται υπεράκτιος χρόνος εγκατάστασης για το ρότορα.
- ✓ Μικρότερη δυσκολία στο χειρισμό και την ανάρτηση των συνόλων κιβωτίου-ρότορα σε σύγκριση με τις διατάξεις 1 και 2.
- ✓ Σχετικά μικρή μάζα των μερών που θα αναρτηθούν σε μεγάλο ύψος.

#### Κατά

- \* Υψηλό ρίσκο για το προσωπικό κατά την εγκατάσταση του συνόλου κιβωτίου-ρότορα.
- \* Πιο πιθανό ενδεχόμενο η μεταφορά ενός συνόλου κιβωτίου-ρότορα ανά διαδρομή.
- \* Σημαντικός χρόνος εγκατάστασης για τις συνδέσεις πύργου-κιβωτίου.

### 3.10.4 Διάταξη 4 – Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης με τον πύργο και έπειτα του κιβωτίου και του ρότορα

#### Υπέρ

- ✓ Είναι πιθανός ενιαίος σχεδιασμός θεμελίωσης και πύργου εάν επιλεγθεί θεμελίωση τύπου “jacket”.
- ✓ Η μεταφορά της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης μαζί με τον πύργο μπορεί να επιτευχθεί κατακόρυφα (σε όρθια θέση), εκμηδενίζοντας την απαίτηση μεγάλου χώρου μεταφοράς επί του πλοιαρίου μεταφοράς, χρησιμοποιώντας έτσι μικρότερο αριθμό πλοίων.



#### Κατά

- \* Η διάταξη αυτή δεν υποστηρίζει θεμελιώσεις μονού πυλώνα.
- \* Σχετικά μεγάλη μάζα των μερών που θα αναρτηθούν σε μεγάλο ύψος.

#### 3.10.5 Διάταξη 5 – Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης με τον πύργο και έπειτα του προ-συναρμολογημένου κιβωτίου με το δρομέα

#### Υπέρ

- ✓ Δεν απαιτείται υπεράκτιος χρόνος εγκατάστασης για το ρότορα.
- ✓ Μικρότερη δυσκολία στο χειρισμό και την ανάρτηση των συνόλων κιβωτίου-ρότορα σε σύγκριση με τις διατάξεις 1 και 2.
- ✓ Είναι πιθανός ενιαίος σχεδιασμός θεμελίωσης και πύργου εάν επιλεγθεί θεμελίωση τύπου “jacket”.
- ✓ Η μεταφορά της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης μαζί με τον πύργο μπορεί να επιτευχθεί κατακόρυφα (σε όρθια θέση), εκμηδενίζοντας την απαίτηση μεγάλου χώρου μεταφοράς επί του πλοιαρίου μεταφοράς, χρησιμοποιώντας έτσι μικρότερο αριθμό πλοίων.

#### Κατά

- \* Η διάταξη αυτή δεν υποστηρίζει θεμελιώσεις μονού πυλώνα.
- \* Σχετικά μεγάλη μάζα των μερών που θα αναρτηθούν σε μεγάλο ύψος.

#### 3.10.6 Διάταξη 6 – Εγκατάσταση της προ-συναρμολογημένης θεμελίωσης με τον πύργο και το κιβώτιο και έπειτα του ρότορα

#### Υπέρ

- ✓ Δεν απαιτείται υπεράκτιος χρόνος εγκατάστασης για το κιβώτιο ή για τον πύργο.

#### Κατά

- \* Η διάταξη αυτή δεν υποστηρίζει θεμελιώσεις μονού πυλώνα.
- \* Υψηλό ρίσκο για το προσωπικό κατά την εγκατάσταση του ρότορα.
- \* Σχετικά μεγάλη μάζα των μερών που θα αναρτηθούν σε μεγάλο ύψος.
- \* Επιπλέον μελέτη περίπτωσης για το κιβώτιο λόγω των ταλαντώσεων κατά την εγκατάσταση.

#### 3.10.7 Διάταξη 7 – Εγκατάσταση της θεμελίωσης και στη συνέχεια του προ-συναρμολογημένου πύργου, του κιβωτίου και του ρότορα

#### Υπέρ

- ✓ Η διάταξη αυτή δεν υποστηρίζει θεμελιώσεις μονού πυλώνα.
- ✓ Δεν υπάρχει υψηλό ρίσκο προσωπικού.
- ✓ Δεν υπάρχει δυσκολία στο χειρισμό και την ανάρτηση των διαφόρων μερών του ρότορα.

#### Κατά

- \* Απαιτείται Μεταφορικό πλοίο είτε κατασκευασμένο, είτε τροποποιημένο για το συγκεκριμένο σκοπό.
- \* Σχετικά μεγάλη μάζα των μερών που θα αναρτηθούν σε μεγάλο ύψος.



- ✘ Επιπλέον μελέτες περίπτωσης για τη μεταφορά του προ-συναρμολογημένου πύργου, κιβωτίου και ρότορα κάθε αιολικής μηχανής.
- ✘ Ο ρότορας είναι ευάλωτος σε βλάβες κατά την υπεράκτια εγκατάσταση.

### 3.10.8 Διάταξη 8 – Εγκατάσταση της πλήρους προ-συναρμολογημένης αιολικής μηχανής στην τελική υπεράκτια θέση εγκατάστασης

#### Υπέρ

- ✓ Πολύ μικρός χρόνος εγκατάστασης.
- ✓ Μικρή πιθανότητα βλάβης της κατασκευής λόγω χειρισμών.
- ✓ Χαμηλό ρίσκο προσωπικού.
- ✓ Καμία δυσκολία στο χειρισμό και την ανάρτηση των μερών του ρότορα.
- ✓ Χαμηλή ευαισθησία του ρότορα κατά την υπεράκτια εγκατάστασή του.
- ✓ Διαθεσιμότητα κατασκευής της αιολικής μηχανής ίσως στο ίδιο επίπεδο με το απαιτούμενο χρονικό διάστημα εγκατάστασης (μια την εβδομάδα).

#### Κατά

- ✘ Η διάταξη αυτή δεν υποστηρίζει θεμελιώσεις μονού πυλώνα.
- ✘ Μόνο μια (το πολύ δύο) πλήρως συναρμολογημένες αιολικές μηχανές μπορεί να μεταφερθεί στη θέση εγκατάστασης σε κάθε διαδρομή.
- ✘ Απαιτούνται μεγάλα πλοία μεταφοράς και εγκατάστασης (ίσως κατασκευασμένα ή τροποποιημένα για το συγκεκριμένο σκοπό).
- ✘ Σχετικά μεγάλη μάζα των μερών που θα αναρτηθούν σε μεγάλο ύψος.
- ✘ Επιπλέον ανάλυση μελέτης περίπτωσης λόγω των ταλαντώσεων κατά την εγκατάσταση.



## Κεφάλαιο 4 Μελέτη υπεράκτιου πάρκου στην Αλεξανδρούπολη

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μια μελέτη περίπτωσης για την εγκατάσταση υπεράκτιου αιολικού πάρκου στον κόλπο της Αλεξανδρούπολης. Ο σχεδιασμός διενεργείται με βάση υπολογισμούς αλλά και περιορισμούς οι οποίοι αφορούν τη χωροθέτηση, την εγκατάσταση και τη λειτουργία ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Αρχικά διασαφηνίζονται έννοιες που αφορούν το σχεδιασμό ενός αιολικού πάρκου, υπολογίζεται το αιολικό δυναμικό της περιοχής στο ύψος καταγραφής, εκτιμάται η κύρια διεύθυνση του ανέμου και επιλέγεται ένα διαθέσιμο θαλάσσιο οικόπεδο που θα φιλοξενήσει το αιολικό πάρκο. Στη συνέχεια, επιλέγονται δύο ανεμογεννήτριες του εμπορίου με ισχύ 2 MW έκαστη, για τις οποίες πραγματοποιούνται όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί, καταλήγοντας στον αριθμό των ανεμογεννητριών που θα χρησιμοποιηθούν, καθώς και στην παραγόμενη ενέργεια που τους αντιστοιχεί.

### 4.1 Χαρακτηριστικά του ανέμου

Ως άνεμος ορίζονται οι μετακινήσεις των μαζών του ατμοσφαιρικού αέρα και υπάρχουν τρεις παράγοντες οι οποίοι είναι ικανοί να προκαλέσουν τις μεταβολές αυτές:

- η περιστροφή της γης γύρω από τον άξονα της
- η ηλιακή ενέργεια, η οποία απορροφάτε από την ατμόσφαιρα και την επιφάνεια του εδάφους
- η ανομοιομορφία στο ανάγλυφο της γης

Οι τρεις αυτοί παράγοντες επηρεάζουν την κατανομή της ατμοσφαιρικής πίεσης στην επιφάνεια της γης, με αποτέλεσμα αυτή να μην είναι ομοιόμορφη και να δημιουργείται μια διαφορά πιέσεων η οποία προκαλεί τη μετακίνηση των αέριων μαζών, ώστε να αντισταθμιστεί η διαφορά.

Δεδομένου ότι η αιολική ενέργεια είναι ανάλογη με τη ταχύτητα του ανέμου, είναι σημαντική η λεπτομερής γνώση των χαρακτηριστικών του ανέμου για μια περιοχή. Ακόμη και μικρά λάθη στην εκτίμηση της ταχύτητας του ανέμου μπορούν να έχουν μεγάλες συνέπειες στην ενεργειακή απόδοση, αλλά επίσης να οδηγήσουν και σε κακές επιλογές για το χώρο της εγκατάστασης και τις ανεμογεννήτριες. Μια μέση ταχύτητα του ανέμου δεν είναι επαρκής. Τα χαρακτηριστικά του ανέμου που πρέπει να υπολογίζονται είναι:

- μέση ταχύτητα ανέμου: Μόνο ενδιαφέρον ως μια επικεφαλίδα σχήμα, αλλά δεν λέει πόσο συχνά συμβαίνουν υψηλές ταχύτητες ανέμου.
- κατανομή της ταχύτητας του ανέμου: ημερήσια, εποχιακή, ετήσια
- αναταράξεις: βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις
- μακροπρόθεσμες διακυμάνσεις
- κατανομή της κατεύθυνσης του ανέμου

Από τα χαρακτηριστικά του ανέμου αυτά που ξεχωρίζουν και είναι προς καταγραφή είναι η διεύθυνση, η ταχύτητα και η ένταση του. Η διεύθυνση προκύπτει ανάλογα με το σημείο του ορίζοντα από όπου πνέει ο άνεμος και από τις καταγραφές τις προκύπτει το ονομαζόμενο πολικό διάγραμμα.

Πέρα από τα παραπάνω μεγέθη, ιδιαίτερα χρήσιμες είναι οι καταγραφές των ριπών του ανέμου, των στροβιλισμών και των αναταράξεων (εφόσον αυτά υπάρχουν) αλλά και της τύρβης του ανέμου. Αξίζει να σημειωθεί πως για τον υπολογισμό της διανομής της ταχύτητας του ανέμου, χρησιμοποιούνται ορισμένοι ημ εμπειρικοί αναλυτικοί νόμοι που βασίζονται στην αύξηση της ταχύτητας του ανέμου ανάλογα με το υψόμετρο. Επίσης, η διανομή της ταχύτητας του ανέμου μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες όπως η ύπαρξη εμποδίων στην επιφάνεια της γης, η τραχύτητα του εδάφους αλλά και το τοπογραφικό ανάγλυφο που παρουσιάζει η εκάστοτε περιοχή.





Αφού καταγραφούν τα χαρακτηριστικά που αναφέραμε για τη χρονική περίοδο του ενός χρόνου συνήθως, στη συνέχεια ακολουθεί η επεξεργασία των στοιχείων ώστε να κατασκευαστεί το ιστόγραμμα με τη συχνότητα της πιθανότητας του ανέμου, η ετήσια καμπύλη διάρκειάς και το πολικό διάγραμμα. Οι μετρήσεις που πραγματοποιούνται σύμφωνα με την κλίμακα Beaufort, παρουσιάζουν μειωμένη ακρίβεια, λόγω της ασάφειας των βαθμίδων της συγκεκριμένης κλίμακας. Τέλος από όλες τις μεταβλητές για τον προσδιορισμό του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, παρουσιάζεται ως η σπουδαιότερη η οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας του ανέμου<sup>100</sup>.

## 4.2 Βασικοί υπολογισμοί και έννοιες

### 4.2.1 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια αποτελεί ουσιαστικά την κινητική ενέργεια των αερίων μαζών της ατμόσφαιρας. Συνεπώς προκύπτει από την εξίσωση της κινητικής ενέργειας:

$$E_k = \frac{1}{2} mu^2$$

όπου

m η μάζα (kg)

u η ταχύτητα (m/s)

### 4.2.2 Κατανομή Weibull

Για την μαθηματική ανάλυση των μετρήσεων του ανέμου χρησιμοποιείται η κατανομή Weibull. Η κατανομή αυτή αποτελεί μια έκφραση της πιθανότητας ο άνεμος σε μια συγκεκριμένη περιοχή να έχει ταχύτητα μεταξύ  $u + \frac{\Delta u}{2}$  και  $u - \frac{\Delta u}{2}$ . Σε κάθε κατανομή εντοπίζεται μια παράμετρος κλίμακας  $c$ , αλλά και ένας συντελεστής σχήματος  $k$ .

Για τον σχεδιασμό της καμπύλης Weibull, είναι απαραίτητο να υπολογιστεί η πιθανότητα για όλα τα σύνολα των ταχυτήτων, από 0 έως 25 m/s, με το εύρος τιμών αυτό να είναι χωρισμένο σε κλάσεις 1m/s. Αφού πραγματοποιηθούν μετρήσεις του ανέμου για μια περιοχή για τη χρονική περίοδο του ενός χρόνο, μπορεί να προκύψει στη πλειοψηφία των περιπτώσεων πως οι ισχυροί άνεμοι δεν κάνουν συχνά την εμφάνιση της, κάτι που ισχύει και για τις περιπτώσεις πλήρους άπνοιας. Προκύπτει μάλιστα πως η πιθανότητα εμφάνισης ανέμων με μηδενική ένταση είναι κοντά στο μηδέν.

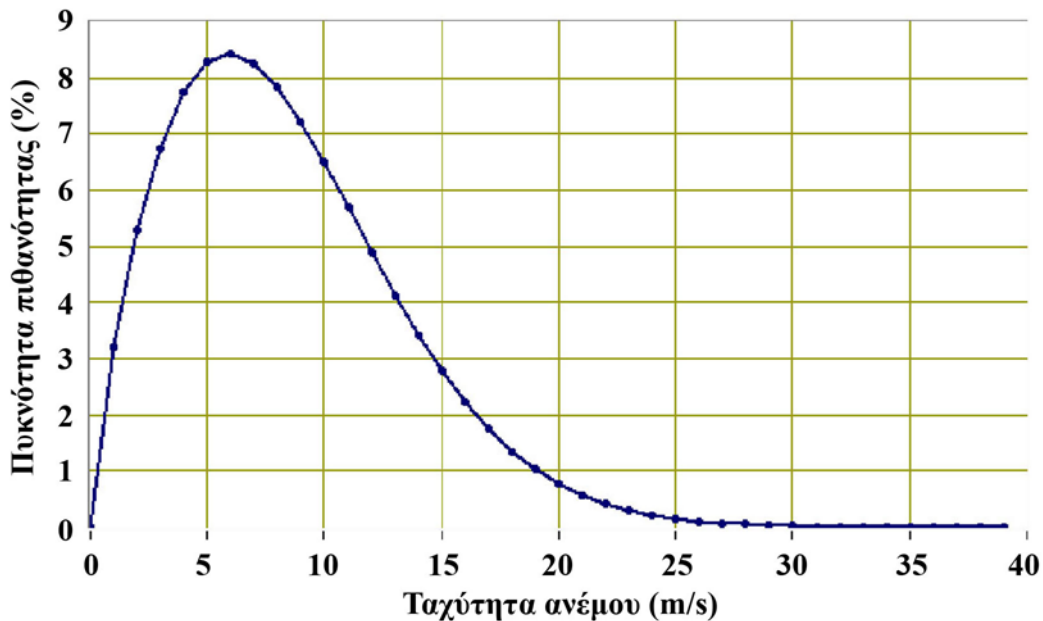
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται μια καμπύλη Weibull. Στον άξονα  $y$  αναπαρίσταται η πυκνότητα της πιθανότητας και στον άξονα  $x$  η ταχύτητα του ανέμου<sup>101</sup>.

---

<sup>100</sup> Green Rhino Energy Ltd. *Wind Characteristics*. 2013.

[http://www.greenrhinoenergy.com/renewable/wind/wind\\_characteristics.php](http://www.greenrhinoenergy.com/renewable/wind/wind_characteristics.php).

<sup>101</sup> Cowgill, Ryan T., Byron Haley, και Whitham Chris. *Wind Turbine Rotor Design-Final Design Report*. Boise State University, 2006.



Σχήμα 4.1: Τυπική κατανομή Weibull<sup>102</sup>.

Το γράφημα αυτό, με όρους στατιστικής, παρουσιάζει ουσιαστικά μια κατανομή πυκνότητας πιθανότητας. Το εμβαδό που θα προκύψει θα είναι πάντα ίσο με την μονάδα και το άθροισμα των πιθανοτήτων 100 %. Θα πρέπει να σημειωθεί πώς η εν λόγω κατανομή δεν παρουσιάζει συμμετρία.

Η κατανομή Weibull προκύπτει από την εξίσωση:

$$P(u) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{u}{c}\right)^k}$$

όπου οι παράμετροι κλίμακας  $c$  και σχήματος  $k$  υπολογίζονται (προσεγγιστικά) από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$c = \frac{2 \cdot \bar{u}}{\sqrt{\pi}}$$

$$k = \frac{\sqrt{\pi} \cdot 3 \cdot c^3}{2 \cdot \bar{u}^3}$$

#### 4.2.3 Το όριο του Betz

Σύμφωνα με το Γερμανό φυσικό Albert Betz, το όριο Betz είναι η θεωρητική μέγιστη απόδοση μιας ανεμογεννήτριας. Ο Betz κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η τιμή αυτή είναι 59,3 %, που σημαίνει ότι το πολύ το 59,3 % της κινητικής ενέργειας από τον άνεμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιστρέψει τον στρόβιλο και να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Στην πραγματικότητα, οι ανεμογεννήτριες δεν μπορούν να φθάσουν το όριο Betz και οι συνηθισμένες αποδόσεις είναι της τάξης του 35-45 %.

<sup>102</sup> [http://www.aiolikigi.gr/media/uploads/Figures/figure\\_36\\_-\\_gr.jpg](http://www.aiolikigi.gr/media/uploads/Figures/figure_36_-_gr.jpg).



Οι ανεμογεννήτριες επιβραδύνουν τον αέρα που διέρχεται από αυτές, ώστε να παράγουν ενέργεια. Εάν μια ανεμογεννήτρια ήταν 100 % αποτελεσματική, τότε ο άνεμος θα έπρεπε να σταματήσει εντελώς κατά την επαφή του με το στρόβιλο. Είναι λοιπόν σαφές ότι αυτό δεν είναι δυνατό, καθώς εάν συνέβαινε δε θα μπορούσε να περιστραφεί ο στρόβιλος<sup>103</sup>.

### 4.3 Αιολικό δυναμικό

Βασική προϋπόθεση για τη κατασκευή ενός αιολικού πάρκου είναι το υψηλό αιολικό δυναμικό για τη περιοχή της κατασκευής. Ωστόσο, ο υπολογισμός του αιολικού δυναμικού για μια συγκεκριμένη περιοχή δεν αποτελεί εύκολη υπόθεση, καθώς είναι βασισμένος σε διάφορα μαθηματικά μοντέλα τα οποία κρίνονται αποτελεσματικά μόνο για επίπεδα εδάφη.

Οι μετρήσεις που καταγράφονται προέρχονται από μετεωρολογικούς ιστούς, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι κοντά στην περιοχή της εγκατάστασης και σε σημεία όπου δεν παρεμποδίζονται οι άνεμοι. Οι ιστοί τοποθετούνται τουλάχιστον δέκα μέτρα υψηλότερα από το έδαφος και μακριά από οποιοδήποτε εμπόδιο ώστε να αποδίδουν αξιόπιστα. Σε περιπτώσεις όπου απαιτείται η μέγιστη δυνατή ακρίβεια, οι ιστοί στήνονται έως και 60 m από το έδαφος και σε διάφορα ύψη μεταξύ τους, για παράδειγμα ένας στα 10 m, ένας στα 20 m, ένας στα 30 m. Αυτό αποδίδει μεγαλύτερη ακρίβεια στις ενδείξεις ταχύτητας στο ύψος της ανεμογεννήτριας, οι οποίες συνήθως είναι πάνω από 50 m. Εφαρμόζοντας τις παραπάνω τακτικές, εξασφαλίζεται η ορθότητα στα δεδομένα από τις μετρήσεις.

Τα μέσα που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των μετρήσεων από έναν ιστό είναι το ανεμόμετρο και ο ανεμοδείκτης. Τα όργανα αυτά μάλιστα σε ορισμένες περιπτώσεις τοποθετούνται ταυτόχρονα σε έναν ιστό, έτσι ώστε αν υπάρξει βλάβη στο ένα να υπάρχουν οι μετρήσεις από το άλλο. Το ανεμόμετρο και ο ανεμοδείκτης συνδέονται σε ένα καταγραφικό στο οποίο αποστέλλονται και καταγράφονται οι μετρήσεις. Το καταγραφικό αυτό μπορεί να ρυθμίσει το διάστημα δειγματοληψίας των μετρήσεων, κάτι που είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την κατασκευή αιολικών πάρκων όπου οι μετρήσεις κατά το σχεδιασμό τους πρέπει να γίνονται ανά 1 δευτερόλεπτο και η ολοκλήρωση της μέτρησης κάθε 10 λεπτά. Έτσι προκύπτουν μέσες τιμές για το διάστημα των 10 λεπτών για ταχύτητα και διεύθυνση<sup>104</sup>.

#### 4.3.1 Μετρήσεις αιολικού δυναμικού

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι μετρήσεις αιολικού δυναμικού που πραγματοποιήθηκαν κατά το έτος 2015 στην περιοχή «Μαγούλα-Καζάκου» της Αισύμης του δήμου Αλεξανδρούπολης, με γεωγραφικό μήκος 25.9533158602 και πλάτος 41.0144024356. Οι μετρήσεις αυτές ελήφθησαν από 12 διαφορετικούς σταθμούς, ώστε το δείγμα να μας παρέχει μια ικανοποιητική εικόνα του αιολικού δυναμικού της περιοχής. Συνολικά έγιναν 144 μετρήσεις, 12 για κάθε μήνα, σε ύψος 30 m από το έδαφος.

---

<sup>103</sup> Cowgill, Ryan T., Byron Haley, και Whitham Chris. *Wind Turbine Rotor Design-Final Design Report*. Boise State University, 2006.

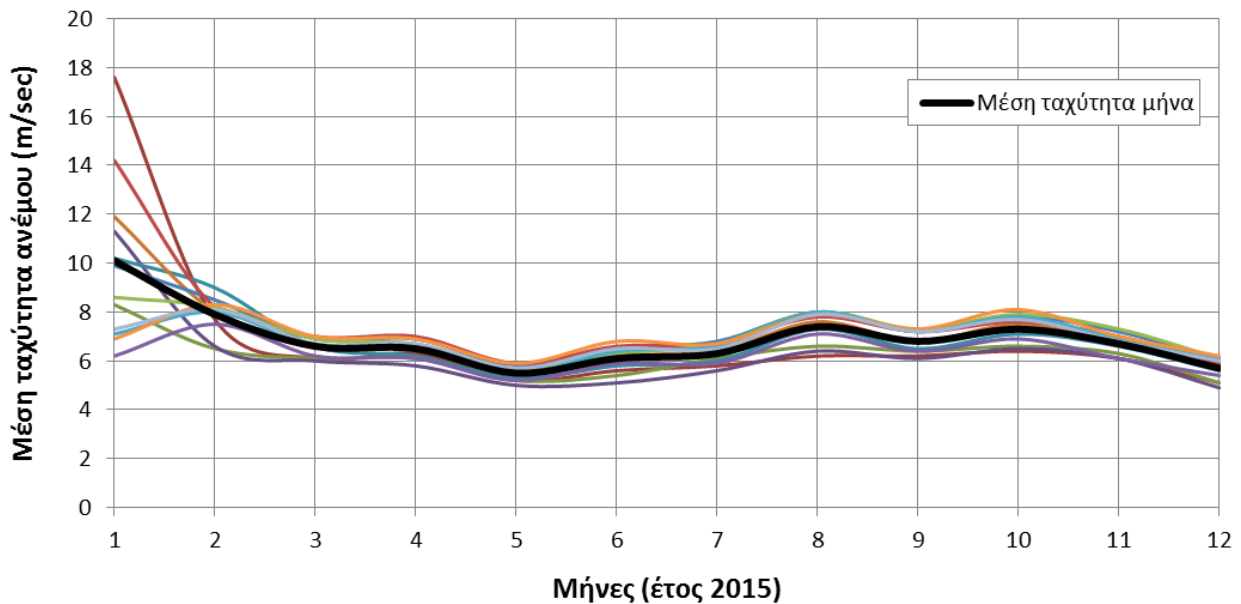
<sup>104</sup> Καπλάνης, Σωκράτης Ν. Ήπιες μορφές ενέργειας - Περιβάλλον & Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. ΙΩΝ, 2003.



**Πίνακας 4.1: Μετρήσεις αιολικού δυναμικού στη περιοχή της Αλεξανδρούπολης (2015).**

Μέση ταχύτητα ανέμου (m/sec)													
Μονάδα	Ιαν	Φεβ	Μαρ	Απρ	Μαϊ	Ιουν	Ιουλ	Αυγ	Σεπ	Οκτ	Νοε	Δεκ	Μ.Ο.
#01	17,6	7,7	6,1	6,3	5,2	5,6	5,8	6,2	6,2	6,4	6,1	5,1	7
#02	8,3	6,5	6,1	6,1	5,2	5,4	6,1	6,6	6,4	6,6	6,3	5,1	5,5
#03	11,3	6,6	6	5,8	5	5,1	5,6	6,4	6,1	6,5	6,1	4,9	6,2
#04	10,2	9	6,6	6,2	5,3	5,8	6	7,3	6,5	7,1	6,6	5,6	6,8
#05	11,9	8	6,6	6,6	5,5	6,2	6,4	7,6	6,8	7,5	6,7	5,8	7,1
#06	9,9	8,5	6,9	6,9	5,8	6,5	6,8	8	7,2	7,8	7,2	6	7,3
#07	14,2	8,2	7	7	5,9	6,6	6,7	7,8	7,2	7,6	7	5,9	7,6
#08	8,6	8,2	6,9	6,7	5,7	6,3	6,7	8	7,3	7,9	7,3	6,1	7,1
#09	6,2	7,5	6,2	6,1	5,2	5,9	5,9	7,1	6,4	6,9	6,1	5,4	6,2
#10	7,1	8	6,6	6,5	5,5	6,4	6,6	8	7,2	7,8	6,9	6,1	6,9
#11	6,9	8,3	7	6,9	5,9	6,8	6,7	7,9	7,3	8,1	7	6,2	7
#12	7,3	8,1	6,7	6,7	5,7	6,5	6,5	7,9	7,2	7,7	6,8	6	6,9
<b>Μ.Ο.</b>	<b>10,1</b>	<b>7,9</b>	<b>6,6</b>	<b>6,5</b>	<b>5,5</b>	<b>6,1</b>	<b>6,3</b>	<b>7,4</b>	<b>6,8</b>	<b>7,3</b>	<b>6,7</b>	<b>5,7</b>	<b>6,9</b>

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται διαγραμματικά οι ταχύτητες ανέμου ανά μήνα, όπως καταγράφηκαν από τους 12 καταγραφικούς σταθμούς. Η μαύρη συμπαγής γραμμή συμβολίζει τη μέση ταχύτητα του μήνα και προστίθεται στο διάγραμμα ώστε να είναι εμφανής η τάξη μεγέθους της διασποράς των μετρήσεων για κάθε μήνα από τους διάφορους σταθμούς. Παρατηρούμε πώς οι μετρήσεις εμφανίζουν αυξημένη διασπορά κατά τους μήνες Ιανουάριο-Φεβρουάριο-Μάρτιο (Μήνες 1, 2 και 3 στο διάγραμμα), ενώ για τους υπόλοιπους η διασπορά διατηρείται σχεδόν σταθερή σε μικρές τιμές.

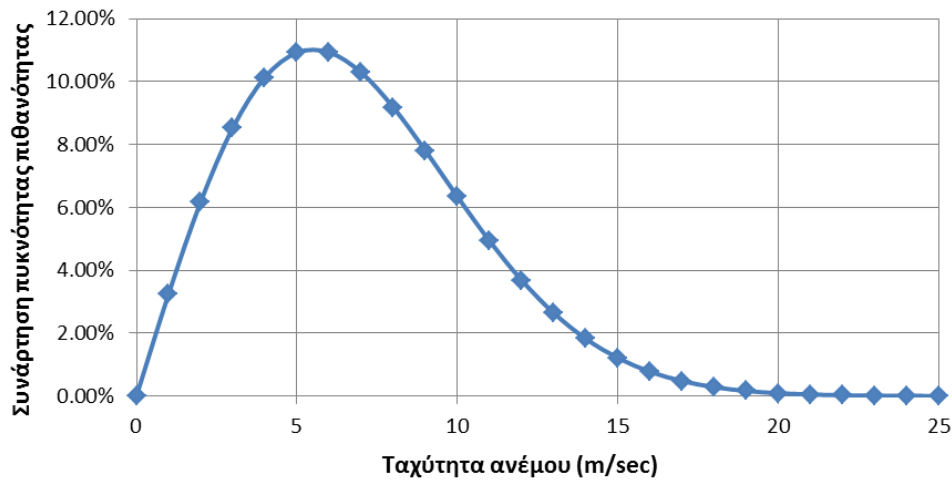


Σχήμα 4.2: Ταχύτητες ανέμου ανά μήνα.

Για κάθε σταθμό παρουσιάζεται στον παραπάνω πίνακα ο μέσος όρος της ταχύτητας του ανέμου για τους 12 μήνες του έτους, ενώ υπολογίζεται και ο μέσος όρος για κάθε μήνα από όλους τους καταγραφικούς σταθμούς, από τους οποίους προκύπτει η μέση ταχύτητα του ανέμου (κάτω και δεξιά στον εν λόγω πίνακα). Έχοντας υπολογίσει τη μέση ταχύτητα  $\bar{u} = 6.9$  m/s, υπολογίζεται ο συντελεστής της κατανομής Weibull:

$$c = \frac{2 \cdot \bar{u}}{\sqrt{\pi}} = \frac{2 \cdot 6.9}{\sqrt{\pi}} \Rightarrow c = 7.786 .$$

Ο συντελεστής “k” της κατανομής λαμβάνεται ίσος 2,0, τιμή που ενδείκνυται για το Αιγαίο. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η πιθανότητα εμφάνισης διαφόρων ταχυτήτων ανέμου έως και 25 m/sec για την περιοχή εγκατάστασης, για την οποία γίνεται η παραδοχή πώς ακολουθεί την κατανομή Weibull, με βάση τα παραπάνω. Αξίζει να σημειωθεί πώς για τιμή  $k = 2,0$  η κατανομή Weibull μετασχηματίζεται στην κατανομή Rayleigh. Θα πρέπει να αναφερθεί πώς η κατανομή που παρουσιάζεται παρακάτω αφορά το ύψος στο οποίο πραγματοποιήθηκε η καταγραφή του ανέμου, το οποίο είναι ίσο με 30.0 m από το έδαφος.

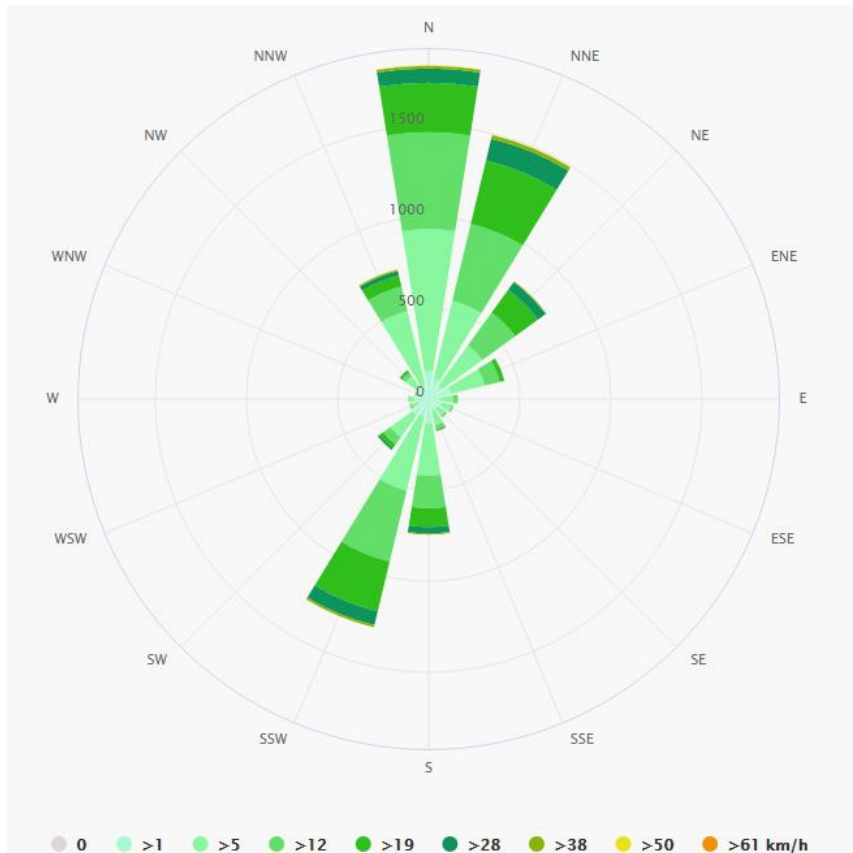


Σχήμα 4.3: Πιθανότητες εμφάνισης ταχυτήτων ανέμου για την περιοχή μελέτης και ύψος 30 m.

#### 4.3.2 Εύρεση της κύριας διεύθυνσης του ανέμου

Αφού προσδιορίστηκε η τάξη μεγέθους των ταχυτήτων των ανέμων που πνέουν στην περιοχή, η μέση τιμή τους όπως και η κατανομή τους, συνέχεια έχει ο προσδιορισμός της κύριας φοράς των ανέμων. Το ροδόγραμμα της Αλεξανδρούπολης παρακάτω, δείχνει πόσες ώρες ετησίως ο άνεμος φυσάει από την υποδεικνυόμενη κατεύθυνση. Παράδειγμα ΝΔ: άνεμος φυσά από Νοτιοδυτικά (ΝΔ) προς Βορειοανατολικά (ΝΕ). Παρατηρώντας το διάγραμμα γίνεται φανερό πώς τις περισσότερες ώρες ετησίως ο άνεμος στην περιοχή μελέτης πνέει από Βόρεια προς Νότια (Β), ενώ σε δευτερεύον βαθμό ακολουθούν άνεμοι που πνέουν από Νοτιοδυτικά προς Βορειοανατολικά (ΝΔ) και από Βορειοανατολικά προς Νοτιοδυτικά (ΒΔ). Η τάξη μεγέθους της ταχύτητας των ανέμων αυτή εμπεριέχεται στο ροδόγραμμα, και βλέπουμε πώς κυμαίνεται από ταχύτητες μεγαλύτερες του 1 km/h έως και ταχύτητες > 38 km/h, αλλά μικρότερες των 50 km/h. Οι τελευταίες εμφανίζονται σε σημαντικά μικρότερο βαθμό. Με μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης πνέουν άνεμοι ταχυτήτων εντός του διαστήματος: 5 km/h έως και 38 km/h.





Σχήμα 4.4: Ροδόγραμμα Αλεξανδρούπολης (έτος 2015<sup>105</sup>).

#### 4.4 Κριτήρια επιλογής και μελέτης αιολικού πάρκου

Κατά το σχεδιασμό και τη κατασκευή ενός αιολικού πάρκου υπάρχουν τέσσερις φάσεις εργασίας:

- η μελέτη της σκοπιμότητας και η εκκίνηση του έργου. Η φάση αυτή διαρκεί από 18 έως 40 μήνες
- η προκατασκευαστική περίοδος, η οποία διαρκεί 12 με 18 μήνες
- η κατασκευαστική περίοδος, η οποία έχει διάρκεια 12 με 24 μήνες
- και η λειτουργία και η συντήρηση του πάρκου μετά την ολοκλήρωση του έργου

Στο πρώτο στάδιο της προετοιμασίας του αιολικού πάρκου, πραγματοποιείται η επιλογή της τοποθεσίας και του οικοπέδου στο οποίο θα γίνει η εγκατάσταση. Στη συνέχεια γίνεται η ανάπτυξη, μια διαδικασία που διαρκεί ένα με δύο έτη και κατά την οποία πραγματοποιούνται μετρήσεις του ανέμου, επιλογές χωροθέτησης και τέλος καθορίζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του έργου. Μετά την ανάπτυξη ακολουθεί η διαδικασία υποβολής αίτησης για την αδειοδότηση, διαδικασία που ολοκληρώνεται σε διάστημα 12 έως 18 μηνών. Σε περίπτωση που εγκριθεί η εγκατάσταση, χορηγείται η άδεια και βγαίνει ο προϋπολογισμός για το έργο (επιλογή υλικών και προσωπικού, διαπραγματεύσεις συμβολαίου κατασκευής). Τελικά προκύπτει το στάδιο της κατασκευής και

<sup>105</sup>meteoblue. weather close to you. 2017.

[https://www.meteoblue.com/en/weather/archive/windrose/alexandroupoli\\_greece\\_736928](https://www.meteoblue.com/en/weather/archive/windrose/alexandroupoli_greece_736928).



ο έλεγχος ότι οι εγκατάσταση πληροί τις απαραίτητες προδιαγραφές ενός αιολικού πάρκου. Η διαδικασία αυτή μπορεί να διαρκέσει από ένα έως και δυο έτη.

#### 4.4.1 Τα κριτήρια επιλογής περιοχής μελέτης αιολικού πάρκου

Για την επιλογή μιας συγκεκριμένης περιοχής για την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου υπάρχουν ορισμένες προδιαγραφές οι οποίες πρέπει να πληρούνται:

- η εξασφάλιση του κατάλληλου οικοπέδου το οποίο θα είναι ανάλογο με την επιθυμητή ονομαστική ισχύς του πάρκου και των μοντέλων των ανεμογεννητριών που θα χρησιμοποιηθούν
- η μορφολογία της περιοχής που πρόκειται να πραγματοποιηθεί η εγκατάσταση (προσβασιμότητα, ήπιες κλίσεις)
- η περιοχή να επιλεγεί σύμφωνα με το χωροταξικό Α.Π.Ε. (περιοχές NATURA, οπτική, ακουστική όχληση)
- να υπάρχει υψηλό αιολικό δυναμικό στη περιοχή<sup>106</sup>

#### 4.4.2 Πρόσβαση περιοχής

Ένα ακόμη σημαντικό κριτήριο το οποίο πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη μελέτη ενός αιολικού πάρκου, είναι η προσβασιμότητα στη περιοχή της εγκατάστασης. Συνεπώς θα πρέπει να εξεταστούν τα παρακάτω:

- οδικό δίκτυο
- λιμενικές εγκαταστάσεις
- υφιστάμενο δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι τρεις αυτοί παράγοντες είναι πολύ βασικοί ώστε να είναι οικονομικά βιώσιμη η μελέτη του αιολικού πάρκου.

#### 4.4.3 Κριτήριο επιλογής ανεμογεννήτριας

Τα κριτήρια που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ώστε να γίνει η επιλογή των κατάλληλων ανεμογεννητριών σε ένα αιολικό πάρκο, είναι τα παρακάτω:

- η καμπύλη ισχύος
- οι διαστάσεις της ανεμογεννήτριας, συναρτήσει με το χώρο εγκατάστασης και την επιθυμητή ισχύ του αιολικού πάρκου
- οι περιορισμοί περιβαλλοντικής και χωροταξικής φύσεως
- τα θέματα τεχνικής και κατασκευαστικής φύσεως, όπως είναι για παράδειγμα η μεταφορά των ανεμογεννητριών.
- οι συναλλαγές με τον προμηθευτή των ανεμογεννητριών, για την οικονομικότερη δυνατή λύση<sup>107</sup>

---

<sup>106</sup> Μπιτζιώνης, Βασίλειος Δ., και Δημήτριος Β. Μπιτζιώνης. Εναλλακτικές μορφές ενέργειας. Τζιόλας, 2010.

<sup>107</sup> Μπιτζιώνης, Βασίλειος Δ., και Δημήτριος Β. Μπιτζιώνης. Εναλλακτικές μορφές ενέργειας. Τζιόλας, 2010.

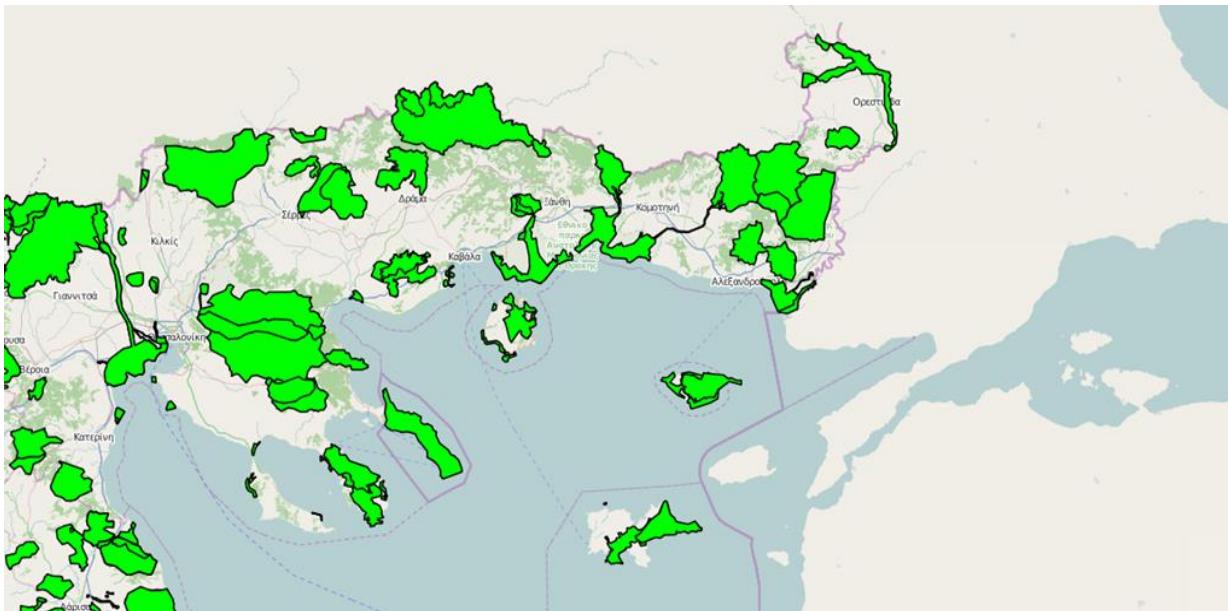


#### 4.4.4 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Στον παρακάτω χάρτη Natura 2000, παρουσιάζονται οι διάφορες περιοχές όπου φιλοξενούνται οικοτόποι σημαντικοί σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Στον Έβρο γενικότερα καταγράφονται σπάνια και ευαίσθητα είδη βιοτόπων και η ανάπτυξη αιολικών πάρκων που αποτελεί μια μορφή βιομηχανικής ανάπτυξης, μπορεί να προκαλέσει την υποβάθμιση ή ακόμη και την εξαφάνιση των βιοτόπων αυτών.

Στη περιοχή της μελέτης υπάρχει ο βιότοπος του Δέλτα του Έβρου και κατά συνέπεια θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά τη μελέτη ώστε να αποφευχθούν ενδεχόμενα προβλήματα για το βιότοπο.

Πιθανό πρόβλημα όπως προαναφέρθηκε είναι ο τραυματισμός των πτηνών που διέρχονται ανάμεσα από της ανεμογεννήτριες. Επιπλέον υπάρχουν περιπτώσεις όπου μεταβάλλεται η ροή του νερού με αποτέλεσμα την μεταβολή και των υλικών και των ιδιοτήτων των ιζημάτων ως αποτέλεσμα της αντίστασης από τους πυλώνες της εγκατάστασης. Αυτό μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στη μορφολογία των γειτονικών ακτών και κατά συνέπεια θα πρέπει να γίνει λεπτομερής μελέτη της τοπικής υδρογραφίας των θαλάσσιων ρευμάτων πριν την έναρξη της κατασκευής.



Σχήμα 4.5: Χάρτης Natura 2000, Μακεδονία και Θράκη.

#### 4.4.5 Επιλογή οικοπέδου για την πραγματοποίηση της μελέτης του αιολικού πάρκου

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό σύμφωνα με τα παραπάνω, η βασική προϋπόθεση για την επιλογή της θέσης κατασκευής ενός αιολικού πάρκου είναι στη τοποθεσία της εγκατάστασης να υπάρχει υψηλό αιολικό δυναμικό. Ωστόσο, για να διαπιστωθεί εάν στην εκάστοτε περιοχή υπάρχει υψηλό αιολικό δυναμικό, είναι απαραίτητη η εγκατάσταση ενός μετεωρολογικού σταθμού (ιστού), ο οποίος θα κρατά καταγραφές των δεδομένων για τουλάχιστον ένα χρόνο. Επιπροσθέτως, το αιολικό δυναμικό από μόνο του δεν αρκεί και θα πρέπει και η ποιότητα του αέρα να είναι καλή με στρωτή ροή και χωρίς μεγάλη τύρβη. Στις εγκαταστάσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων οι προϋποθέσεις αυτές καλύπτονται καθώς ο αέρας που προέρχεται από την θάλασσα ή την επιφάνεια της πληροί τις παραπάνω προδιαγραφές.

Στη γεωγραφική έκταση που επιλέχθηκε η μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου όπως παρουσιάζεται και παρακάτω είναι στα 6,9 m/s. Σύμφωνα το νέο χωροταξικό πλαίσιο, οι ανεμογεννήτριες μπορούν να τοποθετηθούν σε περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό, αλλά είναι απαγορευμένες οι περιοχές με περιβαλλοντικούς



περιορισμούς, καθώς και οι περιοχές πολιτισμικής και κοινωνικής φύσεως. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώνονται οι επιπτώσεις από ένα αιολικό πάρκο σε ένα φυσικό και ένα ανθρωπογενές περιβάλλον, αλλά και να γίνεται ευκολότερες οι διαδικασίες στην αδειοδότηση του πάρκου, χωρίς περαιτέρω εμπλοκές.

#### 4.4.6 Παραγόμενη ισχύς ανεμογεννήτριας

Η παραγόμενη ισχύς των ανεμογεννητριών μεταβάλλεται συνεχώς, καθώς η ένταση του ανέμου μεταβάλλεται. Ωστόσο η παραγόμενη ισχύς μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από ορισμένους ακόμη παράγοντες:

- Την κατανομή Weibull (κατανομή πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου), για το σημείο στο οποίο είναι εγκατεστημένη η ανεμογεννήτρια. η ανεμογεννήτρια.
- Την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας, με την οποία εκφράζεται η αναμενόμενη παραγόμενη ισχύς για τις διάφορες ταχύτητες ανέμου.
- Τις ώρες λειτουργίας του πάρκου, οι οποίες καθορίζονται από τις συντηρήσεις σε αυτό και τις ενδεχόμενες διακοπές στη λειτουργία των ανεμογεννητριών.
- Το φαινόμενο τις σκίασης από τις απώλειες που προκαλεί αυτό σε κάθε ανεμογεννήτρια και οι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτουν σε ένα αιολικό πάρκο από τις συνδέσεις με το δίκτυο της Δ.Ε.Η<sup>108</sup>.

### 4.5 Προτεινόμενη εγκατάσταση

#### 4.5.1 Επιλογή του οικοπέδου εγκατάστασης

Στην ενότητα αυτή επιλέγεται το θαλάσσιο οικόπεδο στο οποίο θα κατασκευαστεί το υπεράκτιο αιολικό πάρκο. Η μέση απόσταση του οικοπέδου από την ακτή επιλέγεται περί τα 13 km, ώστε να μην υπάρχει αλληλεπίδραση του αιολικού πάρκου με το Εθνικό Υγροτοπικό Πάρκο Δέλτα Έβρου και τις λοιπές εγγύς ζώνες Natura. Η γεωμετρία του εν λόγω θαλάσσιου οικοπέδου επιλέγεται ορθογωνική, με διαστάσεις περί τα 8000 m × 3000 m. Για την ορθή χωροθέτηση των ανεμογεννητριών εξετάζεται το ροδόγραμμα ανέμου της περιοχής εγκατάστασης, ώστε να βρεθεί η επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου και η διάρκεια πνοής του από τις διάφορες κατευθύνσεις. Έτσι, ο προσανατολισμός του οικοπέδου επιλέγεται βάσει του ροδογράμματος πνοής των ανέμων της περιοχής, ώστε η μεγάλη του πλευρά να βρίσκεται κάθετα στην κύρια διεύθυνση του ανέμου, η οποία προσδιορίστηκε Νότια/Βόρεια (N/B) προς Βόρειο-Βόρειο-Ανατολική/Νότιο-Νότιο-Δυτική (BBA/NNΔ). Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η χωροθέτηση του οικοπέδου με βάση τις παραπάνω προδιαγραφές.

---

<sup>108</sup> Αμανατίδης, Ελευθέριος. *Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας*. Πάτρα, 2014.



Σχήμα 4.6: Χωροθέτηση οικοπέδου.

#### 4.5.2 Προτεινόμενες ανεμογεννήτριες

Η επιλογή μιας ανεμογεννήτριας για τη χρησιμοποίησή της σε ένα αιολικό πάρκο βασίζεται κυρίως στη μέση ταχύτητα του ανέμου για την εκάστοτε περιοχή, σε συνδυασμό με την καμπύλη ισχύος της μηχανής. Με βάση την προηγούμενη ενότητα στη περιοχή της Αλεξανδρούπολης όπου πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις, η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι γύρω στα 6,9 m/sec με διακυμάνσεις από 5,5 μέχρι 10,1 από μήνα σε μήνα<sup>109</sup>.

Οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε σύγχρονες και ασύγχρονες και οι τεχνολογίες αυτές αξιοποιούνται ανάλογα τη περιοχή και τις απαιτήσεις της. Για μια περιοχή με μέση ταχύτητα ανέμου περί τα 7 m/sec όπως αυτή της εργασίας συνιστώνται ανεμογεννήτριες 2 έως 3MW. Για μεγαλύτερη ισχύ απαιτείται μια μέση ταχύτητα ανέμου στα 10 με 11 m/sec. Επιπλέον για τις υπεράκτιες εγκαταστάσεις όπου οι άνεμοι είναι ιδιαίτερα ισχυροί, χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο σύγχρονες ανεμογεννήτριες μόνιμου μαγνήτη. Οι ανεμογεννήτριες αυτές προσφέρουν συνεχή λειτουργία χωρίς διακοπές για μεγάλα χρονικά διαστήματα αποδίδοντας μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Το μειονέκτημα τους είναι το υψηλό τους κόστος και για το λόγο αυτό προτιμώνται σε περιοχές με αρκετά υψηλές ταχύτητες ανέμου.

Για την περιοχή της μελέτης το κόστος της εγκατάστασης αλλά και το κέρδος από αυτή θα είναι πιο αποδοτικά με τη χρησιμοποίηση ανεμογεννητριών των 2 MW το πολύ. Το μοντέλο της ασύγχρονης ανεμογεννήτριας με διπλή τροφοδοσία παρουσιάζεται το πιο ελκυστικό για την εγκατάσταση καθώς είναι οικονομικότερη η αγορά τους συγκριτικά με αυτή των σύγχρονων, αλλά μπορούν να αποδώσουν εξίσου καλά υπό αυτές τις συνθήκες. Επιπλέον με την επιλογή αυτού του τύπου ανεμογεννήτριας και σε συνδυασμό με μεγάλα πτερύγια μπορούν να προσφέρουν ακόμη μεγαλύτερη απόδοση σε μικρομεσαίες ταχύτητες.

Επομένως με βάση τα παραπάνω, προκύπτει το συμπέρασμα πως θα πρέπει να βρεθεί ένα μοντέλο ανεμογεννήτριας ασύγχρονης τεχνολογίας με διπλή τροφοδοσία σε συνδυασμό με μεγάλη επιφάνεια σάρωσης.

<sup>109</sup> Houlby, G. T., και B. W. Byrne. Foundations for offshore wind turbines. The Royal Society, 2003.

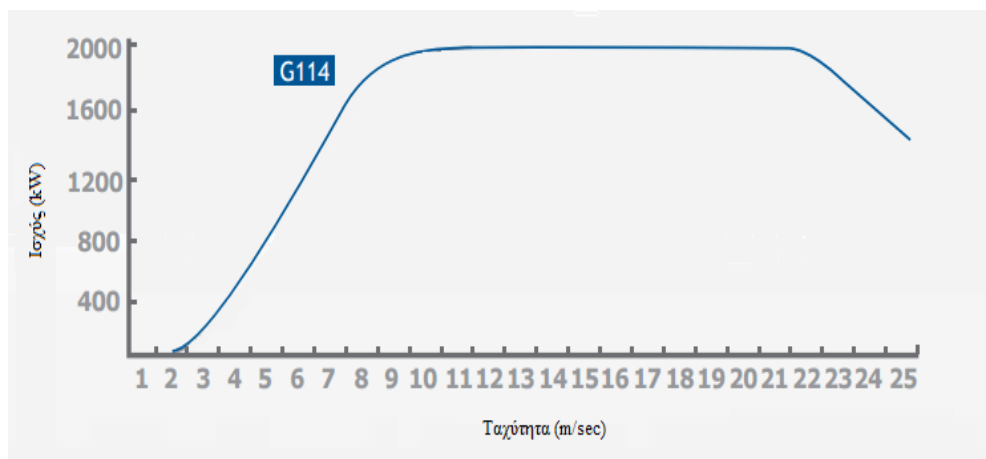




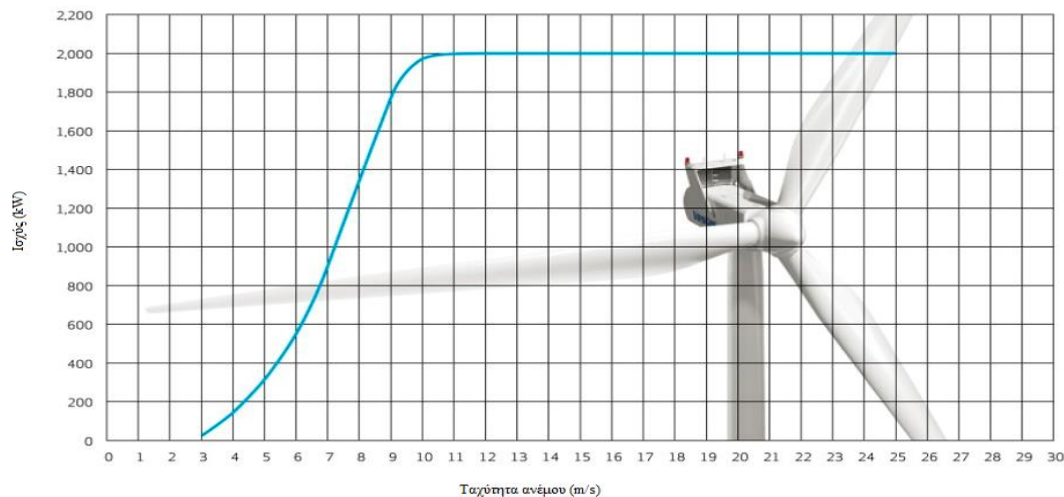
Δυο ανεμογεννήτριες στα 2.0 MW που βρέθηκαν και πληρούν τις προϋποθέσεις είναι οι παρακάτω:

- Gamesa G114
- Vestas V110

Για τις δύο αυτές ανεμογεννήτριες θα πραγματοποιηθούν όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί, με στόχο την εύρεση της τεχνικά βέλτιστης και οικονομικότερης λύσης, η οποία θα προκύψει από σύγκριση των δύο. Ακολουθούν οι καμπύλες ισχύος των ανεμογεννητριών και στο Παράρτημα Α αναλυτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους<sup>110</sup>.



Σχήμα 4.7: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας Gamesa G114<sup>111</sup>.



Σχήμα 4.8: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας Vestas V110<sup>112</sup>.

<sup>110</sup> Houlby, G. T., και B. W. Byrne. Foundations for offshore wind turbines. The Royal Society, 2003.

<sup>111</sup> <http://www.gamesacorp.com/recursos/noticias/2012-marzo-g114-20-mw-data-sheet-en.pdf>

<sup>112</sup> [http://3.bp.blogspot.com/-fM8K46quees/UvFCpZy0KPI/AAAAAAAAAwk/hM7twpPEQYM/s1600/2-mw-platform-398723\\_9b.jpg](http://3.bp.blogspot.com/-fM8K46quees/UvFCpZy0KPI/AAAAAAAAAwk/hM7twpPEQYM/s1600/2-mw-platform-398723_9b.jpg)



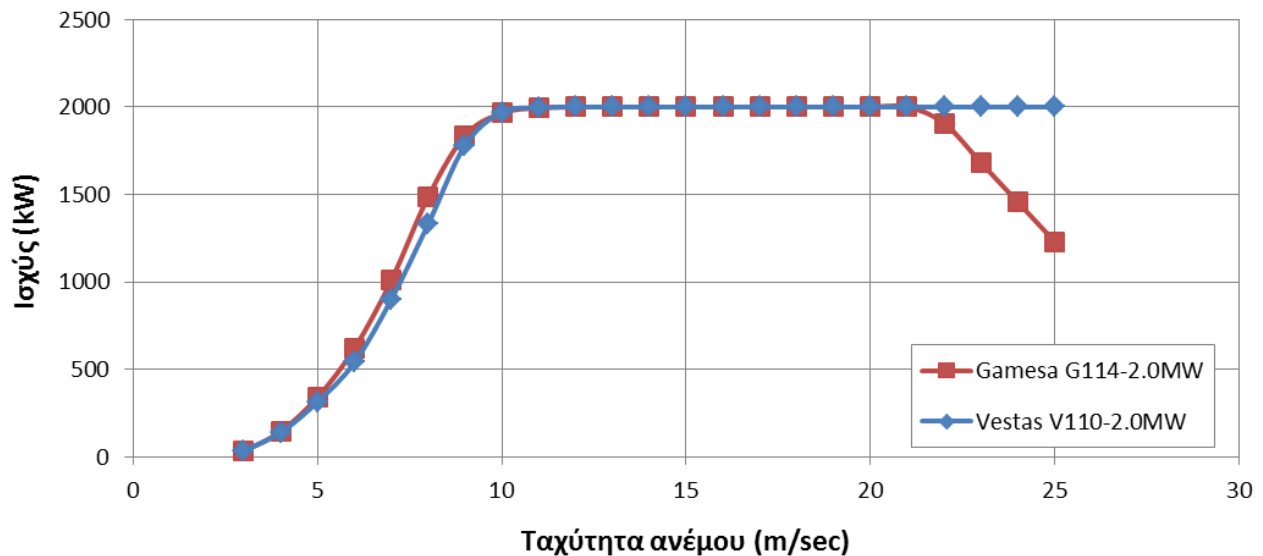


Από τις καμπύλες ισχύος παρατηρούμε πώς και οι δύο ανεμογεννήτριες έχουν την ίδια ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (cut-in speed) 3 m/sec και την ίδια ταχύτητα αποκοπής (cut-out speed) 25 m/sec. Ο ορισμός της ταχύτητας έναρξης λειτουργίας αποσκοπεί στην οικονομική λειτουργία της αιολικής μηχανής, ώστε να μη λειτουργεί στις περιπτώσεις που πνέουν άνεμοι μικρών εντάσεων. Από την άλλη, η ταχύτητα αποκοπής αποσκοπεί στην προστασία της μηχανής στις περιπτώσεις πολύ ισχυρών ανέμων που μπορεί να αποβούν καταστρεπτικοί για τις εγκαταστάσεις.

Οι δύο καμπύλες ισχύος δίδονται παρακάτω σε μορφή πίνακα. Στο σχήμα που ακολουθεί βλέπουμε τις καμπύλες ισχύος για τις δύο μηχανές μαζί, απ' όπου γίνεται εφικτή η σύγκρισή τους. Παρατηρούμε πώς η Gamesa G114 έχει ελαφρώς καλύτερη απόδοση για μικρές ταχύτητες ανέμου (< 10 m/sec), αλλά εμφανίζει πτώση στην παραγόμενη ισχύ για ταχύτητες μεγαλύτερες από 21 m/sec. Από την άλλη, η Vestas V110 ενώ υστερεί για μικρές ταχύτητες, φτάνει στο πλατό της μέγιστης απόδοσης για ίδιες τιμές ανέμου που το φτάνει και η Gamesa G114, ενώ δεν εμφανίζει πτώση στην απόδοση ισχύος για μεγάλες ταχύτητες.

**Πίνακας 4.2: Καμπύλες ισχύος για τις προτεινόμενες ανεμογεννήτριες.**

Gamesa G114-2.0MW		Vestas V110-2.0MW	
Ταχύτητα ανέμου (m/sec)	Ισχύς (kW)	Ταχύτητα ανέμου (m/sec)	Ισχύς (kW)
3	32	3	35
4	146	4	140
5	342	5	315
6	621	6	540
7	1008	7	900
8	1486	8	1330
9	1836	9	1780
10	1965	10	1970
11	1994	11	1995
12	1999	12	1999
13	2000	13	1999
14	2000	14	2000
15	2000	15	2000
16	2000	16	2000
17	2000	17	2000
18	2000	18	2000
19	2000	19	2000
20	2000	20	2000
21	2000	21	2000
22	1906	22	2000
23	1681	23	2000
24	1455	24	2000
25	1230	25	2000

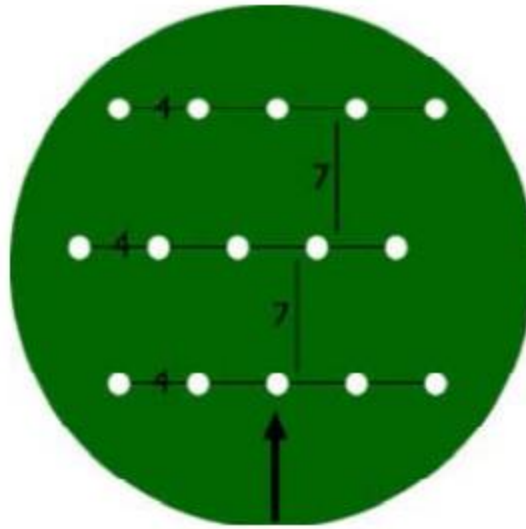


Σχήμα 4.9: Καμπύλες ισχύος για τις προτεινόμενες ανεμογεννήτριες.

#### 4.5.3 Διάταξη ανεμογεννητριών

Η βέλτιστη χωροθέτηση ενός αιολικού πάρκου προϋποθέτει πως οι ανεμογεννήτριες θα έχουν τη δυνατότητα εκμετάλλευσης του πλήρους αιολικού δυναμικού της περιοχής εγκατάστασης, χωρίς μειώσεις λόγω εγγύτητας εμποδίων ή/και άλλων μηχανών. Έτσι, η ελάχιστη ελεύθερη απόσταση που θα προβλεφθεί ανάμεσα στις ανεμογεννήτριες θα είναι ίση με τουλάχιστον τέσσερις φορές τη διάμετρο του ρότορα των ανεμογεννητριών. Συγκεκριμένα, τα διαστήματα εντός μιας συστοιχίας δε θα πρέπει να είναι μικρότερα από 2 με 4 διαμέτρους σάρωσης και ο κενός μεταξύ των συστοιχιών δε θα πρέπει να είναι μικρότερος από 7-10 διαμέτρους σάρωσης<sup>113</sup>. Υπενθυμίζεται πως διάμετρος σάρωσης είναι η διάμετρος του ρότορα (δρομέα) της ανεμογεννήτριας.

<sup>113</sup> Houslyby, G. T., και B. W. Byrne. Foundations for offshore wind turbines. The Royal Society, 2003.



Σχήμα 4.10: Τυπική χωροθέτηση ανεμογεννητριών.

Τυπικά, επιλέγεται μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών που ανήκουν σε διαφορετική συστοιχία (παράλληλα προς την κατεύθυνση του κύριου ανέμου) και μικρότερη μεταξύ των στηλών (κάθετα προς τη διεύθυνση του κύριου ανέμου). Η επιλογή της απόστασης αυτής έχει εξαιρετική σημασία όσον αφορά τη συνολική παραγωγή ενέργειας και επηρεάζει ενεργά την ενεργειακή έξοδο της διάταξης. Εάν οι ανεμογεννήτριες διαταχθούν σε πολύ μικρές αποστάσεις, κάποιες από αυτές θα έρχονται σε επαφή με σημαντικά μικρότερες ταχύτητες ανέμου, οι οποίες οφείλονται στην πρόσκρουση του ανέμου στις όμορες ανεμογεννήτριες, η οποία οδηγεί σε μείωση της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Στο άλλο άκρο, εάν η διάταξη των ανεμογεννητριών πραγματοποιηθεί σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, ο αριθμός τους θα είναι πολύ μικρός για ένα οικοπέδο δεδομένων διαστάσεων, οδηγώντας σε μικρή συνολική αποδοτικότητα της διάταξης. Στη συγκεκριμένη μελέτη η απόσταση των ανεμογεννητριών εντός μιας συστοιχίας επιλέγεται περί τα 5D και μεταξύ των συστοιχιών περί τα 10D, ώστε να αποφευχθούν κατά το δυνατό οι απώλειες.

Για την ανεμογεννήτρια Gamesa G114 η διάμετρος σάρωσης είναι ίση με 114 m και για την ανεμογεννήτρια Vestas V110 είναι ίση με 110 m. Ο υπολογισμός του αριθμού των συστοιχιών (γραμμών) της διάταξης προκύπτει από το ακέραιο μέρος του πηλίκου της μικρής διάστασης του οικοπέδου προς τη διάσταση 5D συν ένα. Συνεπώς, είναι:

$$\text{Αριθμός συστοιχιών} = \text{Ακέραιο μέρος} \{3000 / (5 \cdot 114) + 1\} = 6 \text{ για τη Gamesa G114 και}$$

$$\text{Αριθμός συστοιχιών} = \text{Ακέραιο μέρος} \{3000 / (5 \cdot 110) + 1\} = 6 \text{ για τη Vestas V110.}$$

Δεδομένης της μικρής διαφοράς στις διαμέτρους του ρότορα κάθε ανεμογεννήτριας, προκύπτει και για τις δύο ο ίδιος αριθμός συστοιχιών. Αντίστοιχα υπολογίζεται ο αριθμός των στηλών, ως το ακέραιο μέρος του πηλίκου της μεγάλης διάστασης του οικοπέδου προς τη διάσταση 10D συν ένα:

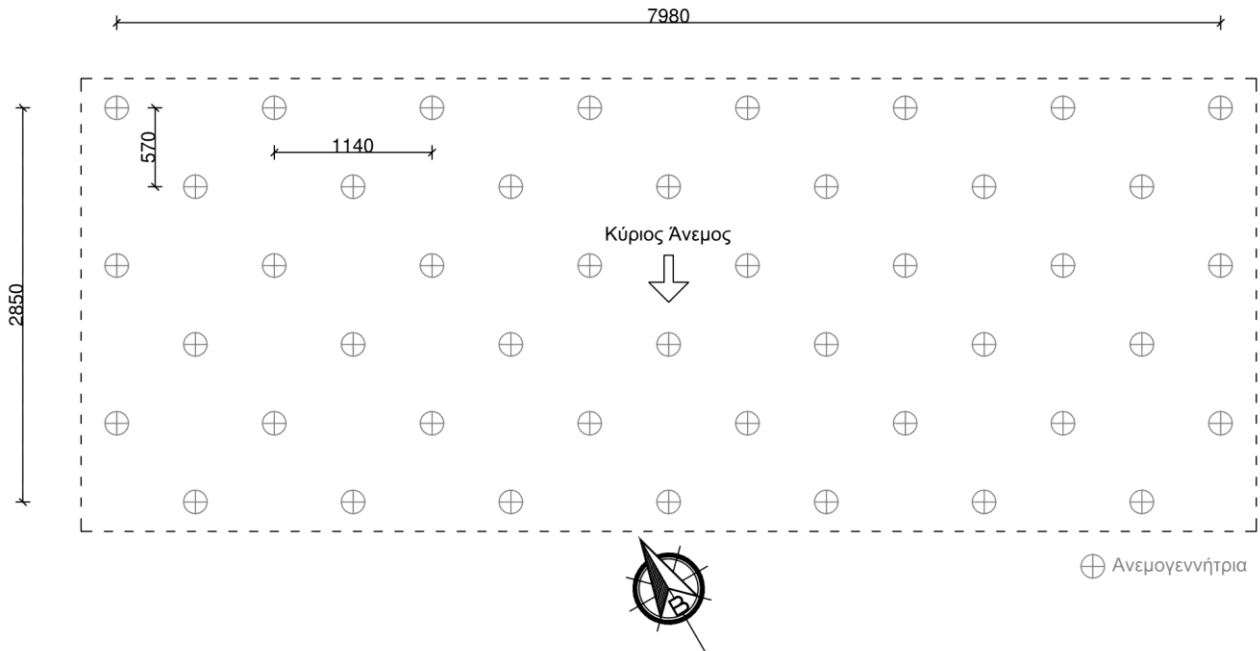
$$\text{Αριθμός στηλών} = \text{Ακέραιο μέρος} \{8000 / (10 \cdot 114) + 1\} = 8 \text{ για τη Gamesa G114}$$

$$\text{Αριθμός στηλών} = \text{Ακέραιο μέρος} \{8000 / (10 \cdot 110) + 1\} = 8 \text{ για τη Vestas V110.}$$

Έτσι, ανεξαρτήτως της μηχανής που θα επιλεγεί τελικώς ως η προτεινόμενη, σχεδιάζεται μια ενιαία χωροθέτηση με 6 συστοιχίες και 8 στήλες. Στο Σχήμα 4.11 παρουσιάζεται η προτεινόμενη διάταξη που αποτελείται από  $3 \times 7 + 3 \times 8 = 45$  ανεμογεννήτριες σε σχήμα ορθογωνίου παραλληλογράμμου, στην οποία



φαίνονται οι αποστάσεις μεταξύ των συστοιχιών ( $570 \text{ m} = 5 \cdot 114 \text{ m} \approx 5D$ ), όπως και οι αποστάσεις μεταξύ των στηλών ( $1140 \text{ m} = 10 \cdot 114 \text{ m} \approx 10D$ ). Ακόμα, στο κάτω μέρος του σκαριφήματος φαίνεται ο προσανατολισμός του επιπέδου σε σχέση με το Βορρά, σε συμφωνία και με το Σχήμα 4.6.



Σχήμα 4.11: Προτεινόμενη χωροθέτηση.

Συνεπώς το εμβαδό του θαλάσσιου οικοπέδου θα είναι ίσο με:  $7980 \text{ m} \cdot 2850 \text{ m} = 22.743.000 \text{ m}^2$ . Συμπεριλαμβάνοντας και το χώρο που απαιτείται για τα λοιπά έργα των εγκαταστάσεων, ο συνολικός χώρος προσεγγίζεται περί τα 22.750 στρέμματα<sup>114</sup>. Η εν λόγω διάταξη προτιμάται μιας αντίστοιχης, όπου οι ανεμογεννήτριες θα βρίσκονταν σε ένα κάρναβο η μια συστοιχία παράλληλα πίσω από την άλλη, ώστε να επιτευχθεί μέγιστη αποδοτικότητα μέσω ελαχιστοποίησης τυχόν απωλειών λόγω εγγύτητας.

#### 4.5.4 Συνολική παραγωγή ενέργειας του αιολικού πάρκου

Στην ενότητα αυτή θα πραγματοποιηθούν ενεργειακοί υπολογισμοί για τις δύο προτεινόμενες ανεμογεννήτριες. Οι δύο προτεινόμενες ανεμογεννήτριες έχουν την ίδια ονομαστική ισχύ (2 MW). Συνεπώς, ανεξαρτήτως του ποιά μηχανή τελικώς θα επιλεγεί, η εγκατεστημένη ισχύς του πάρκου είναι ίση με:  $2 \text{ MW} \cdot 45 \text{ ανεμογεννήτριες} = 90 \text{ MW}$ . Ενώ η ονομαστική τους ισχύς είναι η ίδια, όπως είδαμε στην ενότητα 4.5.2 η καμπύλη ισχύος κάθε μηχανής είναι διαφορετική. Έτσι, θα υπολογισθεί για κάθε μηχανή η συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας, ώστε να ευρεθεί η ενεργειακά βέλτιστη.

Αρχικά, θα πρέπει να υπολογιστεί το δυναμικό αιολικό στο ύψος πλήμνης κάθε μηχανής. Στην ενότητα Κεφάλαιο 4 πραγματοποιήθηκε η εκτίμηση του αιολικού δυναμικού της περιοχής για το ύψος καταγραφής 30.0 m, κάνοντας χρήση της κατανομής Weibull. Στην πραγματικότητα όμως, οι ανεμογεννήτριες θα βρίσκονται σε μεγαλύτερο ύψος. Έτσι, θα πρέπει να υπολογιστεί με βάση αυτό το αιολικό δυναμικό στο ύψος τοποθέτησης των ανεμογεννητριών. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί πώς και για τις δύο ανεμογεννήτριες

<sup>114</sup> Uraz, Emre. Offshore Wind Turbine Transportation & Installation Analyses. Visby, Sweden: Gotland University, 2011.



προτείνονται διάφορα ύψη τοποθέτησης και για τις ανάγκες της εργασίας θα επιλεγούν δύο από τις προτεινόμενες τιμές, μεταξύ των οποίων θα πραγματοποιηθεί η σύγκριση.

Η ανεμογεννήτρια Gamesa G114 διατίθεται για πρότυπα ύψη πύργων μήκους: 80 m, 93 m και 125 m, ενώ η ανεμογεννήτρια Vestas V110 διατίθεται για πρότυπα ύψη πύργων μήκους: 80 m, 95 m, 110 m, 120 m και 125 m. Στη βάση της λογικής του να συγκρίνουμε αντίστοιχα μεγέθη, επιλέγεται και για τις δύο υπό εξέταση ανεμογεννήτριες ύψος πύργου 125 m. Για το ύψος αυτό, υπολογίζεται η παράμετρος:

$$a = \frac{0,37 - 0,088 \cdot \ln(c_0)}{1 - 0,088 \cdot \ln\left(\frac{z_0}{10}\right)},$$

όπου

$c_0$  είναι ο συντελεστής κλίμακας της κατανομής Weibull για ύψος 30 m,

$z_0$  είναι το ύψος αναφοράς 30 m.

Συνεπώς, προκύπτει  $a = 0,210$  και ο νέος συντελεστής κλίμακας “c” για το ύψος  $z = 125$  m, είναι:

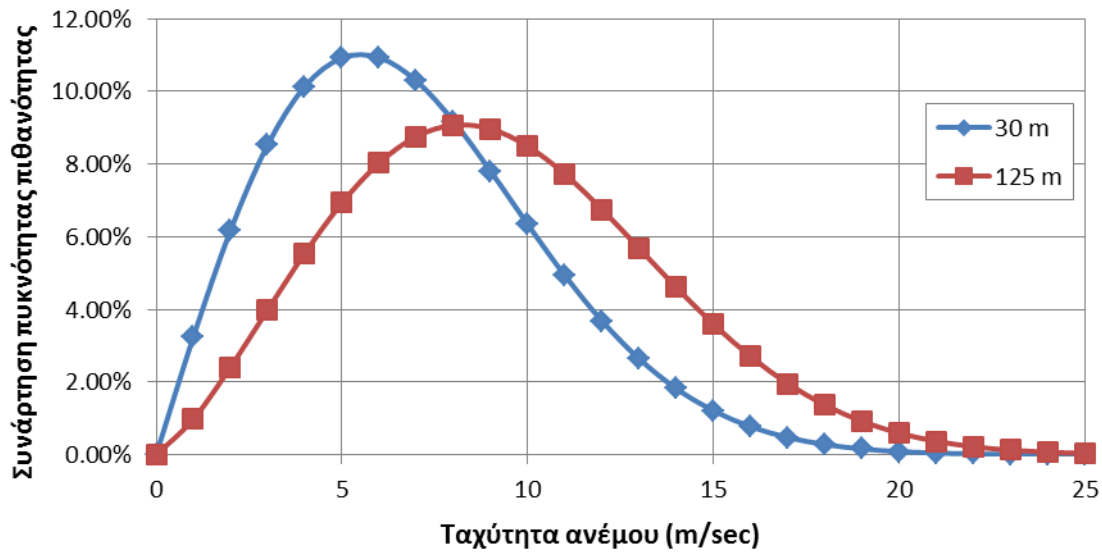
$$\frac{c}{c_0} = \left(\frac{z}{z_0}\right)^a$$

ή  $c = 10,502$ . Ο νέος συντελεστής σχήματος “k” για το ύψος  $z = 125$  m προκύπτει ως:

$$k = k_0 \cdot \frac{1 - 0,088 \cdot \ln\left(\frac{z_0}{10}\right)}{1 - 0,088 \cdot \ln\left(\frac{z}{10}\right)},$$

ή  $k = 2,232$ .

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η κατανομή Weibull για το ύψος καταγραφής 30 m και το ύψος τοποθέτησης 125 m. Όπως είναι εμφανές, για το ύψος πραγματικής τοποθέτησης 125 m η κατανομή του αιολικού δυναμικού είναι μετατοπισμένη προς τα δεξιά, καθώς σε μεγαλύτερα ύψη υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης ανέμων υψηλότερων ταχυτήτων, λόγω μειωμένης τριβής με την επιφάνεια της θάλασσας. Θα πρέπει ακόμα να σημειωθεί πώς όσο αυξάνεται ο συντελεστής σχήματος k, η ασυμμετρία της κατανομής (και κατ’ επέκταση η τυπική απόκλιση του ανέμου) ελαττώνεται και οι τιμές συγκεντρώνονται περί τη μέση ταχύτητα.



Σχήμα 4.12: Αιολικό δυναμικό της περιοχής μελέτης για ύψη 30 m και 125 m.

Η ετήσια παραγόμενη ενέργεια για κάθε πιθανή ταχύτητα του ανέμου προκύπτει από το γινόμενο της πιθανότητας εμφάνισης κάθε ταχύτητας  $f(u)$  με την καμπύλη ισχύος της κάθε μηχανής  $W(u)$  και τις ώρες που απαρτίζουν ένα έτος ( $365 \text{ ημέρες} \times 24 \text{ ώρες} = 8760 \text{ ώρες}$ ). Δηλαδή, είναι:

$$E(u) = f(u) \cdot W(u) \cdot 8760.$$

Ακολουθώς, λαμβάνοντας το άθροισμα της ενέργειας για το σύνολο των ταχυτήτων προκύπτει η συνολική ενέργεια παραγωγής ενός έτους για κάθε ανεμογεννήτρια. Δηλαδή, είναι:

$$E_{total} = \sum_{u=u_{cut\ in}}^{u=u_{cut\ out}} E(u)$$

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζεται η ετήσια παραγόμενη ενέργεια για τις δύο προτεινόμενες ανεμογεννήτριες. Ακολουθεί διαγραμματική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων.





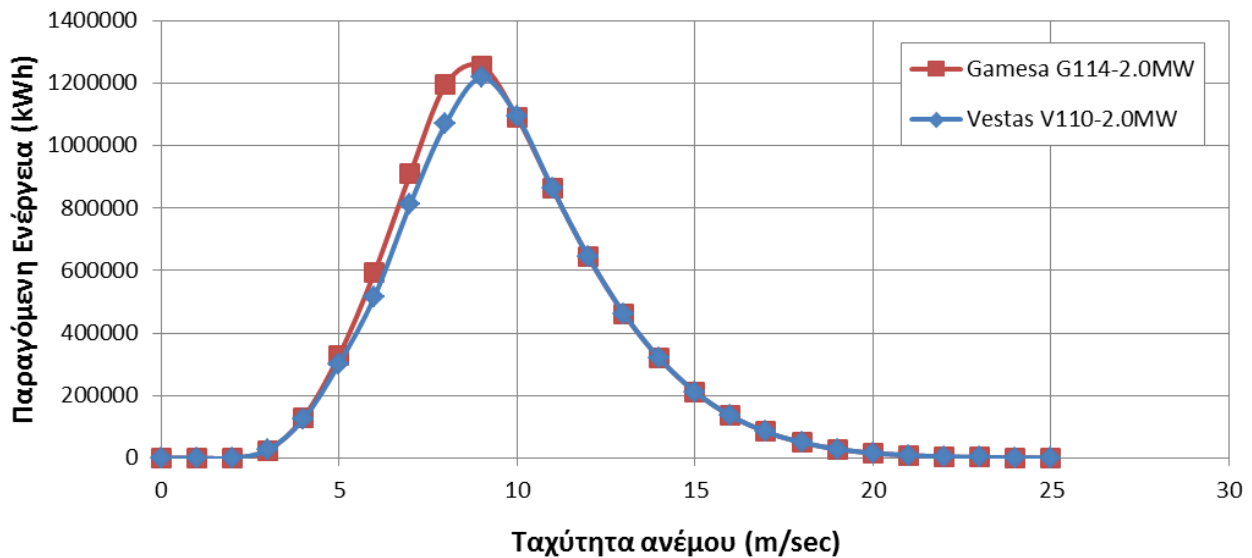
**Πίνακας 4.3: Ετήσια παραγόμενη Ενέργεια της Gamesa G114-2.0MW**

Ταχύτητα ανέμου (m/sec)	Κατανομή πιθανότητας Weibull (%)	Αριθμός ωρών ετησίως	Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας (kW)	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (kWh)
0	0.00%	0	0	0
1	3.25%	284	0	0
2	6.18%	541	0	0
3	8.53%	747	32	23917.622
4	10.14%	888	146	129631.115
5	10.92%	957	342	327200.143
6	10.93%	958	621	594637.806
7	10.29%	902	1008	908723.704
8	9.18%	804	1486	1195410.386
9	7.80%	684	1836	1255248.423
10	6.34%	555	1965	1091075.109
11	4.93%	432	1994	861308.740
12	3.68%	322	1999	644548.055
13	2.64%	231	2000	462515.384
14	1.82%	160	2000	319061.032
15	1.21%	106	2000	211870.852
16	0.77%	68	2000	135520.653
17	0.48%	42	2000	83543.238
18	0.28%	25	2000	49657.298
19	0.16%	14	2000	28469.754
20	0.09%	8	2000	15748.927
21	0.05%	4	2000	8408.188
22	0.02%	2	1906	4129.831
23	0.01%	1	1681	1812.538
24	0.01%	1	1455	753.949
25	0.00%	0	1230	295.842
<b>Άθροισμα</b>	<b>100%</b>	<b>8760</b>		<b>8353488.589</b>



**Πίνακας 4.4: Ετήσια παραγόμενη Ενέργεια της Vestas V110-2.0MW**

Ταχύτητα ανέμου (m/sec)	Κατανομή πιθανότητας Weibull (%)	Αριθμός ωρών ετησίως	Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας (kW)	Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (kWh)
0	0.00%	0	0	0
1	3.25%	284	0	0
2	6.18%	541	0	0
3	8.53%	747	35	26159.899
4	10.14%	888	140	124303.809
5	10.92%	957	315	301368.553
6	10.93%	958	540	517076.353
7	10.29%	902	900	811360.450
8	9.18%	804	1330	1069916.429
9	7.80%	684	1780	1216961.979
10	6.34%	555	1970	1093851.382
11	4.93%	432	1995	861740.690
12	3.68%	322	1999	644548.055
13	2.64%	231	1999	462284.127
14	1.82%	160	2000	319061.032
15	1.21%	106	2000	211870.852
16	0.77%	68	2000	135520.653
17	0.48%	42	2000	83543.238
18	0.28%	25	2000	49657.298
19	0.16%	14	2000	28469.754
20	0.09%	8	2000	15748.927
21	0.05%	4	2000	8408.188
22	0.02%	2	2000	4333.505
23	0.01%	1	2000	2156.499
24	0.01%	1	2000	1036.356
25	0.00%	0	2000	481.044
<b>Άθροισμα</b>	<b>100%</b>	<b>8760</b>		<b>7989859.072</b>



Σχήμα 4.13: Ετήσια Παραγόμενη ενέργεια των δύο προτεινόμενων μηχανών.

Παρατηρούμε πώς η διαφορά ανάμεσα στην παραγόμενη ενέργεια είναι σχετικά μικρή, αφορά όμως ταχύτητες από 5 m/sec έως 10 m/sec, δηλαδή περί τη μέση ταχύτητα της περιοχής μελέτης. Τελικώς, η ανεμογεννήτρια Gamesa G114-2.0MW παράγει 8,354 GWh/y (ετησίως), ενώ η Vestas V110-2.0MW παράγει 7,990 GWh/y (ετησίως). Έτσι, καταλήγουμε σε μια σεβαστή διαφορά, η οποία καθιστά την **Gamesa G114-2.0MW** την **προτεινόμενη ανεμογεννήτρια από ενεργειακής άποψης**.

Τέλος, υπολογίζεται η καθαρή ενέργεια που εγχέει το αιολικό πάρκο στο δίκτυο ηλεκτροδότησης η οποία και πωλείται, μετά την αφαίρεση των κατά τόπους απωλειών που προκύπτουν από τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια, αλλά και από τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από το πάρκο προς το σταθμό. Είναι:

$$E_{net} = E_{total} \cdot N_0 \cdot A_{wf} \cdot N_a \cdot (1 - P_t) \cdot (1 - P_e)$$

όπου

$E_{net}$  είναι η καθαρή ενέργεια μετά την αφαίρεση των απωλειών

$N_0$  είναι ο αριθμός των ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου

$A_{wf}$  είναι η ετήσια διαθεσιμότητα του πάρκου, η οποία εκφράζει την ποσοστιαία μέση ετήσια διαθεσιμότητα των ανεμογεννητριών που λειτουργούν στο αιολικό πάρκο. Σύμφωνα με βιβλιογραφικές αναφορές, η εν λόγω παράμετρος λαμβάνεται ίση με 96%<sup>115</sup>

$N_a$  είναι μια παράμετρος διαθεσιμότητας του δικτύου, για τις περιπτώσεις αδυναμίας μεταφοράς της ενέργειας που παράγεται, λόγω κάποιας ζημιάς ή λόγω συντήρησης των εγκαταστάσεων. Λαμβάνεται ίση με 99%.

<sup>115</sup> P. Volunt, P. H. Pedersen, et al. First year of Operation-Performance as Planned, report for 165 MW Nysted Offshore Wind Farm. Danimarca: Energi E2, December 2004.



$P_t$  είναι οι απώλειες λόγω φαινομένων σκίασης μιας γεννήτριας από τις γειτονικές της. Οι απώλειες αυτές θεωρούνται ακόμα και ενώ τηρούνται οι ελάχιστες αποστάσεις ανάμεσα στις ανεμογεννήτριες και λαμβάνονται ίσες με 5%.

$P_e$  είναι οι ηλεκτρικές απώλειες λόγω μεταφοράς του ρεύματος εντός του καλωδίου και λαμβάνονται ίσες με 3%.

Στη συνέχεια, μπορεί να υπολογισθεί ο συντελεστής χρησιμοποίησης κάθε ανεμογεννήτριας, ως:

$$\text{Συντελεστής Χρησιμοποίησης (\%)} = \frac{E_{net}}{(\text{εγκατεστημένη ισχύς}) \cdot 8760} \cdot 100$$

Ο συντελεστής αυτός υπολογίζει τη σχέση ανάμεσα στην ονομαστική εγκατεστημένη ισχύ και στην πραγματικά παραγόμενη. Τέλος, αν κάνουμε την παραδοχή πως η μέση ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά νοικοκυριό είναι περί τα 3750 kWh, μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμό των νοικοκυριών που θα εξυπηρετούνται από τη λειτουργία του αιολικού πάρκου. Τα αποτελέσματα σχετικά με τα παραπάνω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον πίνακα που ακολουθεί.

**Πίνακας 4.5: Στοιχεία παραγωγής ενέργειας.**

	Gamesa G114-2.0MW	Vestas V110-2.0MW
$E_{net}$ (GWh/y)	329.217	314.886
Συντελεστής Χρησιμοποίησης (%)	41.758	39.940
Μέση ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά νοικοκυριό (kWh)	3750	3750
Αριθμός νοικοκυριών που εξυπηρετούνται	87791	83969

#### 4.5.5 Οπτική Όχληση

Με σκοπό την αποφυγή ενός μεγάλου αριθμού ανεμογεννητριών σε περιοχές με πολύ μικρή απόσταση από την ακτή, χρησιμοποιούνται ορισμένα κριτήρια με βάση το μέγεθος των ανεμογεννητριών και την απόστασή τους από την ακτή. Σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος με νόμο που ψηφίστηκε το 2010, θα πρέπει το μέγιστο ορατό ύψος να είναι μικρότερο από 0,6 m και η μέγιστη ορατή επιφάνεια μικρότερη από 0,0025 m. Αναλυτικά, το ορατό ύψος και η ορατή επιφάνεια μιας ανεμογεννήτριας είναι αντίστοιχα:

$$H_{op} = \frac{0.5m}{L} \cdot H \quad \text{και} \quad A_{op} = \left( \frac{0.5m}{L} \right)^2 \cdot A$$

όπου

H το μέγιστο ύψος της μηχανής, ίσο με το ύψος της πλήμνης συν το μισό της διαμέτρου του δρομέα,

L η μέση απόσταση του πάρκου από την ακτή,



Α η επιφάνεια σάρωσης, ίση με το γινόμενο του μέγιστου ύψους  $H$  επί τη διάμετρο του δρομέα<sup>116</sup>.

Το ορατό ύψος και η ορατή επιφάνεια για το σύνολο του αιολικού πάρκου υπολογίζονται, αντίστοιχα, ως:

$$O_H = \sum H_{op} \text{ και } O_A = \sum A_{op} .$$

Οι δύο προτεινόμενες ανεμογεννήτριες έχουν το ίδιο ύψος πλήμνης και ελαφρώς διαφορετική διάμετρο δρομέα. Για τη δυσμενέστερη από τις δύο, δηλαδή για την Gamesa G114 που έχει μεγαλύτερη διάμετρο δρομέα, είναι:

- Ύψος πλήμνης: 125 m
- Διάμετρος δρομέα: 114 m

Για τη μελετώμενη εγκατάσταση, το πάρκο περιέχει 45 ανεμογεννήτριες με μέση απόσταση 13 km από την ακτή. Έτσι, από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν:

#### 4.5.5.1 Πρώτος έλεγχος – Έλεγχος Ορατού Ύψους

Μέγιστο ύψος μηχανής:

$$H = 125m + 114m/2 = 182m .$$

Μέγιστο ορατό ύψος για μια ανεμογεννήτρια:

$$H_{op} = \frac{0,5m}{13.000m} \cdot 182m = 0,0614m .$$

Μέγιστο ορατό ύψος για όλο το αιολικό πάρκο:

$$O_H = 45 \cdot 0.0614m = 0,315m < 0,6m .$$

→ Ο έλεγχος ικανοποιείται.

#### 4.5.5.2 Δεύτερος έλεγχος – Έλεγχος Ορατής Επιφάνειας

Επιφάνεια σάρωσης:

$$A = 114m \cdot 182m = 20.748m^2 .$$

Μέγιστη ορατή επιφάνεια για μια ανεμογεννήτρια:

$$A_{op} = \left( \frac{0,5m}{13.000m} \right)^2 \cdot 20.748m^2 = 3,067 \cdot 10^{-5} m^2 .$$

Μέγιστη ορατή επιφάνεια για όλο το αιολικό πάρκο:

$$O_A = 48 \cdot 3,067 \cdot 10^{-5} m^2 = 0,00138m^2 < 0,0025m^2 .$$

---

<sup>116</sup> Uraz, Emre. Offshore Wind Turbine Transportation & Installation Analyses. Visby, Sweden: Gotland University, 2011.



→ Ο έλεγχος ικανοποιείται.

Όπως γίνεται αντιληπτό στη συγκεκριμένη περίπτωση οι ανεμογεννήτριες δεν δημιουργούν ιδιαίτερη όχληση.

## 4.6 Διασύνδεση με το χερσαίο δίκτυο

Η σύνδεση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου με το δίκτυο ενέργειας αποτελείται από τρία διακριτά επίπεδα:

- **Πρώτο επίπεδο:** Εσωτερική σύνδεση του πάρκου, εντός της οποίας οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε συστάδες και κάθε συστάδα συνδέεται με τον υπεράκτιο υποσταθμό.
- **Δεύτερο επίπεδο:** Σύνδεση του υπεράκτιου υποσταθμού (εάν υπάρχει) με το χερσαίο υποσταθμό.
- **Τρίτο επίπεδο:** Σύνδεση του χερσαίου υποσταθμού με το δίκτυο ηλεκτροδότησης.

Ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση κάθε επιπέδου.

### 4.6.1 Πρώτο επίπεδο

Η τάση στις εξόδους των ανεμογεννητριών είναι σχετικά χαμηλή και συνεπώς η μεταξύ τους σύνδεση δεν είναι μια αποδοτική λύση. Επιπλέον στα υπεράκτια αιολικά πάρκα υπάρχει μεγάλη ισχύς και μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των ανεμογεννητριών, του δικτύου και των πιθανών υποσταθμών. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η σύνδεση σε υψηλά επίπεδα τάσης ώστε να μειωθούν οι απώλειες. Για την επίτευξη αυτού του στόχου χρησιμοποιείται σε κάθε ανεμογεννήτρια ένας μετασχηματιστής για την ανύψωση της τάσης, ο οποίος τοποθετείται εντός του πύργου ή της ατράκτου. Οι συνδέσεις των ανεμογεννητριών πραγματοποιούνται σε δίκτυα της τάξης των 36kV, τα οποία θεωρούνται δίκτυα μέσης τάσης, ωστόσο σε μικρότερες εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται δίκτυα των 10kV. Με βάση τη βιβλιογραφία και τα υπάρχοντα αιολικά πάρκα για μια εγκατάσταση αντίστοιχη με αυτή της συγκεκριμένης μελέτης τα επίπεδα της τάσης θα είναι στα 36kV<sup>117</sup>.

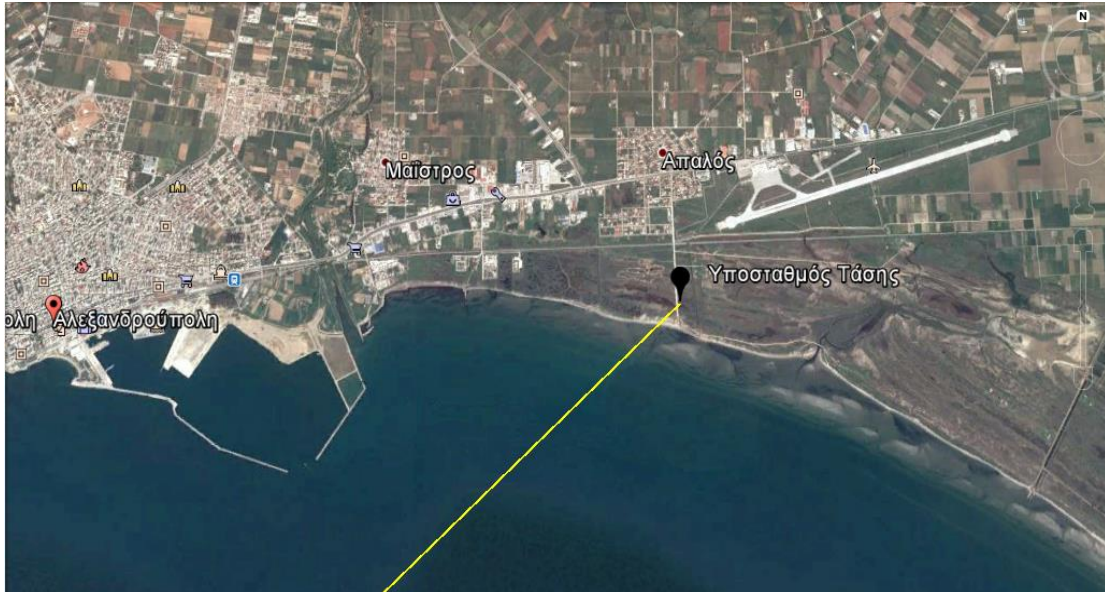
### 4.6.2 Δεύτερο επίπεδο

Στο Σχήμα 4.14 φαίνεται το επιλεγμένο σημείο για την εγκατάσταση του υποσταθμού ανύψωσης τάσης. Η απόσταση του από το κέντρο είναι περίπου στα 12 χιλιόμετρα και έχει προβλεφθεί να αποφευχθεί οποιαδήποτε αλληλεπίδραση με το Εθνικό Υγροτοπικό Πάρκο που βρίσκεται στη περιοχή αυτή. Επιλέχθηκε έτσι ένα οικόπεδο κοντά στο αεροδρόμιο, η θέση του οποίου δεν επηρεάζει το βιότοπο του Δέλτα του Έβρου.

---

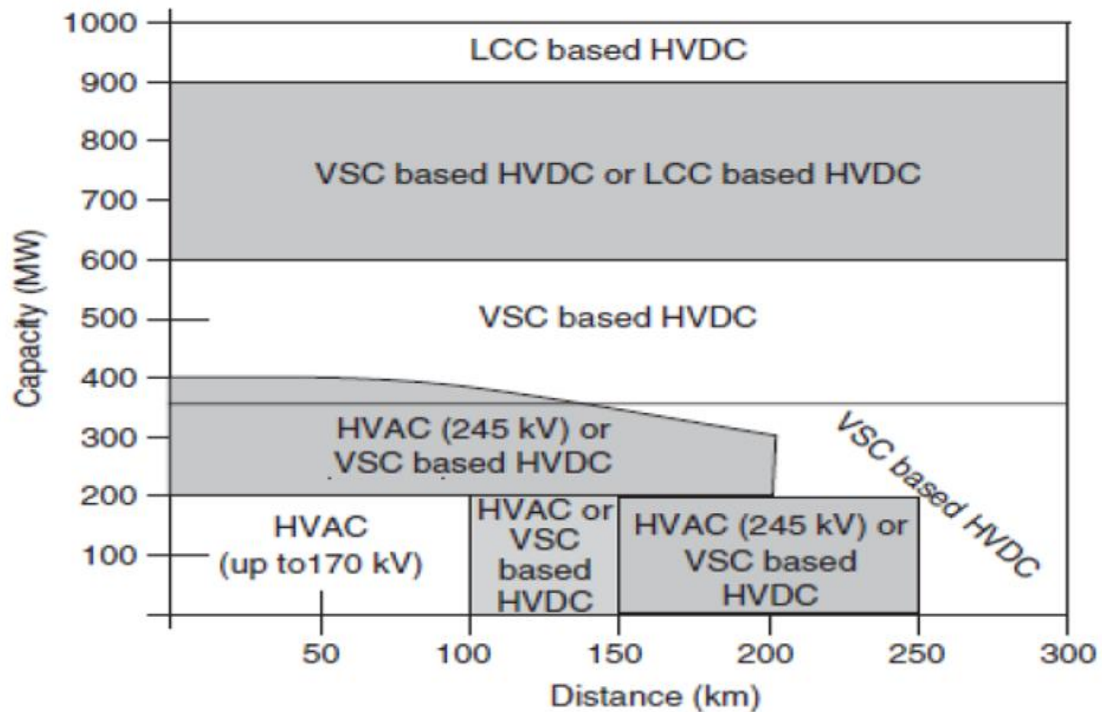
<sup>117</sup> Herman, S.A. OFFSHORE WIND FARMS: Analysis of Transport and Installation Costs. ECN, 2002.





Σχήμα 4.14: Υποσταθμός ανύψωσης τάσης.

Σύμφωνα λοιπόν με την απόσταση του χερσαίου υποσταθμού από τον υπεράκτιο υποσταθμό, αλλά και την ισχύ του πάρκου και με βάση το Σχήμα 4.15 προκύπτει το συμπέρασμα πως η κατάλληλη σύνδεση για το πάρκο είναι η HVAC.



Σχήμα 4.15: Διάγραμμα μεθόδων συνδεσμολογίας με τη στεριά.



#### 4.6.3 Τρίτο επίπεδο

Σύμφωνα με τη νομοθεσία για τη κατασκευή ενός χερσαίου υποσταθμού στα όρια του συστήματος ισχύουν οι παρακάτω σχεδιαστικές αρχές:

- Διπλοί ζυγοί της τάσης των 400 kV: Για τη σύνδεση των δυο ζυγών χρησιμοποιείται ένας διασυνδεδετικός διακόπτης ισχύος ζυγών, της τάξης των 400 kV, ο οποίος εμπεριέχει δυο αποζεύκτες ζυγών και δύο γειωτές σε κάθε αποζεύκτη. Επιπλέον τοποθετούνται μετασχηματιστές τάσης για τη πραγματοποίηση των μετρήσεων, ένα σύστημα δυο ζωνών για τη προστασία των ζυγών και μετασχηματιστές έντασης σε κάθε διασυνδεδετικό διακόπτη. Οι παραπάνω αποζεύκτες θα πρέπει να είναι ηλεκτροκίνητοι με δυνατότητα τηλεχειρισμού<sup>118</sup>.
- Πύλες αναχώρησης: Σε κάθε μετασχηματιστή ανύψωσης τοποθετείται μια πύλη 400 kV και το σύστημα μεταφοράς τα κάθε πύλης θα πρέπει να περιλαμβάνει δύο αποζεύκτες ζυγών με ένα γειωτή και ένα μετασχηματιστή έντασης ανά φάση για τη καταγραφή των μετρήσεων.
- Όργανα και μετρητικές διατάξεις: Στη διάταξη που χρησιμοποιείται για τη καταγραφή της ενεργού και άεργου ενέργειας χρησιμοποιούνται μετρητές, ένας κύριος μετρητής και ένας μετρητή επαλήθευσης, αλλά και ένα σύστημα για τη τηλεμετάδοση των καταγραφών.
- Ηλεκτρονικά συστήματα: Στη κατηγορία αυτή ανήκουν τα συστήματα τηλεμετάδοσης, τηλεχειρισμών, τηλεεποπτείας και τηλεελέγχου.
- Χώρος ελέγχου: Απαιτείται η ύπαρξη ενός ανεξαρτήτου κτιρίου το οποίο θα παρέχει δυνατότητες πρόσβασης 24 ώρες το 24ωρο, ώστε να είναι δυνατή η εποπτεία των συστημάτων της εγκατάστασης.
- Γειώσεις: Η κατασκευή του δικτύου γείωσης πραγματοποιείται με βάση τον κανονισμό IEEE Sts 80-1986.

---

<sup>118</sup> Herman, S.A. OFFSHORE WIND FARMS: Analysis of Transport and Installation Costs. ECN, 2002.



## Κεφάλαιο 5 Οφέλη και κόστος

### 5.1 Κόστος

Στην ενότητα αυτή υπολογίζεται το συνολικό κόστος της εγκατάστασης. Αυτό περιλαμβάνει το κόστος αγοράς και ανταλλακτικών των ανεμογεννητριών, εκμίσθωσης του οικοπέδου, μεταφοράς και εγκατάστασης των μηχανών, τις δαπάνες πολιτικού μηχανικού, ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού, τα έξοδα των τεχνικών-συμβούλων, το κόστος διασύνδεσης, οι τραπεζικές δαπάνες και κάποιες επιπλέον δαπάνες ανά έτος.

#### 5.1.1 Ανεμογεννήτριες

Το κόστος των ανεμογεννητριών εκτιμάται πως αγγίζει τα 1.000 €/kW συνεπώς για ένα πάρκο με 45 ανεμογεννήτριες το κόστος αυτό θα είναι:  $45 \cdot 2.000 \text{ kW} \cdot 1.000 \text{ €/kW} = 90.000.000 \text{ €}$ .

Επιπλέον θα πρέπει να συμπεριληφθούν στη τιμή αυτή και τα ανταλλακτικά των ανεμογεννητριών. Το κόστος των ανταλλακτικών φτάνει το 3 % της αξίας τους και συνεπώς για τις ανεμογεννήτριες της μελέτης θα  $3 \% \cdot 90.000.000 = 2.700.000 \text{ €}$ .

#### 5.1.2 Οικόπεδο

Η έκταση του πάρκου θα είναι στα 22.750 στρέμματα. Το κόστος για την εκμίσθωση ενός τέτοιου οικοπέδου στη περιοχή της Αλεξανδρούπολης είναι περίπου στα 2.150.000 € ετησίως. Συνεπώς για 20 χρόνια ζωής το κόστος του οικοπέδου θα είναι 43.000.000 €.

#### 5.1.3 Μεταφορά – Εγκατάσταση Ανεμογεννητριών

Επιπλέον στο κόστος θα πρέπει να συμπεριληφθούν και οι δαπάνες για τη μεταφορά, τη προετοιμασία και τη τοποθέτηση των ανεμογεννητριών στο πάρκο. Οι βασικότερες διαδικασίες που πρέπει να ακολουθηθούν για την προετοιμασία και την εγκατάσταση είναι:

- η προετοιμασία της πλήμνη και η τοποθέτηση του κώνου,
- το κλείδωμα του ρότορα,
- η τοποθέτηση των οργάνων μέτρησης (ανεμομέτρων και ανεμοδεικτών),
- η προετοιμασία και συναρμολόγηση πύργων,
- η προετοιμασία της ατράκτου και η εγκατάσταση της στους πύργους,
- η τοποθέτηση και η σύνδεση καλωδίων στους πύργους,
- η εγκατάσταση ενός ελεγκτή στους πύργους,
- η τοποθέτηση των πτερυγίων ξεχωριστά και σε οριζόντια θέση,
- η εγκατάσταση μετασχηματιστών.

Οι παραπάνω δαπάνες για το συγκεκριμένο έργο υπολογίζονται στα 1.912.500 €.

#### 5.1.4 Δαπάνες πολιτικού μηχανικού

Επιπλέον θα πρέπει να υπολογιστούν στη μελέτη τα έξοδα του πολιτικού μηχανικού.



Τα έργα που πραγματοποιεί ένας πολιτικός μηχανικός σε ένα αιολικό πάρκο είναι τα παρακάτω:

- Πλατείες ανέγερσης των ανεμογεννητριών.
- Θεμελιώσεις για τις βάσεις των ανεμογεννητριών.
- Τάφροι όδευσης καλωδίων κατά μήκος του αιολικού πάρκου ώστε να είναι δυνατή η σύνδεσή του με τον υποσταθμό.
- Δωμάτιο ελέγχου για το αιολικό πάρκο.

Οι θεμελιώσεις των ανεμογεννητριών αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι ώστε να επιτευχθεί η στατικότητα τους. Το κόστος της θεμελίωσης συμπεριλαμβάνει τις δαπάνες της διεκπεραίωσης της από το εργατικό δυναμικό και το κόστος των υλικών της κατασκευής, όπως είναι το σκυρόδεμα και τα μεταλλικά πλέγματα. Σύμφωνα με εκτιμήσεις το κόστος για τη θεμελίωση μιας ανεμογεννήτριας φτάνει στα 15.000 €. Συνεπώς για μια εγκατάσταση με τέσσερις ανεμογεννήτριες το κόστος αυτό θα είναι 675.000 €.

#### 5.1.5 Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός

Στις δαπάνες για τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό συμπεριλαμβάνονται: η προμήθεια, η μεταφορά και η εγκατάσταση του. Σε ένα αιολικό πάρκο ο ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός είναι:

- οι αγωγοί και οι σωλήνες,
- οι γειώσεις,
- τα καλώδια οπτικών ινών,
- οι μικροί υποσταθμοί.

Στη μελέτη της εργασίας το κόστος αυτό υπολογίζεται στα 1.912.500 €.

#### 5.1.6 Έξοδα τεχνικών-συμβούλων

Τα βασικότερα έξοδα που προκύπτουν από τεχνικούς και συμβούλους είναι:

- η μελέτη για την άδεια παραγωγής,
- η μελέτη για την εκτίμηση της παραγωγής και του αιολικού δυναμικού,
- η μελέτη για την άδεια της εγκατάστασης εγκατάστασης,
- η μελέτη για την αίτηση στον Αναπτυξιακό Νόμο και επιχορήγηση μέσω του Κοινοτικού Πλαισίου Στήριξης,
- οι γεωτεχνικές και γεωφυσικές μελέτες του αιολικού πάρκου,
- οι τοπογραφικές μελέτες,
- οι μελέτες οδοποιίας,
- οι μελέτες για πολεοδομικές άδειες,
- οι νομικοί και οι οικονομικοί σύμβουλοι.

Στη μελέτη αυτή τα παραπάνω έξοδα υπολογίζονται στα 1.687.500 €.



### 5.1.7 Κόστος διασύνδεσης

Το κόστος που αφορά τη διασύνδεση ενός αιολικού πάρκου με εγκατεστημένη ισχύ 10 MW υπολογίζεται στα 580.000 €. Συνεπώς στη συγκεκριμένη μελέτη όπου η εγκατεστημένη ισχύς είναι ίση με 90 MW, το κόστος αυτό θα είναι κοντά στα 5.220.000 €.

### 5.1.8 Τραπεζικά έξοδα

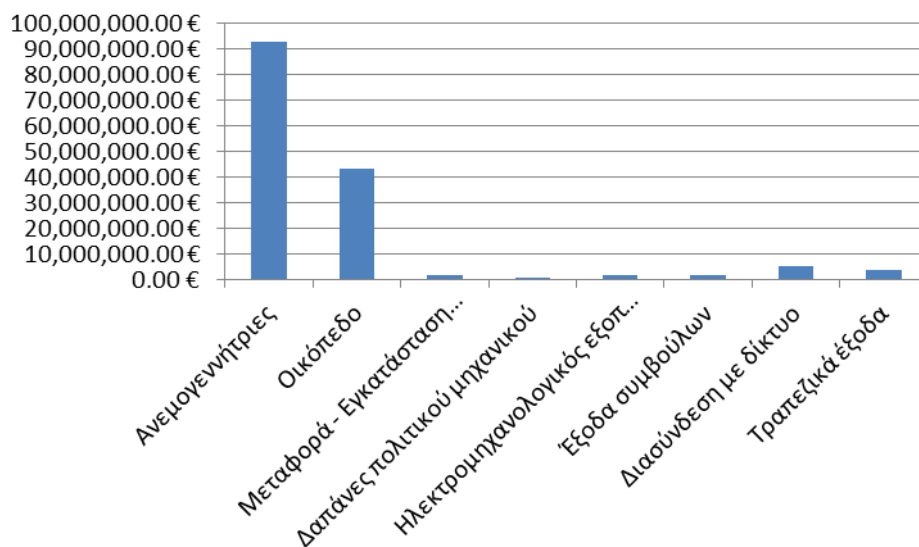
Τα έξοδα αυτά για μια εγκατάσταση αιολικού πάρκου έως 30 MW κυμαίνονται έως 1.200.000 €. Για την εγκατάσταση της μελέτης το κόστος αυτό υπολογίζεται στα 3.600.000 €.

Συνοπτικά οι απαιτούμενες δαπάνες για την ολοκλήρωση ενός τέτοιου έργου ακολουθούν στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 5.1: Κόστος εγκατάστασης.

Είδος/Υπηρεσία	Κόστος (€)
Ανεμογεννήτριες	92.700.000
Οικόπεδο	43.000.000
Μεταφορά - Εγκατάσταση Ανεμογεννητριών	1.912.500
Δαπάνες πολιτικού μηχανικού	675.000
Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός	1.912.500
Έξοδα συμβούλων	1.687.500
Διασύνδεση με δίκτυο	5.220.000
Τραπεζικά έξοδα	3.600.000
<b>Σύνολο</b>	<b>150.707.500</b>

Τα διάφορα κόστη της εγκατάστασης παρουσιάζονται και διαγραμματικά στο επόμενο σχήμα, απ' όπου γίνεται φανερή και γραφικά η συμμετοχή κάθε επιμέρους κόστους στη συνολική τιμή.



Σχήμα 5.1: Κόστος εγκατάστασης.



### 5.1.9 Επιπλέον Δαπάνες ανά έτος

- Σύμβαση συντήρησης: 500.000 €.
- Ασφάλιστρα: 3 % του βασικού εξοπλισμού.
- Μισθός λογιστή: 3.000 €.
- Μισθός συντηρητή: 6.000 €.
- Δημοτικοί φόροι και τέλη: 3 % των ετήσιων εσόδων.
- Λοιποί φόροι: 20 % από τα κέρδη της εγκατάστασης.
- Ποσοστό πληθωρισμού: 2,5 %.

## 5.2 Απόσβεση έργου

Στην ενότητα αυτή υπολογίζεται η δυνατότητα του αιολικού πάρκου να πληρώσει τα έξοδά του εντός της περιόδου λειτουργίας του από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει. Εξετάζεται δηλαδή η δυνατότητα απόσβεσης της επένδυσης για την κατασκευή του.

### 5.2.1 Τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας

Με βάση τον ΔΕΣΜΗΕ η τιμή πώλησης για την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μιας τέτοιας εγκατάστασης είναι 87,85 € ανά MWh.

### 5.2.2 Καθαρή ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Στην ενότητα 4.5.4 υπολογίστηκαν ο συντελεστής λειτουργίας κάθε ανεμογεννήτριας, η μεικτή παραγόμενη ενέργεια ανά έτος, οι απώλειες λόγω σκίασης, καλωδίων και διαθεσιμότητας του δικτύου και τελικώς η καθαρή ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αφαίρεση των απωλειών από την μεικτή παραγόμενη ενέργεια. Υπενθυμίζεται πως για τη γεννήτρια Gamesa G114-2.0MW η καθαρή ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίστηκε στα: 329.217 MWh, ενώ για τη γεννήτρια Vestas V110-2.0MW είναι 314.886 MWh.

### 5.2.3 Υπολογισμός καθαρού κέρδους και απόσβεση

Αφού υπολογίστηκαν τα κόστη της εγκατάστασης και τα έσοδα από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούμε να υπολογίσουμε τα καθαρά κέρδη και το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την απόσβεση του έργου μέσω της ίδιας της λειτουργίας του.

- **Έσοδα** = (Καθαρή ετήσια παραγωγή ενέργειας) · Τιμή πώλησης.
- **Κόστος** = Συντήρηση + Ασφάλιστρα + Αμοιβή συντηρητή + Αμοιβή λογιστή + Ανταποδοτικά τέλη + Φόρος + Πληθωρισμός.
- **Ετήσια καθαρά κέρδη** = Έσοδα – Κόστος.
- **Απόσβεση** = Επένδυση / Ετήσιο καθαρό κέρδος.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές για τα παραπάνω μεγέθη και τις δύο προτεινόμενες ανεμογεννήτριες.





**Πίνακας 5.2: Καθαρό κέρδος και απόσβεση.**

	<b>Gamesa G114-2.0MW</b>	<b>Vestas V110-2.0MW</b>
<b>Έσοδα (€/y)</b>	28921707.56	27662738.16
<b>Κόστος (€/y)</b>	10584035.43	10262998.23
<b>Ετήσια καθαρά κέρδη (€/y)</b>	18337672.13	17399739.93
<b>Απόσβεση (έτη)</b>	8.218	8.661

Άρα με δεδομένο πως η διάρκεια ζωής του έργου είναι στα 20 χρόνια και η απόσβεση θα έχει γίνει περί τα πρώτα 8,5 χρόνια, το έργο κρίνεται ως μια επικερδής επένδυση, ανεξαρτήτως του ποια ανεμογεννήτρια θα επιλεγθεί. **Από οικονομικής άποψης προτεινόμενη είναι η ανεμογεννήτρια Gamesa G114-2.0MW.** Δεδομένου του γεγονότος πως αποτέλεσε και την προτεινόμενη μηχανή από ενεργειακής άποψης, αποτελεί και την τελικώς **προτεινόμενη λύση.**

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί πως τόσο τα ενεργειακά, όσο και τα οικονομικά αποτελέσματα προέκυψαν πολύ κοντινά για τις δύο υποψήφιες μηχανές, αφού ανήκουν στην ίδια κατηγορία και μοιράζονται κοινά χαρακτηριστικά. Τα αποτελέσματα θα ήταν πολύ διαφορετικά στις περιπτώσεις που οι μηχανές είχαν:

- διαφορετική ονομαστική ισχύ.
- διαφορετικά ύψη πλήμνης.
- διαφορετική διάμετρο ρότορα.
- διαφορετικό κόστος αγοράς.
- σημαντικές διαφορές στις καμπύλες ισχύος
- διαφορετικό κόστος αγοράς
- διαφορετικό κόστος εγκατάστασης



## Κεφάλαιο 6      Ενεργειακή μελέτη του αιολικού πάρκου στο WAsP

Στα κεφάλαια 4 και 5 παρουσιάστηκαν ο σχεδιασμός του αιολικού πάρκου βάσει ενεργειακής του μελέτης σε επίπεδο προμελέτης, όπως και η μελέτη κόστους, ώστε να εξεταστεί εάν το πάρκο μπορεί να αποσβέσει το αρχικό κεφάλαιο μέσω της παραγόμενης ενέργειας, εντός της διάρκειας λειτουργίας του. Στο κεφάλαιο αυτό διενεργείται μια πιο αναλυτική ενεργειακή μελέτη του υπό εξέταση υπεράκτιου αιολικού πάρκου, κάνοντας χρήση του λογισμικού WAsP. Η ανάλυση αφορά μόνο το προτεινόμενο μοντέλο ανεμογεννήτριας Gamesa-G114-2.0MW, όπως αυτό προέκυψε από την προμελέτη.

Το WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program) αναπτύσσεται και διανέμεται από το Τμήμα Αιολικής Ενέργειας (Department of Wind Energy) του πανεπιστημίου Technical University of Denmark (DTU) στη Δανία, το οποίο αποτελεί ένα από τα πιο διάσημα ερευνητικά ιδρύματα πάνω στο συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο. Στην εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε η τελευταία έκδοση του λογισμικού WAsP 11 (version 11.06.0012).

Το WAsP αποτελεί ένα λογισμικό πρόβλεψης του αιολικού κλίματος και του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, όπως και της παραγόμενης ενέργειας από μεμονωμένες αιολικές μηχανές ή ολόκληρα αιολικά πάρκα. Οι προβλέψεις βασίζονται σε αιολικά δεδομένα που έχουν καταγραφεί στην ίδια περιοχή. Το λογισμικό περιέχει ένα σύνθετο μοντέλο προσομοίωσης της ροής αέρα εντός ενός ανάγλυφου, ένα μοντέλο προσομοίωσης της αλλαγής τραχύτητας του ανάγλυφου, όπως και μοντέλο για την επιρροή εμποδίων εγγύς των αιολικών μηχανών, στην ενέργεια που αυτές παράγουν.

### 6.1 Υπορουτίνες του WAsP

Το WAsP αποτελείται από το κυρίως πρόγραμμα και μια ομάδα πρόσθετων υπορουτίνων, κάθε μια από τις οποίες μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα από το κυρίως πρόγραμμα. Σε καθεμιά από τις υπορουτίνες αυτές κατασκευάζονται διαφορετικά μέρη του προσομοιώματος, τα οποία τελικώς καλούνται από το κυρίως πρόγραμμα, ώστε να διενεργηθεί η ενεργειακή μελέτη του αιολικού πάρκου.

#### 6.1.1 WAsP Map Editor

Αρχικά, δημιουργείται ο χάρτης της περιοχής μελέτης. Ο χάρτης αυτός θα πρέπει να περιέχει πληροφορίες για το ανάγλυφο, όπως και για την τραχύτητα της περιοχής, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός της εξασθένισης του αιολικού δυναμικού, λόγω του ανάγλυφου.

Στην προκειμένη περίπτωση, θεωρείται μηδενική τραχύτητα εδάφους, αφού το πάρκο είναι υπεράκτιο και ουσιαστικά το "ανάγλυφο" αποτελείται από την επιφάνεια του νερού. Ακόμα, το ανάγλυφο της περιοχής είναι οριζόντιο, με σταθερά μηδενικό υψόμετρο. Έτσι, ο χάρτης της περιοχής δίδεται ως μια ισοϋψής μηδενικού υψομέτρου και μηδενικής τραχύτητας, η οποία έχει το σχήμα ενός ορθογωνίου μεγαλύτερου από το χώρο που καταλαμβάνει το αιολικό πάρκο (7980m × 2850m) διαστάσεων 9000m × 4000m.

#### 6.1.2 Observed Wind Climate (OWC) Wizard

Μετά τη δημιουργία του χάρτη, σειρά έχει ο υπολογισμός του αιολικού δυναμικού της περιοχής μελέτης. Για την εν λόγω περιοχή υπάρχουν τα αιολικά δεδομένα που παρουσιάστηκαν στις ενότητες 4.3.1 και 4.3.2. Έτσι, τα δεδομένα αυτά εισάγονται μέσα στο λογισμικό μέσω της υπορουτίνας "OWC Wizard", ενώ αφορούν τόσο την ταχύτητα του ανέμου, αλλά και τη χωρική κατανομή των ταχυτήτων αυτών για διάφορες διευθύνσεις του ανέμου. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάστηκε το ροδόγραμμα ανέμου της περιοχής μελέτης, το οποίο περιλαμβάνει πληροφορίες για 16 διαφορετικές διευθύνσεις ανέμου.



Αξίζει να σημειωθεί πώς στις τελευταίες εκδόσεις του WAsP, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης της υπορουτίνας "WAsP Climate Analyst", η οποία εφόσον τροφοδοτηθεί με δεδομένα ανέμου σε μορφή χρονοσειράς (time-history data), μπορεί να υπολογίσει το αιολικό δυναμικό της περιοχής στη μορφή του OWC. Συνεπώς, εάν υπήρχαν δεδομένα από μετεωρολογικούς σταθμούς κοντά στην περιοχή μελέτης σε μορφή χρονοσειρών, θα μπορούσαμε να υπολογίσουμε το ροδόγραμμα του ανέμου από συνδυασμό των χρονοσειρών αυτών, λαμβάνοντας υπόψη και την επιρροή της σχετικής θέσης και εγγύτητας των σταθμών αυτών στα τελικά αποτελέσματα.

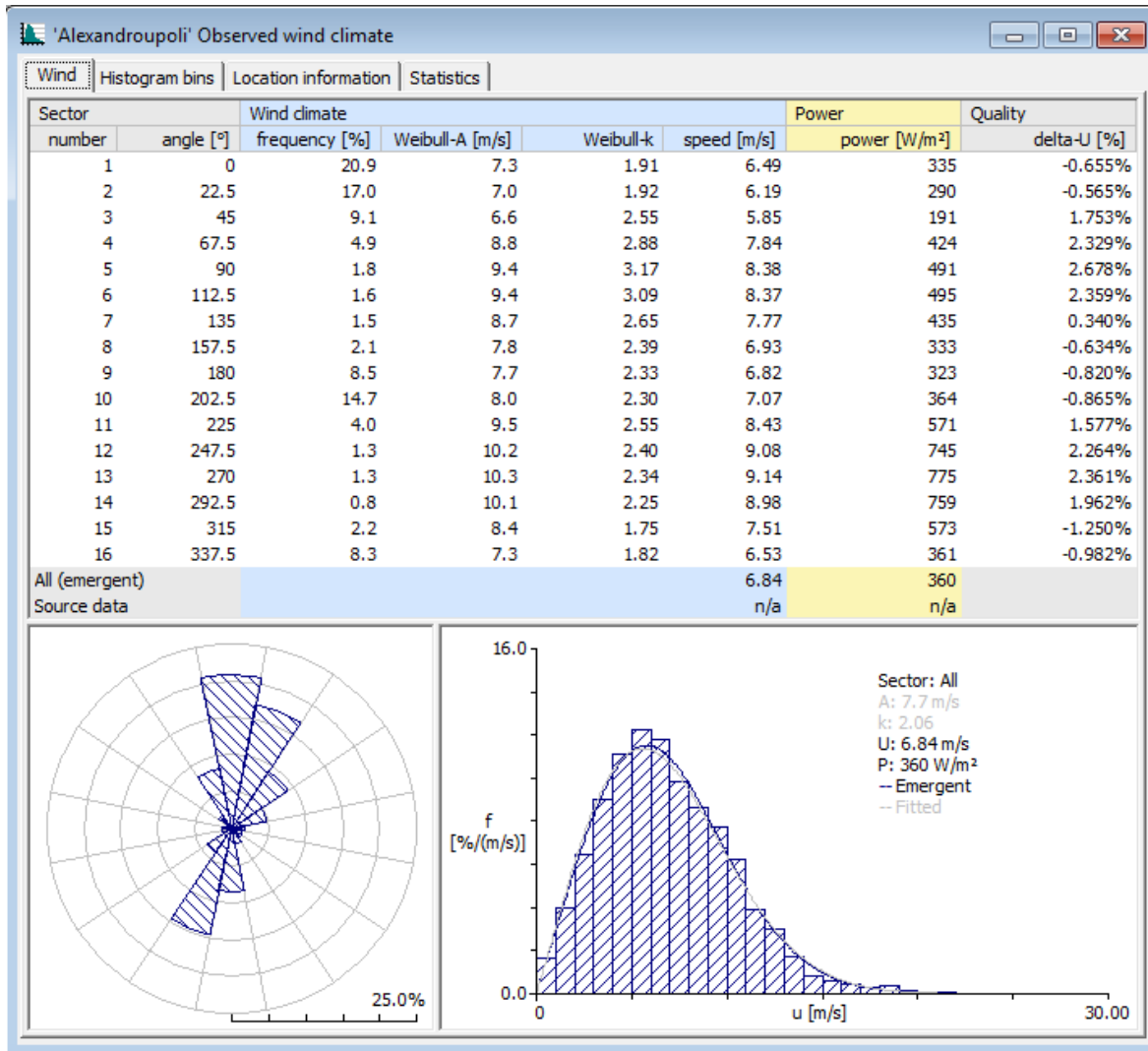
Στη συγκεκριμένη μελέτη το ροδόγραμμα του ανέμου δίδεται ως δεδομένο στο λογισμικό και δεν υπολογίζεται από χρονοσειρές. Αυτό που υπολογίζεται από τη ρουτίνα OWC Wizard είναι η προσαρμογή της κατανομής Weibull (συντελεστές σχήματος και κλίμακας) πάνω στα μετεωρολογικά δεδομένα που δίδονται.

Αρχικά το λογισμικό υπολογίζει ανεμολογικές παραμέτρους του προβλήματος για διαφορετικά υψόμετρα (10.0m-200.0m) και διαφορετικές τιμές τραχύτητας (0.0m-1.5m). Τελικώς, για την ανάλυση θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές που αντιστοιχούν στα υψόμετρα και τις τραχύτητες ενδιαφέροντος.

**Πίνακας 6.1: Ανεμολογικές παράμετροι για διαφορετικά υψόμετρα & τιμές τραχύτητας.**

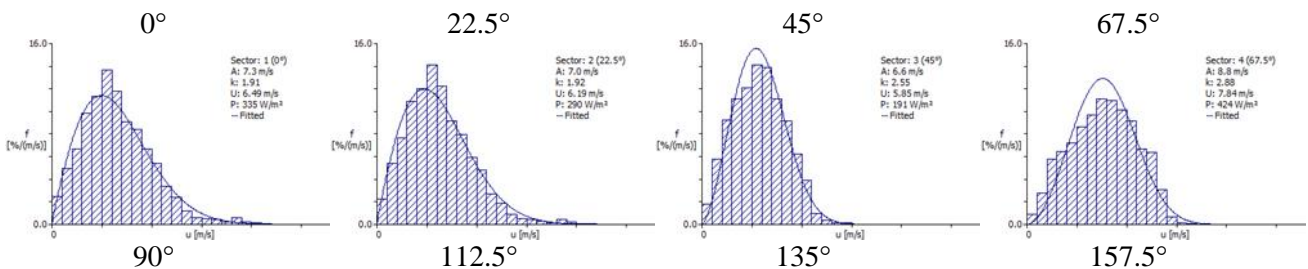
Ύψος	Παράμετρος	0.000 m	0.030 m	0.100 m	0.400 m	1.500 m
10.0 m	Weibull A [m/s]	6.9	5.0	4.3	3.4	2.3
	Weibull k	2.01	1.76	1.77	1.78	1.79
	Mean speed [m/s]	6.14	4.42	3.85	3.02	2.00
	Power density [W/m <sup>2</sup> ]	270	116	76	37	11
25.0 m	Weibull A [m/s]	7.6	6.0	5.3	4.5	3.4
	Weibull k	2.06	1.90	1.88	1.88	1.88
	Mean speed [m/s]	6.72	5.29	4.74	3.97	3.04
	Power density [W/m <sup>2</sup> ]	345	183	133	78	35
50.0 m	Weibull A [m/s]	8.2	6.9	6.3	5.4	4.4
	Weibull k	2.12	2.12	2.07	2.04	2.01
	Mean speed [m/s]	7.23	6.11	5.56	4.80	3.89
	Power density [W/m <sup>2</sup> ]	417	253	194	127	68
100.0 m	Weibull A [m/s]	8.8	8.1	7.4	6.5	5.5
	Weibull k	2.07	2.27	2.28	2.30	2.26
	Mean speed [m/s]	7.82	7.20	6.59	5.79	4.87
	Power density [W/m <sup>2</sup> ]	542	389	297	200	121
200.0 m	Weibull A [m/s]	9.7	9.8	9.0	7.9	6.8
	Weibull k	2.00	2.19	2.21	2.23	2.25
	Mean speed [m/s]	8.56	8.68	7.95	7.03	6.03
	Power density [W/m <sup>2</sup> ]	735	702	535	368	230

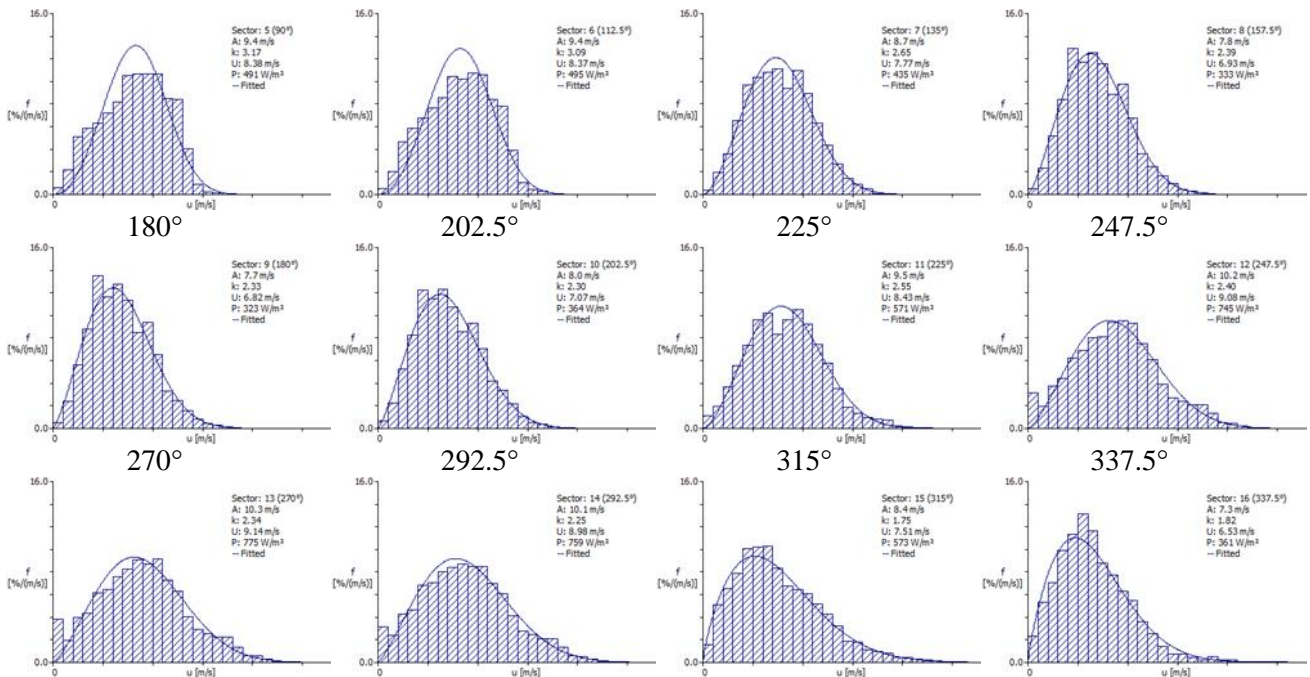
Στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα για όλες τις διευθύνσεις του ανέμου στην περιοχή μελέτης. Βλέπουμε το ροδόγραμμα και την προσαρμογή της κατανομής Weibull στο σύνολο των δεδομένων της περιοχής μελέτης. Στον πίνακα εντός του σχήματος βλέπουμε τη συχνότητα εμφάνισης του ανέμου σε κάθε πιθανή διεύθυνση, τους συντελεστές σχήματος και κλίμακας της κατανομής Weibull, τη μέση ταχύτητα σε κάθε διεύθυνση και τη συνολική μέση ταχύτητα ( $u = 6.82$  m/sec), όπως και την ισχύ του συστήματος για κάθε διεύθυνση του ανέμου ( $P = 360$  W/m<sup>2</sup> η συνολική) για το ύψος αναφοράς 30.0m. Ακόμα, φαίνονται οι τιμές της κατανομής Weibull για το σύνολο των διευθύνσεων ( $A = 7.7$  και  $k = 2.06$ ).



Σχήμα 6.1: Ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής μελέτης από το WAsP.

Εντός του λογισμικού είναι δυνατή η μελέτη των ανεμολογικών δεδομένων για όλες τις πιθανές γωνίες του ροδογράμματος μετρούμενες από το βορρά, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2 για μια από τις ανεμογεννήτριες του αιολικού πάρκου.

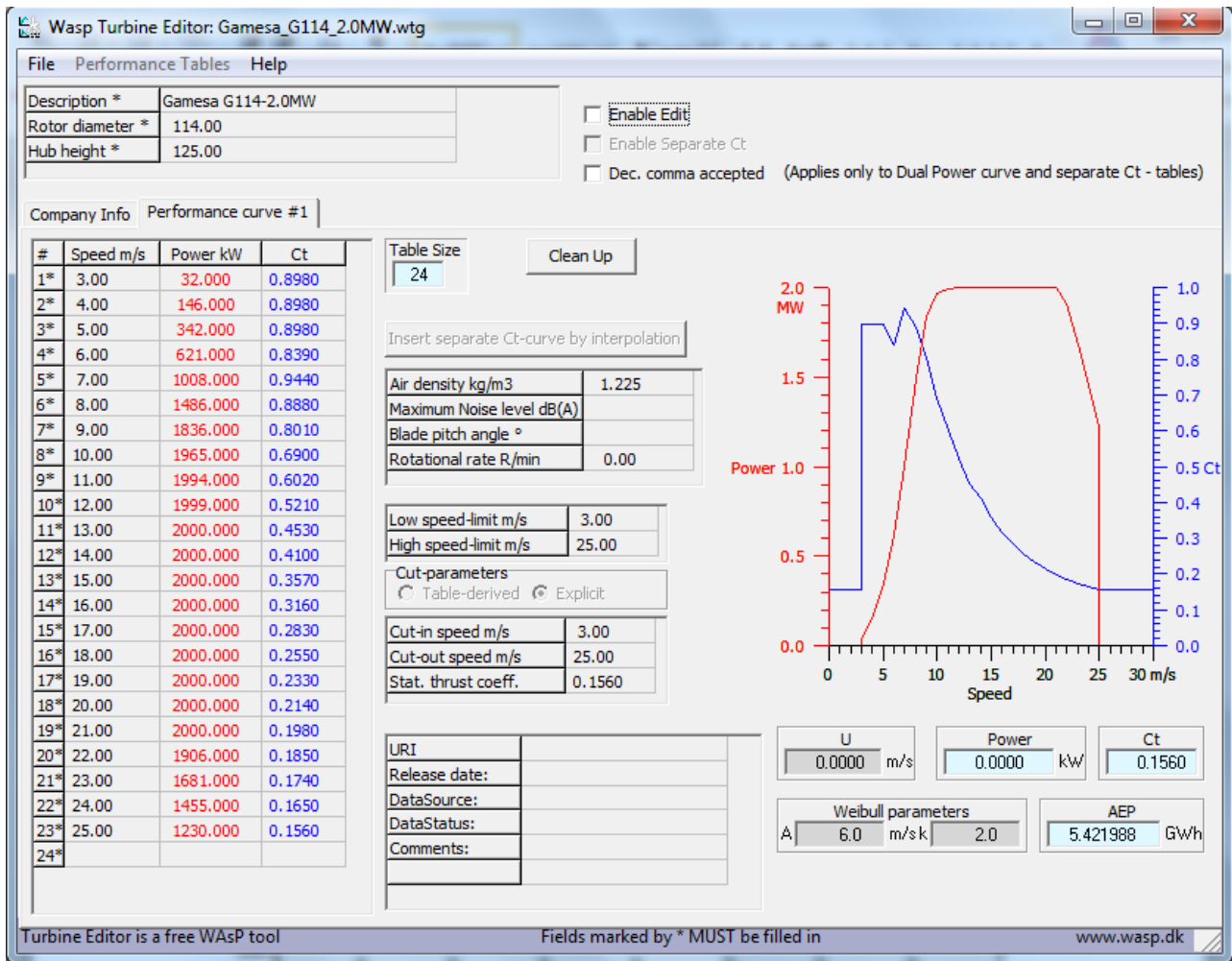




Σχήμα 6.2: Ροδογράμματα για 16 διευθύνσεις ανέμου από το WAsP.

### 6.1.3 WAsP Turbine Editor

Η συγκεκριμένη ρουτίνα χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της αιολικής μηχανής που χρησιμοποιείται στο αιολικό πάρκο. Δεδομένα εισόδου αποτελούν η καμπύλη ισχύος και η καμπύλη αντίστασης, οι οποίες δίνουν την ισχύ και το συντελεστή αντίστασης αντίστοιχα, για διάφορες ταχύτητες ανέμου. Ακόμα, δίδονται στο χρήστη οι επιλογές ορισμού των ταχυτήτων έναρξης και αποκοπής (cut in speed; cut out speed), εκτός του διαστήματος των οποίων η αιολική μηχανή δε λειτουργεί. Η συγκεκριμένη υπορουτίνα διαθέτει βιβλιοθήκη με τα χαρακτηριστικά γνωστών αιολικών μηχανών που χρησιμοποιούνται ευρέως, οι οποίες είναι έτοιμες προς χρήση. Στην προκειμένη, το λογισμικό δε διαθέτει την αιολική μηχανή που χρησιμοποιείται (Gamesa G114-2.0MW), για αυτό και γίνεται προσομοίωσή της από το μηδέν. Ακολουθεί σχήμα από τη ρουτίνα υπολογισμού, στο οποίο φαίνονται τα χαρακτηριστικά της εν λόγω ανεμογεννήτριας, όπως προσομοιώνονται μέσα στο λογισμικό.



Σχήμα 6.3: Χαρακτηριστικά της Gamesa G114-2.0MW από το WAsP Turbine Editor.

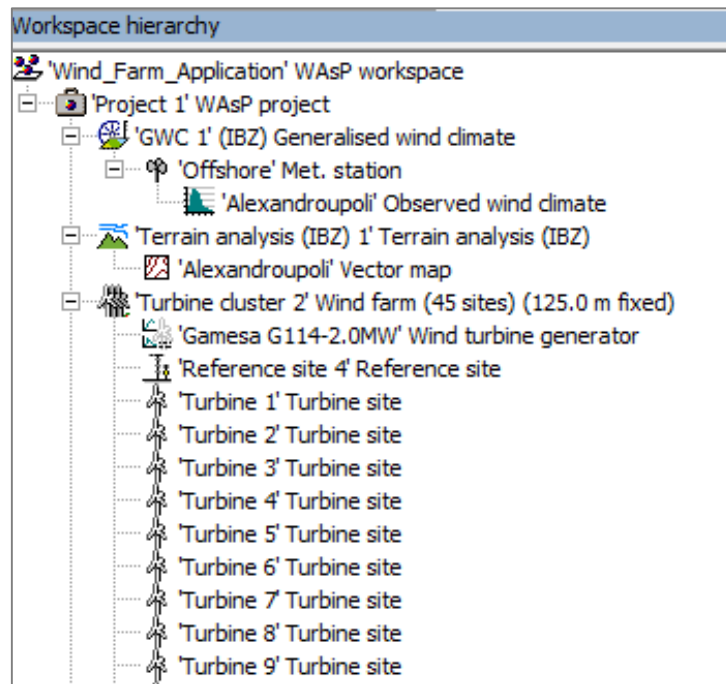
## 6.2 Ιεραρχική δομή ενός έργου στο WAsP

Αφού έγινε η περιγραφή των υπορουτίνων που απαιτούνται για την υλοποίηση της ενεργειακής μελέτης του αιολικού πάρκου, συνέχεια έχει η δημιουργία του κυρίως προγράμματος στο περιβάλλον του WAsP, όπου τα διάφορα μέρη που δημιουργήθηκαν στις προηγούμενες ενότητες θα χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι. Η ιεραρχική δομή βάσεις της οποίας λειτουργεί το λογισμικό είναι σημαντική για τη σωστή λειτουργία του, αφού δημιουργεί τις συσχετίσεις μεταξύ των διαφόρων μερών του, ενώ μέσα στις οδηγίες χρήσης του λογισμικού υποδεικνύονται οι σωστοί τρόποι συσχέτισης.

### 6.2.1 Χώρος εργασίας (Workspace)

Η προσομοίωση του αιολικού πάρκου στο WAsP γίνεται μέσω ενός Χώρου Εργασίας (Workspace), εντός του οποίου τα διάφορα μέρη ακολουθούν μια συγκεκριμένη ιεραρχική δομή, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 6.4. Αρχικά ορίζεται εντός του Χώρου Εργασίας ένα Έργο (Project), το οποίο θα περιλαμβάνει όλες τις άλλες ενότητες.





Σχήμα 6.4: Ιεραρχική δομή του χώρου εργασίας.

### 6.2.2 Ανάλυση εδάφους (Terrain analysis)

Σε αυτό το Έργο αντιστοιχίζεται ο χάρτης της περιοχής μελέτης, ώστε να δοθεί στο λογισμικό το ανάγλυφο και η τραχύτητά του για την εν λόγω περιοχή μελέτης. Αυτή η διαδικασία υλοποιείται μέσω δημιουργίας μιας ανάλυσης εδάφους (Terrain analysis (IBZ)), στην οποία εισάγεται ο χάρτης που δημιουργήθηκε στην ενότητα 6.1.1. Αξίζει να σημειωθεί πως η ανάλυση εδάφους στο WASP μπορεί να είναι δύο τύπων: IBZ ή CFD. Η πρώτη, η οποία και χρησιμοποιείται στην εν λόγω μελέτη αντιστοιχεί στα κλασσικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται στις προηγούμενες εκδόσεις του WASP και στα οποία η αλλαγή της τραχύτητας του εδάφους βασίζεται στη θεωρία της εσωτερικής οριακής στρώσης και στο γραμμικοποιημένο μοντέλο ροής BZ. Αυτά τα μοντέλα αποτελούν τη βάση του WASP από τη δημιουργία του, το 1987. Η λειτουργία CFD αποτελεί μια σχετικά νέα προσθήκη στο λογισμικό, κατά την οποία η τραχύτητα του εδάφους υπολογίζεται κάνοντας χρήση της μεθόδου της δυναμικής ρευστομηχανικής (Computational Fluid Dynamics), για την οποία υποστηρίζεται ο κώδικας (solver) "EllipSys".

### 6.2.3 Γενικευμένο κλίμα ανέμου (Generalized wind climate)

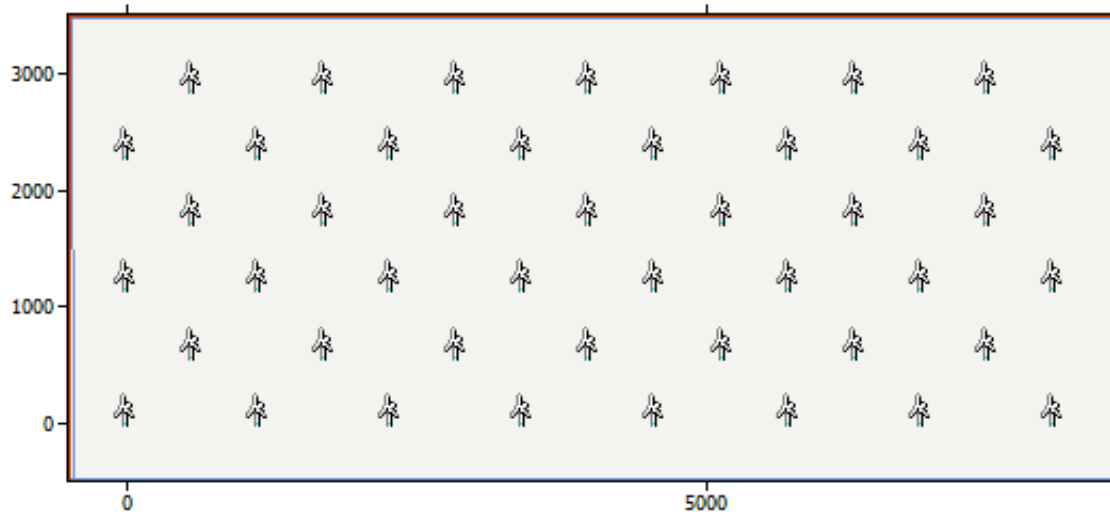
Στο ίδιο Έργο αντιστοιχίζεται έπειτα μια διαδικασία υπολογισμού του γενικευμένου κλίματος ανέμου ((IBZ) Generalized wind climate), για το οποίο ορίζεται ένας σταθμός καταγραφής των αιολικών δεδομένων (Met. station) και στον οποίο εισάγονται οι καταγραφές του αιολικού δυναμικού (Observed wind climate), όπως δημιουργήθηκαν από τη σχετική υπορουτίνα που περιγράφηκε στην ενότητα 6.1.2.

### 6.2.4 Αιολικό πάρκο (Wind farm)

Έπειτα, ακολουθεί ο ορισμός της θέσης και του τύπου των μηχανών που αποτελούν το αιολικό πάρκο. Αυτό διενεργείται μέσω της λειτουργίας Αιολικού Πάρκου (Wind Farm), στην οποία ορίζονται οι θέσεις των ανεμογεννητριών (Turbine sites) και ο τύπος της ανεμογεννήτριας που χρησιμοποιείται. Οι θέσεις μπορούν να



δοθούν στο λογισμικό σε μορφή λίστας, ενώ ο τύπος της ανεμογεννήτριας εισάγεται αφού έχει δημιουργηθεί σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα 6.1.3. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται σχηματικά το υπό μελέτη υπεράκτιο αιολικό πάρκο, το οποίο αποτελείται από 45 ανεμογεννήτριες τύπου Gamesa G114-2.0MW.



Σχήμα 6.5: Χάρτης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου.

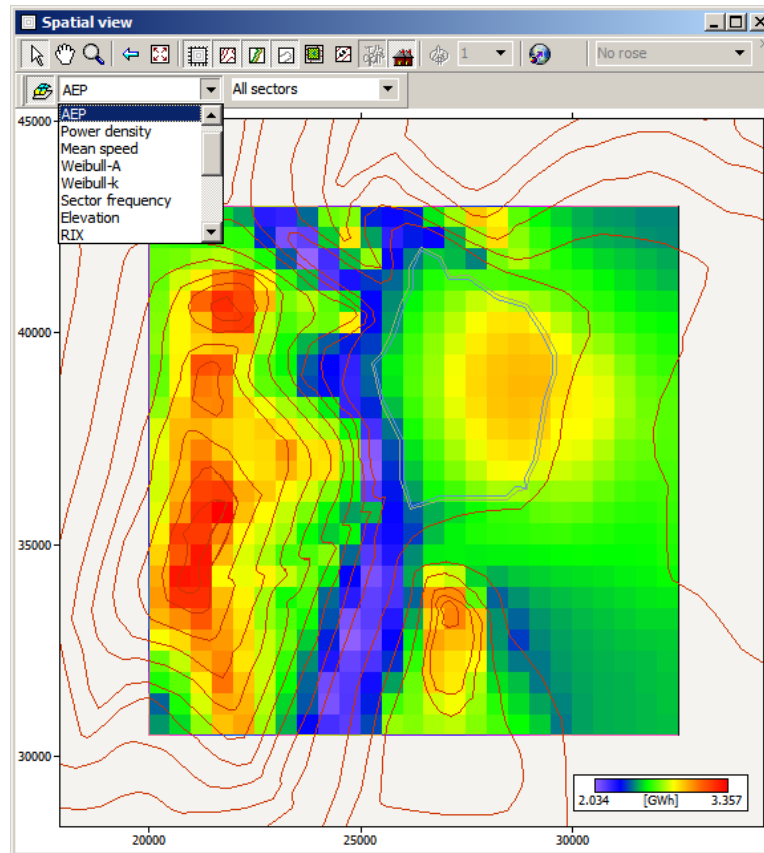
### 6.2.5 Εμπόδια (Obstacles)

Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης φυσικών εμποδίων, τα οποία μειώνουν το προς εκμετάλλευση αιολικό δυναμικό της περιοχής. Εγγύς της μελετώμενης περιοχή μελέτης δεν υπάρχει κάποιο φυσικό εμπόδιο που να παρεμβαίνει αρνητικά στο αιολικό δυναμικό της περιοχής. Έτσι, οι μόνες απώλειες σκίασης στις ανεμογεννήτριες οφείλονται στην ίδια τους την παρουσία, καθώς η μια επηρεάζει τη λειτουργία της άλλης, μέσω φαινομένων εξασθένησης του ανέμου. Για το λόγο αυτό και στην προμελέτη προβλέφθηκαν ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ των ανεμογεννητριών, προς μείωση τέτοιων φαινομένων εξασθένησης. Στα κείμενα επεξήγησης του λογισμικού αναφέρεται ένας εμπειρικός κανόνας για τις αποστάσεις των ανεμογεννητριών, σύμφωνα με τον οποίο δε θα πρέπει να απέχουν λιγότερο από 5 έως 9 διαμέτρους κατά την κύρια διεύθυνση του ανέμου και λιγότερο από 3 έως 5 διαμέτρους κατά τη διεύθυνση κάθετα στην κύρια διεύθυνση του ανέμου. Η φιλοσοφία αυτή ακολουθήθηκε κατά το σχεδιασμό του αιολικού πάρκου στην ενότητα 4.5.

### 6.2.6 Χάρτης πόρων (Resource grid)

Εντός ενός έργου είναι δυνατή η δημιουργία μιας περιοχής, εντός της οποίας υπολογίζονται διάφορα από τα μεγέθη της ανάλυσης, τα οποία εμφανίζουν χωρικές μεταβολές. Αλλάζουν δηλαδή από σημείο σε σημείο. Μεταξύ άλλων, είναι δυνατή η γραφική απεικόνιση της παραγωγής ενέργειας, των συντελεστών της κατανομής Weibull. Έτσι, το εργαλείο αυτό είναι χρήσιμο στο σχεδιασμό ενός χερσαίου αιολικού πάρκου, αφού μπορούν να εξεταστούν πιθανές θέσεις των ανεμογεννητριών έχοντας ως κριτήριο τη μέγιστη αποδοτικότητα, τις ελάχιστες απώλειες ή/και συγκεκριμένες ταχύτητες ανέμου που θα οδηγήσουν σε αυτές, για δεδομένη αιολική μηχανή. Χαρακτηριστικά παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6 η συνολική παραγόμενη ενέργεια σε κάθε θέση, για μια δεδομένη αιολική μηχανή.

Ενώ η λειτουργία αυτή είναι χρήσιμη για το σχεδιασμό αιολικών πάρκων σε έντονα ανάγλυφα, στην προκειμένη μελέτη δε βρίσκει εφαρμογή, αφού το ανάγλυφο είναι οριζόντιο. Παρ' όλα αυτά, είναι καλό να γνωρίζουμε τις δυνατότητες κάθε λογισμικού για την ευκολότερη επίλυση μελλοντικών προβλημάτων.



Σχήμα 6.6: Χάρτης πόρων για μια περιοχή [εγχειρίδιο χρήσης WAsP].

## 6.3 Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ενεργειακής μελέτης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου. Τα αποτελέσματα αυτά αφορούν αρχικά τον υπολογισμό του αιολικού δυναμικού στο υψόμετρο τοποθέτησης των ανεμογεννητριών και έπειτα τον υπολογισμό του μικτού κέρδους και του καθαρού, μετά την αφαίρεση των απωλειών.

### 6.3.1 Αιολικό δυναμικό

Στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου αυτού παρουσιάστηκαν τα χαρακτηριστικά του ανέμου σε διάφορα υψόμετρα αναφοράς. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του ανέμου στο υψόμετρο τοποθέτησης των ανεμογεννητριών 125 m.



**Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά του ανέμου στο υψόμετρο τοποθέτησης των ανεμογεννητριών.**

Γωνία [°]	A [m/s]	k	Συχνότητα [%]	U [m/s]
0	8.6	1.87	20.85	7.66
22.5	8.2	1.88	17.03	7.31
45	7.8	2.48	9.12	6.9
67.5	10.4	2.82	4.88	9.25
90	11	3.1	1.82	9.88
112.5	11	3.02	1.62	9.87
135	10.3	2.57	1.46	9.15
157.5	9.2	2.32	2.08	8.16
180	9.1	2.27	8.5	8.04
202.5	9.4	2.24	14.74	8.33
225	11.2	2.49	3.96	9.94
247.5	11.9	2.37	1.26	10.57
270	12	2.31	1.31	10.63
292.5	11.8	2.22	0.85	10.43
315	9.8	1.72	2.22	8.75
337.5	8.6	1.77	8.3	7.69

### 6.3.2 Ετήσια παραγωγή ενέργειας (Annual Energy Production)

Ο Πίνακας 6.3 περιέχει τη μικτή και την καθαρή παραγόμενη ενέργεια για τη συνολική λειτουργία του υπεράκτιου αιολικού πάρκου, τη μέση, την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή των παραπάνω ανά ανεμογεννήτρια, όπως και το ποσοστό των απωλειών για τη συνολική λειτουργία του πάρκου.

Πίνακας 1.1

**Πίνακας 6.3: Συνολική παραγόμενη ενέργεια και απώλειες.**

Παράμετρος	Σύνολο	Μέση Τιμή	Ελάχιστο	Μέγιστο
Καθαρή παραγόμενη ενέργεια (Net AEP) [GWh]	424.101	9.424	9.232	9.775
Μικτή παραγόμενη ενέργεια (Gross AEP) [GWh]	455.775	10.128	10.128	10.128
Απώλειες σκίασης (Wake loss) [%]	6.95	-	-	-

Στην ενότητα 4.5.4, η ετήσια καθαρή παραγόμενη ενέργεια είχε υπολογιστεί για την ανεμογεννήτρια Gamesa G114-2.0MW σε επίπεδο προμελέτης ίση με: 329.217 GWh, σχεδόν 100 GWh λιγότερη από τα 424.101 GWh που προκύπτουν από την ανάλυση στο WAsP. Παρατηρούμε λοιπόν πώς οι υπολογισμοί στο χέρι ήταν από τη μεριά της ασφαλείας, όμως κρίνονται υπερσυντηρητικοί και συνεπώς αντισυμβατικοί. Η μεγάλη αυτή διαφορά



οφείλεται στις απλοποιήσεις που έγιναν κατά τους υπολογισμούς της προμελέτης, αφενός στον υπολογισμό του αιολικού δυναμικού και αφετέρου στον υπολογισμό του ποσοστού απόδοσης των ανεμογεννητριών.

Ενδιαφέρον έχει να παρατηρήσουμε πώς οι απώλειες σκίασης είχαν θεωρηθεί 5% κατά τη φάση προμελέτης, ενώ η ανάλυση του WAsP τις ανάγει σε 6.95%. Παρ' όλα αυτά, θα πρέπει να τονιστεί πώς στη φάση προμελέτης είχαν ληφθεί υπόψη πρόσθετες απώλειες 3% λόγω μεταφοράς του ρεύματος μέσω των καλωδίων, οι οποίες δε συμπεριλαμβάνονται στις αναλύσεις του WAsP. Συνεπώς, η πραγματική ετήσια καθαρή παραγόμενη ενέργεια βρίσκεται κάπου στη μέση, μεταξύ της υπερδιαστασιολόγησης της προμελέτης και των εξορθολογισμένων υπολογισμών από το λογισμικό.

Ο Πίνακας 6.4 περιέχει την καθαρή παραγόμενη ενέργεια και το ποσοστό των απωλειών ανά ανεμογεννήτρια, για το σύνολο των πιθανών διευθύνσεων ανέμου.

**Πίνακας 6.4: Καθαρή παραγόμενη ενέργεια και απώλειες ανά ανεμογεννήτρια.**

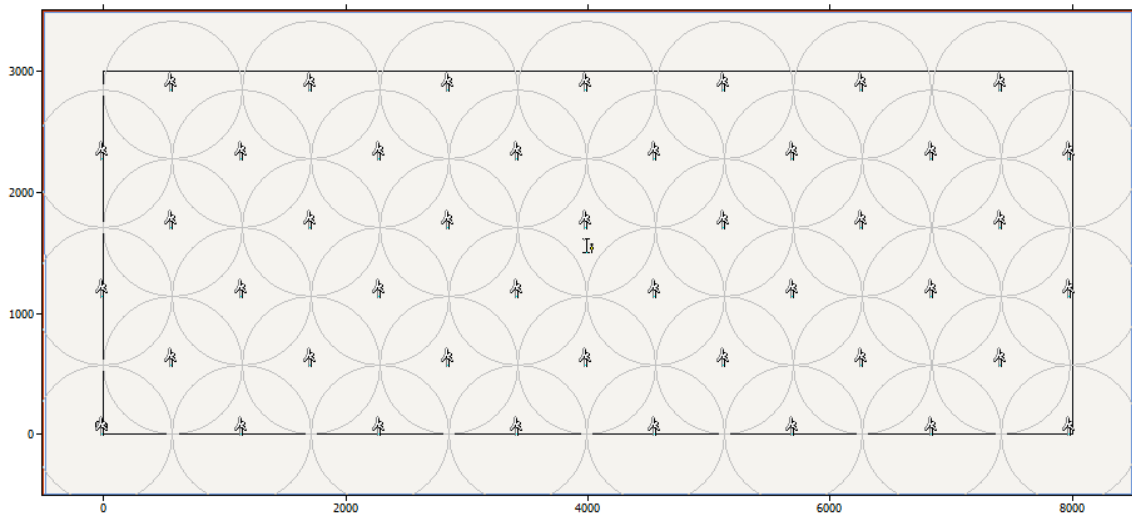
Ανεμογεννήτρια	Τοποθεσία [m]	Απώλειες σκίασης [%]	Μικτή παραγόμενη ενέργεια (Gross AEP) [MWh]	Καθαρή παραγόμενη ενέργεια (Net AEP) [MWh]	Απόδοση [%]
Turbine 1	(0, 0)	7.34	10128.323	9384.856	92.66
Turbine 2	(1140, 0)	8.64	10128.321	9253.308	91.36
Turbine 3	(2280, 0)	8.83	10128.321	9233.982	91.17
Turbine 4	(3420, 0)	8.85	10128.321	9231.933	91.15
Turbine 5	(4560, 0)	8.78	10128.321	9238.777	91.22
Turbine 6	(5700, 0)	8.47	10128.321	9270.102	91.53
Turbine 7	(6840, 0)	7.67	10128.321	9351.063	92.33
Turbine 8	(7980, 0)	3.88	10128.322	9735.289	96.12
Turbine 9	(570, 570)	8.05	10128.323	9312.973	91.95
Turbine 10	(1710, 570)	8.46	10128.323	9271.663	91.54
Turbine 11	(2850, 570)	8.53	10128.323	9264.148	91.47
Turbine 12	(3990, 570)	8.51	10128.323	9266.258	91.49
Turbine 13	(5130, 570)	8.37	10128.321	9280.499	91.63
Turbine 14	(6270, 570)	8.0	10128.321	9318.177	92.0
Turbine 15	(7410, 570)	6.64	10128.322	9455.749	93.36
Turbine 16	(0, 1140)	7.03	10128.323	9415.981	92.97
Turbine 17	(1140, 1140)	8.53	10128.323	9264.292	91.47
Turbine 18	(2280, 1140)	8.68	10128.322	9249.109	91.32
Turbine 19	(3420, 1140)	8.72	10128.322	9245.293	91.28
Turbine 20	(4560, 1140)	8.69	10128.321	9248.514	91.31
Turbine 21	(5700, 1140)	8.45	10128.321	9272.643	91.55
Turbine 22	(6840, 1140)	7.82	10128.323	9336.501	92.18
Turbine 23	(7980, 1140)	4.52	10128.321	9670.462	95.48
Turbine 24	(570, 1710)	7.67	10128.322	9351.591	92.33
Turbine 25	(1710, 1710)	8.18	10128.321	9299.975	91.82
Turbine 26	(2850, 1710)	8.27	10128.323	9291.056	91.73
Turbine 27	(3990, 1710)	8.26	10128.321	9291.535	91.74
Turbine 28	(5130, 1710)	8.2	10128.321	9298.124	91.8
Turbine 29	(6270, 1710)	7.9	10128.321	9328.378	92.1
Turbine 30	(7410, 1710)	6.92	10128.321	9427.901	93.08
Turbine 31	(0, 2280)	4.0	10128.322	9723.081	96.0
Turbine 32	(1140, 2280)	6.05	10128.322	9515.310	93.95
Turbine 33	(2280, 2280)	6.29	10128.322	9491.723	93.71
Turbine 34	(3420, 2280)	6.36	10128.323	9484.154	93.64
Turbine 35	(4560, 2280)	6.35	10128.322	9485.483	93.65
Turbine 36	(5700, 2280)	6.18	10128.322	9502.775	93.82



Turbine 37	(6840, 2280)	5.76	10128.323	9544.720	94.24
Turbine 38	(7980, 2280)	3.49	10128.321	9774.831	96.51
Turbine 39	(570, 2850)	3.74	10128.322	9749.116	96.26
Turbine 40	(1710, 2850)	4.62	10128.322	9660.400	95.38
Turbine 41	(2850, 2850)	4.75	10128.322	9647.172	95.25
Turbine 42	(3990, 2850)	4.78	10128.323	9644.530	95.22
Turbine 43	(5130, 2850)	4.74	10128.322	9648.460	95.26
Turbine 44	(6270, 2850)	4.59	10128.323	9663.664	95.41
Turbine 45	(7410, 2850)	4.18	10128.322	9705.055	95.82

Με βάση τον πίνακα αυτό επιβεβαιώνεται η επιτυχής επιλογή των αποστάσεων μεταξύ των ανεμογεννητριών, καθώς στο σύνολό τους βλέπουμε υψηλές αποδόσεις, πάνω από 90%. Ο πίνακας αυτός μας δείχνει ακόμα γιατί έχουμε σημαντικές διαφορές σε σχέση με τα αποτελέσματα της προμελέτης, αφού τότε για όλες τις ανεμογεννήτριες είχαμε υποθέσει ίδιο ποσοστό απόδοσης, κάτι που βλέπουμε πώς δεν ισχύει στην πραγματικότητα, αφού ανάλογα με τη θέση κάθε ανεμογεννήτριας και το ροδόγραμμα του ανέμου, έχουμε ανεμογεννήτριες με διαφορετικά ποσοστά απόδοσης.

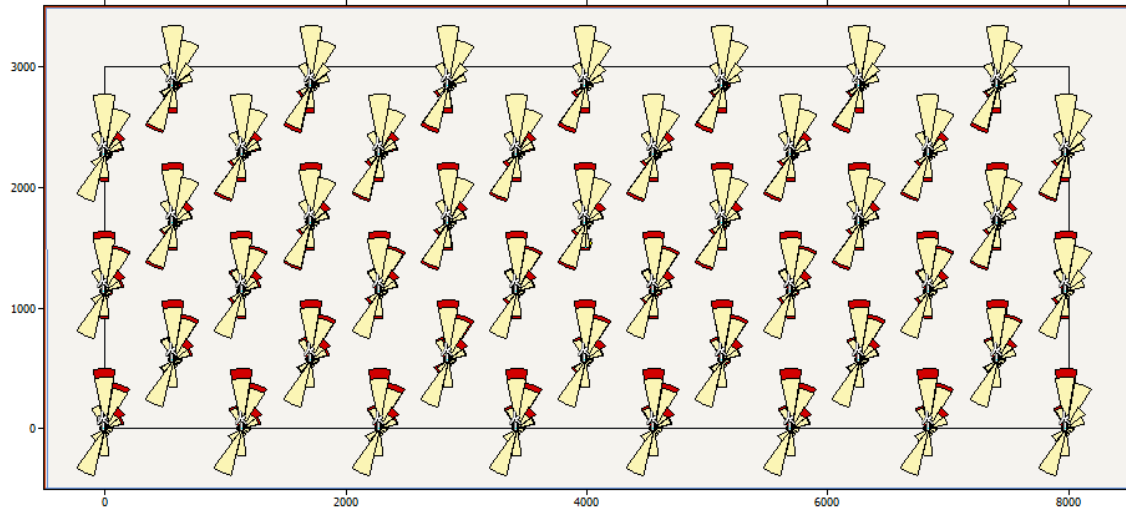
Στο Σχήμα 6.7 παρουσιάζεται σχηματικά η εγγύτητα των ανεμογεννητριών. Ο μεγάλος κύκλος γύρω από κάθε ανεμογεννήτρια έχει διάμετρο ίση με 10 φορές την πραγματική διάμετρο του ρότορα.



Σχήμα 6.7: Εγγύτητα ανεμογεννητριών (Obstacle effects).

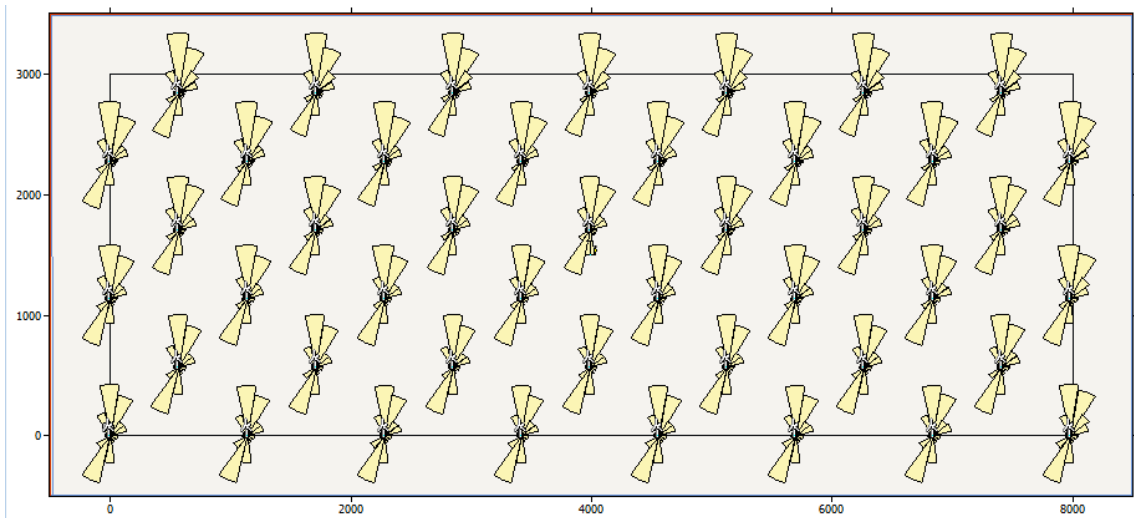
Στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζεται σχηματικά στη θέση κάθε ανεμογεννήτριας η μικτή παραγόμενη ενέργεια ανά κατεύθυνση (μπεζ χρώμα) και οι απώλειες λόγω εξασθένησης της ταχύτητας του ανέμου που οφείλεται στη γειτνίαση των ανεμογεννητριών (κόκκινο χρώμα). Είναι φανερό πώς μεγαλύτερες απώλειες εμφανίζονται σε εκείνες τις κατευθύνσεις όπου τα εμπόδια είναι περισσότερα.





**Σχήμα 6.8:** Σχηματική απεικόνιση της μικτής παραγόμενης ενέργειας και των απωλειών.

Ακολουθεί παρουσίαση της καθαρής παραγόμενης ενέργειας κάθε ανεμογεννήτριας, μετά την αφαίρεση των απωλειών σκίασης.



**Σχήμα 6.9:** Σχηματική απεικόνιση της καθαρής παραγόμενης ενέργειας και των απωλειών.



## Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα

Στην Ελλάδα όπως προαναφέρθηκε το αιολικό δυναμικό είναι αρκετά υψηλό και ιδιαίτερα στις παράκτιες περιοχές όπου το τοπικό δυναμικό είναι από τα υψηλότερα της Ευρώπης. Η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ελλάδα, είχε αργούς ρυθμούς ανάπτυξης παρά το έντονο επενδυτικό ενδιαφέρον από τις αρχές του 2000. Σύμφωνα με την ΡΑΕ (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας το ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα έχει τη δυνατότητα απορρόφησης τουλάχιστον 5500 MW αιολική ισχύς χωρίς να παρουσιάσει προβλήματα αξιοπιστίας και ο αριθμός αυτός μπορεί να φτάσει τα 6200 MW αν συμπεριληφθούν και οι μη συνδεδεμένες ανεμογεννήτριες που βρίσκονται στα νησιά.

Από τη μελέτη για την κατασκευή ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου στη περιοχή της Αλεξανδρούπολης, προέκυψε πως μια τέτοια επένδυση θα ήταν εποικοδομητική και θα συνέβαλε σημαντικά στη προσπάθεια της Ελλάδας να πετύχει τους στόχους που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση, σχετικά με τη καταπολέμηση των κλιματικών αλλαγών με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών. Επιπλέον μελετήθηκαν το κόστος και η περίοδος απόσβεσης της επένδυσης και κρίθηκε πως για διάρκεια ζωής 20 χρόνων στα πρώτα δέκα χρόνια θα έχει γίνει η απόσβεση και για τα επόμενα δέκα θα προσφέρει καθαρό κέρδος.

Ωστόσο μια τέτοια εγκατάσταση παρουσιάζει πολλές δυσκολίες καθώς με βάση τα κριτήρια χωροθέτησης ανεμογεννητριών τα οποία θεσπίστηκαν το 2008, υπάρχουν περιορισμοί στις εγκαταστάσεις υπεράκτιων αιολικών πάρκων, καθώς θέτουν περιορισμούς με βάση τις αποστάσεις από άλλες περιοχές την οπτική όχληση από τις ανεμογεννήτριες.

Στην Ελλάδα σήμερα υπάρχουν σχέδια για τη κατασκευή υπεράκτιων αιολικών πάρκων ρηχών νερών (θεμελιωμένα στο βυθό) με συνολική ισχύ 2681 MW. Οι κατασκευές αυτές αφορούν τις περιοχές της Αλεξανδρούπολης, του Πόρτο Λάγους, της Λήμνου, του Αντίρριου, τα Διαπόντια νησιά, την Κύμη και την Ναύπακτο. Πρόκειται κατά κανόνα για μεγάλα έργα, πολλά από τα οποία αφορούν και διασυνδέσεις νησιωτικών συμπλεγμάτων με το ηπειρωτικό σύστημα.

Τελικώς, στην εργασία αυτή διαστασιολογήθηκε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο και υπολογίστηκε το κόστος και η δυνατότητα απόσβεσής του κατά τη διάρκεια ζωής του. Αρχικά ο ενεργειακός υπολογισμός του αιολικού πάρκου πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο προμελέτης, στο οποίο εξετάστηκαν δύο εναλλακτικές ανεμογεννήτριες και βρέθηκε η ενεργειακά και η οικονομικά βέλτιστη, ενώ τα αποτελέσματα δείχνουν μικρές διαφορές μεταξύ των δύο, δεδομένου πως έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά.

Για το μοντέλο της ανεμογεννήτριας που χαρακτηρίστηκε βέλτιστο, έγινε προσομοίωση του αιολικού πάρκου στο λογισμικό WAsP, όπου υπολογίστηκαν με ακριβέστερο τρόπο το αιολικό δυναμικό της περιοχής, η παραγόμενη ενέργεια και οι απώλειες στην παραγωγή της. Τα αποτελέσματα δείχνουν σημαντική διαφορά μεταξύ του ενεργειακού υπολογισμού σε επίπεδο προμελέτης και του αναλυτικού, με τους υπολογισμούς της προμελέτης να βρίσκονται στην πλευρά της ασφαλείας (αλλά και της αντιοικονομικότητας).



## Παράρτημα Α

### Vestas V110

<b>OPERATIONAL DATA</b>		<b>GEARBOX</b>	
Rated power	2,000 kW	Type	two planetary stages and one helical stage
Cut-in wind speed	3 m/s	<b>TOWER</b>	
Cut-out wind speed	20 m/s	Type	tubular steel tower
Re cut-in wind speed	18 m/s	Hub heights	80 m (IEC IIIA), 95 m (IEC IIIA/IIIB), 110 m (IEC IIIB), 120 m (IEC IIIB) and 125 m (IEC IIIB)
Wind class	IEC IIIA	<b>NACELLE DIMENSIONS</b>	
Operating temperature range standard turbine	-20 °C to 40 °C	Height for transport	4 m
Operating temperature range low temperature turbine	-30 °C to 40 °C	Height installed (incl. CoolerTop*)	5.4 m
<b>SOUND POWER</b>		Length	10.4 m
Maximum	107.6 dB*	Width	3.5 m
	* Noise modes available	<b>HUB DIMENSIONS</b>	
<b>ROTOR</b>		Max. transport height	3.4 m
Rotor diameter	110 m	Max. transport width	4 m
Swept area	9,503 m <sup>2</sup>	Max. transport length	4.2 m
Air brake	full blade feathering with 3 pitch cylinders	<b>BLADE DIMENSIONS</b>	
<b>ELECTRICAL</b>		Length	54 m
Frequency	50/60 Hz	Max. chord	3.9 m
Generator type	4-pole (50 Hz)/6-pole (60 Hz) doubly fed generator, slip rings	Max. weight per unit for transportation	70 tonnes

Πηγή: Vestas Wind Systems A/S. V110-2.0 MW™ at a Glance. 2016, <https://www.vestas.com/>

### Gamesa G114



	G80-2.0 MW	G87-2.0 MW	G90-2.0 MW	G97-2.0 MW	G114-2.0 MW*
<b>ROTOR</b>					
Diameter	80 m	87 m	90 m	97 m	114 m
Swept area	5,027 m <sup>2</sup>	5,945 m <sup>2</sup>	6,362 m <sup>2</sup>	7,390 m <sup>2</sup>	10,207 m <sup>2</sup>
Rotational speed	9.0 - 19.0 rpm	9.0 - 19.0 rpm	9.0 - 19.0 rpm	9.6 - 17.8 rpm	7.8 - 14.8 rpm
<b>BLADES</b>					
Number of blades	3	3	3	3	3
Length	39 m	42.5 m	44 m	47.5 m	56 m
Airfoils	NACA 63.XXX + FFA-W3	DU + FFA-W3	DU + FFA-W3	Gamesa	Gamesa
Material	Pre-impregnated epoxy glass fiber	Pre-impregnated epoxy glass fiber	Pre-impregnated epoxy glass fiber	Pre-impregnated epoxy glass fiber + carbon fiber	Fiberglass reinforced with epoxy or polyester resin
<b>TOWER</b>					
Type	Modular	Modular	Modular	Modular	Modular
Height	60, 67, 78 and 100 m	67, 78, 90 and 100 m	55, 67, 78, 90 and 100 m	78, 90, 100, 104 and 120 m	80, 93, 125 m and site specific
<b>GEAR BOX</b>					
Type	1 planetary stage 2 parallel stages	1 planetary stage 2 parallel stages	1 planetary stage 2 parallel stages	1 planetary stage 2 parallel stages	1 planetary stage 2 parallel stages
Ratio	1:100.5 (50 Hz) 1:120.5 (60 Hz)	1:100.5 (50 Hz) 1:120.5 (60 Hz)	1:100.5 (50 Hz) 1:120.5 (60 Hz)	1:106.8 (50 Hz) 1:127.1 (60 Hz)	1:128.5 (50 Hz) 1:102.5 (60 Hz)
<b>GENERATOR</b>					
Type	Doubly-fed machine	Doubly-fed machine	Doubly-fed machine	Doubly-fed machine	Doubly-fed machine
Rated power	2.0 MW	2.0 MW	2.0 MW	2.0 MW	2.0 MW
Voltage	690 V AC	690 V AC	690 V AC	690 V AC	690 V AC
Frequency	50 Hz / 60 Hz	50 Hz / 60 Hz	50 Hz / 60 Hz	50 Hz / 60 Hz	50 Hz / 60 Hz
Protection class	IP 54	IP 54	IP 54	IP 54	IP 54
Power factor	0.95 CAP - 0.95 IND throughout the power range*	0.95 CAP - 0.95 IND throughout the power range*	0.95 CAP - 0.95 IND throughout the power range*	0.95 CAP - 0.95 IND throughout the power range*	0.95 CAP - 0.95 IND throughout the power range*

Πηγή: Global Technology: Everlasting Energy. Gamesa 2.0-2.5 MW: Technological evolution. Gamesa, 2014.

## Βιβλιογραφία

- Applied research. *Lithuanian Renewable Energy Promotion Action Plan 2010-2020 years*. Vilnius, 2015.
- Bailey, Helen, Kate L Brookes, και Paul M Thompson. *Assessing environmental impacts of offshore wind farms: lessons learned and recommendations for the future*. BioMed Central Ltd., 2004.
- Bailey, Helen, Kate L Brookes, και Paul M Thompson. *Assessing environmental impacts of offshore wind farms: lessons learned and recommendations for the future*. Aquatic Biosystems, 2014.
- Bergström, Lena, Lena Kautsky, Torleif Malm, Hans Ohlsson, και Magnus Wahlberg. *Effects of wind power on marine life – a summary*. Vindval, n.d.
- Burgermeister, Jane . *Germany: The World's First Major Renewable Energy Economy*. <http://www.renewableenergyworld.com/>, 2015.
- Cowgill, Ryan T., Byron Haley, και Whitham Chris. *Wind Turbine Rotor Design-Final Design Report*. Boise State University, 2006.
- Datamonitor Energy. *Renewable the star player in Italy*. July 16, 2014.
- Department of Energy and Climate Change. *Digest of UK energy statistics' (DUKES) - Chapter 6: Renewable Sources of energy*. 2015.
- Dong Energy. *Horns Rev 2*. London, 2010.
- e2p energias endogenas de portugal. *Parques Eólicos em Portugal : Wind Farms in Portugal*. December 2013



- Elliniki Technodomiki Anemos. *Πláνο ανάπτυξης στην Ελλάδα*. 2010.
- Energy and Industrial Strategy. *Electricity Market Reform: Contracts for Difference*. Department for Business, 2016.
- EurObserv'ER. *The EurObserv'ER barometers*. 2016. <https://www.eurobserv-er.org/>.
- Eurostat . *Share of renewable energy in gross final energy consumption*. October 2016.
- EWEA : The European Wind Energy Association. *Wind in power: 2013 European statistics*. 2014.
- . *Wind in power: 2015 European statistics*. 2016.
- Federal Ministry for Economic Affairs and Energy , Germany. *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland*. Berlin, August 2016.
- Global Technology : Everlasting Energy. *Gamesa 2.0-2.5 MW : Technological evolution*. Gamesa, 2014.
- Green Rhino Energy Ltd. *Wind Characteristics*. 2013. [http://www.greenrhinoenergy.com/renewable/wind/wind\\_characteristics.php](http://www.greenrhinoenergy.com/renewable/wind/wind_characteristics.php).
- Herman, S.A. *OFFSHORE WIND FARMS : Analysis of Transport and Installation Costs*. ECN, 2002.
- Houlsby, G. T., και B. W. Byrne. *Foundations for offshore wind turbines*. The Royal Society, 2003.
- Jamieson, Peter. *Offshore Wind Turbines*. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, 2011.
- Lossin, M. *Corrosion protection for offshore wind turbines*. n.d.
- meteoblue. *weather close to you*. 2017. [https://www.meteoblue.com/en/weather/archive/windrose/alexandroupoli\\_greece\\_736928](https://www.meteoblue.com/en/weather/archive/windrose/alexandroupoli_greece_736928).
- Muller, S., M. Deicke, και W. Rik. *Doubly fed induction generator systems for wind turbines*. IEEE Industry Applications Magazine, 2002.
- Northern Power Systems. *Engineering Bulletin Energy Production Estimating*. 2014.
- P. Volunt, P. H. Pedersen, et al. *First year of Operation-Performance as Planned, report for 165 MW Nysted Offshore Wind Farm*. Danimarca: Energi E2, December 2004.
- power-technology. *Thanet Offshore Wind Farm, Kent, United Kingdom*. 2015. <http://www.power-technology.com/projects/thanetwindfarm/>.
- Red Electrica Corporation. *Red Electrica de Espana Annual Report*. Red Electrica Corporation, 2015.
- Red Eléctrica de España. *Statistical data of electrical system*. January 2017.
- renewable UK. *New records set in best ever year for British wind energy generation*. 5 January 2016.
- Rosenthal, Elisabeth. *Portugal Makes the Leap to Renewable Energy*. NYT, 2015.
- Uraz, Emre. *Offshore Wind Turbine Transportation & Installation Analyses*. Visby, Sweden: Gotland University, 2011.
- van der Mijle Meijer, Harald. *Corrosion in offshore wind energy : 'a major issue'*. TNO, 2009.
- Vestas Wind Systems A/S. *V110-2.0 MW™ at a Glance*. 2016. [https://www.vestas.com/en/products/turbines/v110%202\\_0\\_mw#!](https://www.vestas.com/en/products/turbines/v110%202_0_mw#!)



- Wikipedia, the free encyclopedia. *Renewable energy in the European Union*. 2016. [https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable\\_energy\\_in\\_the\\_European\\_Union](https://en.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy_in_the_European_Union).
- Wikiwand. *Αιολικό πάρκο Κύθνου*. 2016.
- Wind Europe. *The European offshore wind industry : Key trends and statistics 2016*. windeurope.org, January 2017.
- WWF Ελλάς. *Θαλάσσιες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας*. Αθήνα, 2015.
- Αμανατίδης, Ελευθέριος. *Ανανεώσιμες Μορφές Ενέργειας*. Πάτρα, 2014.
- Καλδέλλης, Ιωάννης Κ. *Διαχείριση της αιολικής ενέργειας*. Αθ. Σταμούλη, 2005.
- ΚΑΠΕ. *Θεματικοί Χάρτες Εκτίμησης του Τεχνικά και Οικονομικά Εκμεταλεύσιμου Δυναμικού της Αιολικής Ενέργειας στον Ελληνικό Χώρο*. 2001.
- Καπλάνης, Σωκράτης Ν. *Ηπιες μορφές ενέργειας - Περιβάλλον & Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας*. ΙΩΝ, 2003.
- Μηλάρας, Σωκράτης. *Αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα, Διπλωματική εργασία*. Αθήνα: ΕΜΠ, Σχολή Χημικών Μηχανικών, 2008.
- Μπιτζιώνης, Βασίλειος Δ., και Δημήτριος Β. Μπιτζιώνης. *Εναλλακτικές μορφές ενέργειας*. Τζιόλας, 2010.
- ΝΑΥΤΕΜΠΟΡΙΚΗ - Π. ΑΘΑΝΑΣΙΑΔΗΣ & ΣΙΑ Α.Ε. *Εγκαινίασε αιολικό πάρκο στη Βοιωτία η Intrakat*. 2014.
- Τσιώλης, Σπύρος. *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.)*. Πειραιάς: Ανώτατο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Τεχνολογικού Τομέα, 2006.
- Τσολάκης, Χρήστος Ε., και Σοφία Χ. Χρυσοβιτσιώτη. *Μελέτη κάλυψης ηλεκτρικών αναγκών νησιού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας*. Αιγάλεω: Τ. Ε. Ι. Πειραιά, Ιούνιος 2014.
- Χύσκα, Λέντη, Χρυσή Σαρίδου, Ειρήνη Παπανικολάου, και Ζωή Ιακωβίδου. *Αιολική ενέργεια*. 2007.





ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ  
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών  
Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε.