



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
Εργαστήριο Στροβιλομηχανών & Ρευστοδυναμικής (TurboLab-TUC)

Αιολικά πάρκα, λήψη και επεξεργασία ανεμολογικών δεδομένων

Νικόλαος Ι. Σκορδαλός

Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων: Δρ. Ιωάννης Κ. Νικολός, Καθηγητής

Χανιά, Ιανουάριος 2022

"Intentionally left blank"



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
Εργαστήριο Στροβιλομηχανών & Ρευστοδυναμικής (TurboLab-TUC)

Αιολικά πάρκα, λήψη και επεξεργασία ανεμολογικών δεδομένων

Νικόλαος Ι. Σκορδαλός

Εγκρίνεται από:

Δρ. Ιωάννης Κ. Νικολός
Καθηγητής
Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής &
Διοίκησης

Δρ. Ανάργυρος Ι. Δελής
Αναπληρωτής Καθηγητής
Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής &
Διοίκησης

Δρ. Γεώργιος Αραμπατζής
Επίκουρος Καθηγητής
Πολυτεχνείο Κρήτης
Σχολή Μηχανικών Παραγωγής &
Διοίκησης

"Intentionally left blank"

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση της αιολικής ενέργειας και η συμβολή αυτής στην παραγωγή οφέλιμης ενέργειας, συναντάται αρκετά χρόνια πίσω και δείχνει να εντείνεται όλο και περισσότερο με το πέρασμα του χρόνου και την ανάπτυξη της τεχνολογίας, σε παγκόσμιο επίπεδο. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται αναλυτικά η έννοια του αιολικού δυναμικού και η διαθεσιμότητα σε αξιόλογα και αξιοποιήσιμα δεδομένα ανέμου από τον άνθρωπο. Περιγράφουμε ποιοί παράγοντες επηρεάζουν άμεσα το αιολικό δυναμικό και πόσο εύκολη είναι η λήψη και επεξεργασία ανεμολογικών δεδομένων, κατά τόπους. Παρατίθενται η φύση και τα είδη των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται, καθώς και ο ρόλος τους στην ανάπτυξη ενός αιολικού πάρκου, με σκοπό την ηλεκτροπαραγωγή. Ακόμη, γίνεται αναφορά σε χαρακτηριστικά και προδιαγραφές, σε αρκετά εμπορικά μοντέλα ανεμογεννητριών της σύγχρονης αγοράς, δύο μεγάλων εταιριών παγκόσμιας φήμης, και στο πως μια κατάλληλη επιλογή για χρήση μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της παραγωγικότητας. Προβλήματα που απασχολούν τους ερευνητές και τους μηχανικούς, όσον αφορά στην ταχύτητα ανέμου, είναι η ακρίβεια των μετρήσεων αλλά και η μακροχρόνια πρόβλεψη του αιολικού δυναμικού. Ο αριθμός και το ύψος των μετεωρολογικών ιστών, αλλά και οι προδιαγραφές του εξοπλισμού λήψης ανεμολογικών δεδομένων απαιτούν βέλτιστες πρακτικές για την ακριβή μέτρηση της ταχύτητας και άλλων παραμέτρων του ανέμου. Στην παρούσα εργασία αναλύονται αυτές οι πρακτικές, όπως και αναλυτικές μέθοδοι πρόβλεψης του μακροχρόνιου αιολικού δυναμικού μιας περιοχής. Παρουσιάζονται μεθοδολογίες (εκθετική, λογαριθμική, παραμέτρων) προσέγγισης ταχυτήτων ανέμου σε μεγαλύτερα ύψη, εκεί που λειτουργούν οι σύγχρονες μεγάλες ανεμογεννήτριες, όπου όμως δεν είναι πάντα εύκολη η πρόσβαση για μέτρηση, είτε είναι αρκετά κοστοβόρα. Η αξιοπιστία των μεθόδων αυτών δοκιμάζεται με πραγματικά δεδομένα ανέμου, που υπάρχουν διαθέσιμα για την Ιεράπετρα της Κρήτης. Επιπλέον, παρατίθεται πειραματική προσέγγιση της ταχύτητας ανέμου στα 100 m υψόμετρο της παραπάνω περιοχής, κάνοντας χρήση του εκθετικού και λογαριθμικού νόμου. Τέλος παρουσιάζονται σε πίνακες οι κατανομές ταχύτητας ανέμου για οκτώ περιοχές της Κρήτης που θεωρούνται από τις πιο ελκυστικές για επενδύσεις σε αιολικά πάρκα. Οι πίνακες προκύπτουν από επεξεργασία ανεμολογικών δεδομένων που συλλέγουν μετεωρολογικοί σταθμοί, σε βάθος πενταετίας, και είναι προσβάσιμα στο κοινό.

"Intentionally left blank"

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ολοκληρώνοντας την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας μου, θα ήθελα να αποδώσω ένα βαθύτατο ευχαριστώ στον επιβλέποντα σύμβουλό μου, Καθηγητή Ιωάννη Κ. Νικολό. Οι γνώσεις που μου μεταλαμπάδευσε, η υποστήριξη και η πολύτιμη καθοδήγηση που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας, συνέβαλαν στην διεκπαιρέωση αυτής της εργασίας. Οφείλω να παραδεχτώ ότι μέσα από αυτή τη συνεργασία μας, έχω πάρει ένα πολύ ωραίο και δυνατό ερέθισμα, όσον αφορά στην ακαδημαϊκή γνώση και στην επιστημονική μελέτη. Ακόμα είμαι ευγνώμων για τη φροντίδα και την αδιάκοπη στήριξη και αγάπη της οικογένειάς μου, αλλά και μερικών καλών φίλων, που στέκονται δίπλα μου και μου συμπαραστέκονται σε κάθε μου βήμα. Σε αυτούς τους ανθρώπους αφιερώνω και την παρούσα διπλωματική εργασία. Ευχαριστώ το ΚΑΠΕ (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας) για την ευγενική παραχώριση των ανεμολογικών δεδομένων για την περιοχή της Ιεράπετρας Κρήτης.

"Intentionally left blank"

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	1
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	18
Η ΧΡΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ	18
1.1 Αιολικό Δυναμικό.....	18
1.1.1 Αιολική Ενέργεια.....	18
1.1.2 Συμβολή της Αιολικής Ενέργειας.....	19
1.1.3 Αξιοποίηση Αιολικού Δυναμικού	20
1.2 Λήψη και Επεξεργασία Ανεμολογικών Δεδομένων	29
1.2.1 Η ενέργεια του ανέμου	29
1.2.2 Η Χρονική Μεταβολή της Ταχύτητας του Ανέμου	29
1.2.3 Η Μεταβολή της Ταχύτητας του Ανέμου με το Ύψος	36
1.2.4 Η Μεταβολή της Ταχύτητας του Ανέμου με τη Μορφολογία του Εδάφους ...	37
1.2.5 Η Τύρβη και η ανάπτυξη του οριακού στρώματος	37
1.3 Ανεμογεννήτριες	39
1.3.1 Ανεμογεννήτριες Οριζοντίου Άξονα.....	39
1.3.2 Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα.....	41
1.3.3 Ανεμογεννήτριες Ειδικού Τύπου	46
1.4 Αιολικά Πάρκα.....	47
1.4.1 Ανάπτυξη Αιολικού Πάρκου	47
1.4.2 Τοποθέτηση Αιολικού Πάρκου	48
1.4.3 Διαχείριση και Αποθήκευση Παραγόμενης Ενέργειας.....	49
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	51
ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ	51
2.1 VESTAS.....	51
2.1.1 Πλατφόρμα VESTAS 2 MW	51
2.1.2 Πλατφόρμα VESTAS 4 MW	54
2.1.3 Πλατφόρμα VESTAS ENVENTUS.....	58
2.2 SIEMENS-GAMESA	62

2.2.1 Siemens-Gamesa Onshore	62
2.2.2 Siemens-Gamesa Offshore.....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	68
ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ	68
3.1 Βέλτιστες Πρακτικές για την Ακριβή Μέτρηση της Ταχύτητας του Ανέμου.....	68
3.1.1 Αριθμός και ύψος των μετεωρολογικών ιστών.....	68
3.1.2 Προδιαγραφές του εξοπλισμού λήψης ανεμολογικών δεδομένων.....	69
3.2 Αναλυτικές μέθοδοι πρόβλεψης του μακροχρόνιου αιολικού δυναμικού σε μία περιοχή	72
3.2.1 Γενικά	72
3.2.2 Μέθοδοι συσχέτισης.....	74
3.2.3 Πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας ενός αιολικού πάρκου	75
3.3 Μεθοδολογίες για εύρεση της ταχυτητας του ανέμου σε μεγαλύτερα ύψη.....	78
3.4 Εφαρμογή σε ανεμολογικά δεδομένα από την Ιεράπετρα Κρήτης.....	81
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	94
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	95



"Intentionallyleftblank"

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

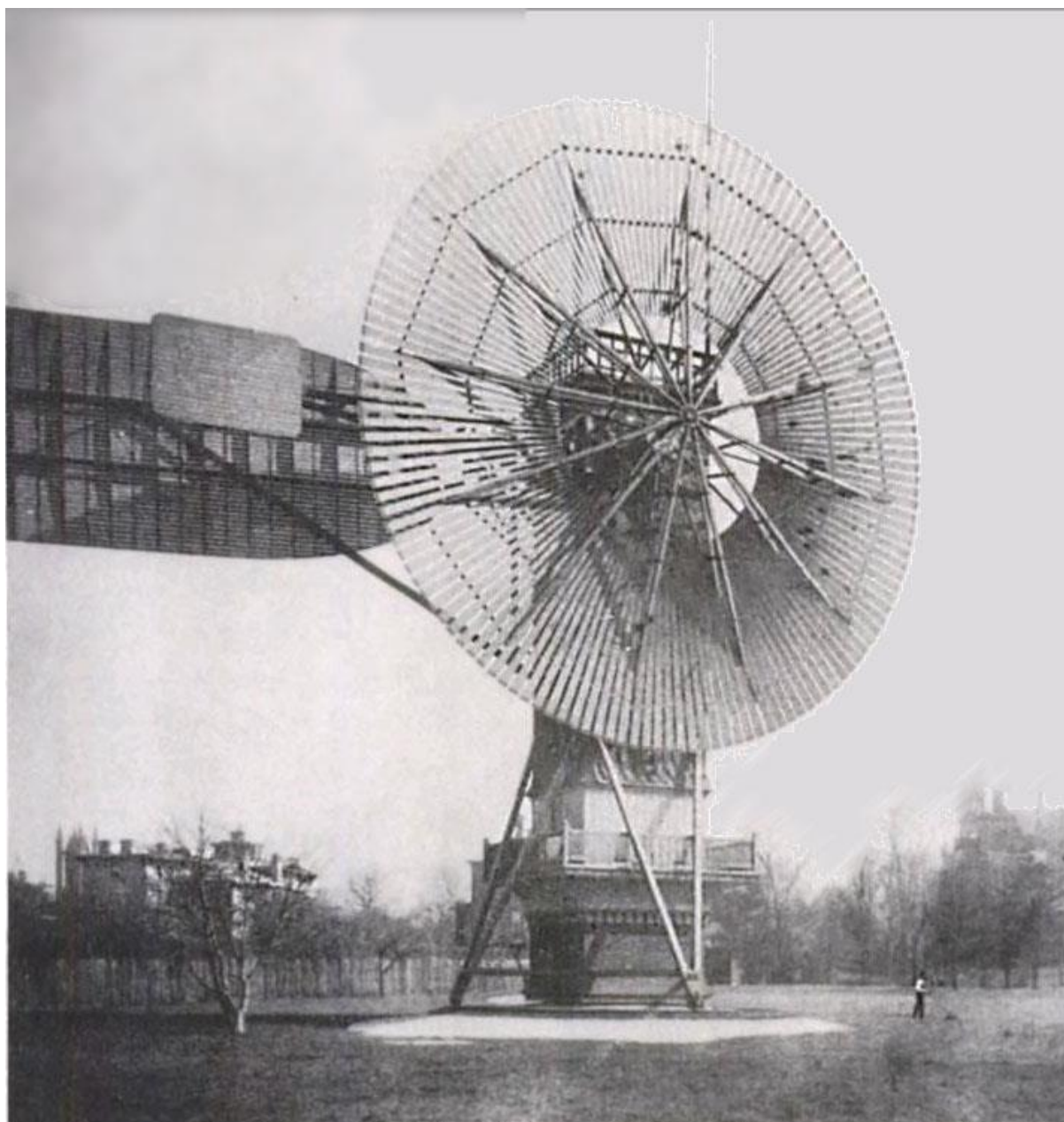
Η χρήση του ανέμου στην παραγωγή ωφέλιμης μηχανικής ισχύος φαίνεται να ξεκινάει μέχρι και 3000 χρόνια πριν, σε εφαρμογές όπως η άλεση των σιτηρών και η άντληση νερού. Η ανακάλυψη όμως φθηνών και αποδοτικών κινητήρων κατά τη βιομηχανική επανάσταση, που κάνουν χρήση των ορυκτών καυσίμων (εμβολοφόρες ατμομηχανές, ατμοστρόβιλοι, εμβολοφόρες Μηχανές Εσωτερικής Καύσης, αεριοστρόβιλοι), οδήγησε τις μεθόδους αυτές στο σκοτάδι για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Ωστόσο η χρήση ανεμογεννητριών για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εντοπίζεται για πρώτη φορά στα τέλη του 19^{ου} αιώνα, με την πρώτη ανεμογεννήτρια 12KWDC, που κατασκεύασε ο Brush στις ΗΠΑ (**Εικόνα 0.1**). Έπειτα όμως για αρκετό διάστημα του 20^{ου} αιώνα δεν υπήρχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον για μελέτη και ανάπτυξη ανάλογων αιολικών μηχανών. Και ενώ οι αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες του ανθρώπου και η βιομηχανική επανάσταση δημιουργούσαν αυξημένα επιπλέον καταναλώσεων (οι οποίες κατά βάση λειτουργούν επιβαρυντικά για το περιβάλλον), οι συμβατικές πηγές ενέργειας (από ορυκρά καύσιμα) αποτελούσαν για χρόνια τη λύση στο πρόβλημα των διαρκώς αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών.

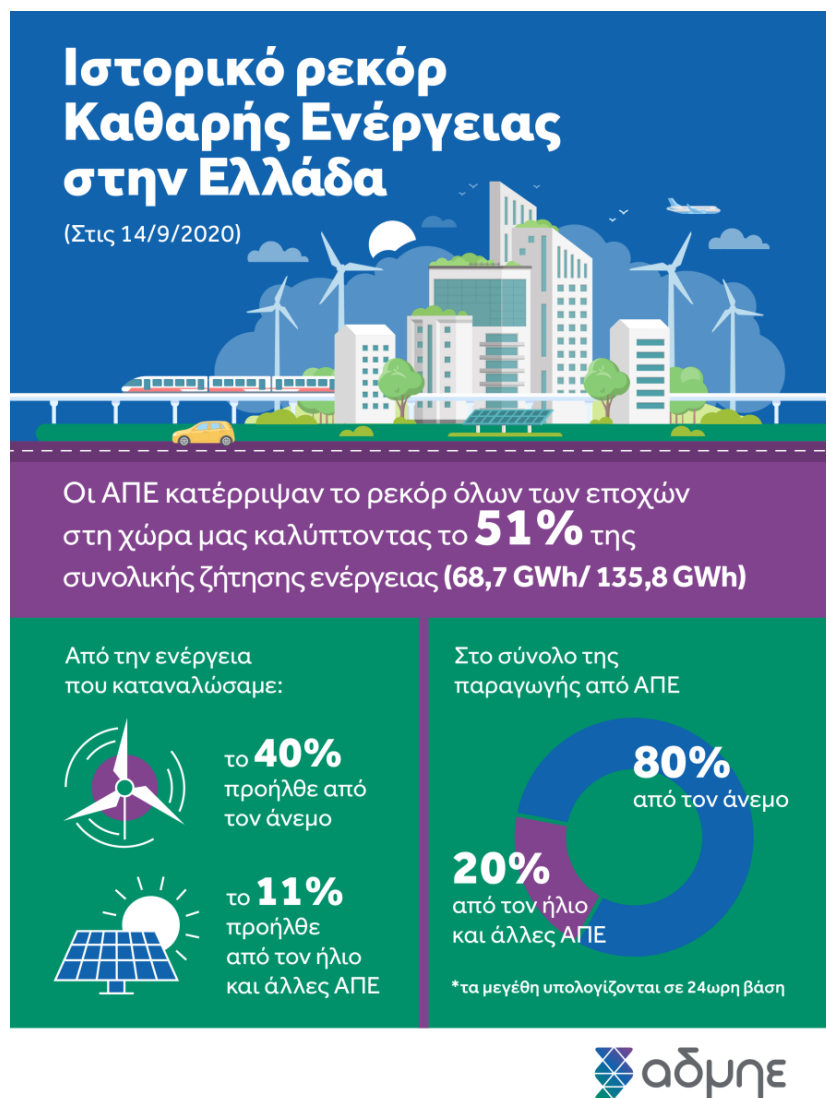
Το ενδιαφέρον άρχισε σιγά σιγά να εντείνεται μετά το 1973, οπότε υπήρξε μια ξαφνική και δραματική αύξηση στις τιμές του πετρελαίου (πετρελαϊκή κρίση). Ως αποτέλεσμα, διάφορες κυβερνήσεις ξεκίνησαν να χρηματοδοτούν προγράμματα έρευνας και εξέλιξης εναλλακτικών πηγών ενέργειας. Η επιστήμη σε συνεργασία με την τεχνολογία εστίασαν στην όσο το δυνατό καλύτερη και αμεσότερη αξιοποίηση των διαφόρων μορφών ενέργειας, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγεται και η αιολική [el.wikipedia.org].

Η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού με τη χρήση διαφόρων τύπων ανεμογεννητριών βρίσκει ιδιαίτερη ανάπτυξη σε ολόκληρο τον κόσμο τις τελευταίες δεκαετίες. Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας πρωτίστως βασίζεται σε εκτιμήσεις και επιτόπιες μετρήσεις επί του αιολικού δυναμικού της εκάστοτε περιοχής, ώστε να εξεταστεί αν είναι οικονομικά βιώσιμη η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου στη συγκεκριμένη περιοχή. Ο σχεδιασμός και η εγκατάσταση αιολικών πάρκων αποτελεί μια ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία, για την οποία πρέπει πρωτίστως να γίνουν μια σειρά εκτιμήσεων και μετρήσεων, προκειμένου να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για την ποιότητα του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού, να γίνει σωστή επιλογή της περιοχής εγκατάστασης των ανεμογεννητριών, καθώς και σωστή επιλογή του είδους, του μεγέθους, του αριθμού και της θέσης εγκατάστασης κάθε μίας ανεμογεννήτριας του πάρκου.

Στη χώρα μας τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια συνεχής αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία του ΑΔΜΗΕ, τη Δευτέρα 14 Σεπτεμβρίου 2020 οι ΑΠΕ (αιολικά, φωτοβολταϊκά) κάλυψαν το 51 % της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, ποσοστό που ανεβαίνει στο 57% αν συνυπολογιστούν τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα (**Εικόνα 0.2**). Επιπροσθέτως, την ίδια ημέρα, σύμφωνα με τα στοιχεία της WindEurope [https://windeurope.org/], που εκπροσωπεί περισσότερες από 400 επιχειρήσεις και οργανισμούς της αιολικής βιομηχανίας, ο άνεμος στη χώρα μας κάλυψε πάνω από το 40% της ζήτησης, ποσοστό που ήταν το υψηλότερο στην Ευρώπη [www.liberal.gr].



Εικόνα 0.1: Η πρώτη ανεμογεννήτρια που λειτουργούσε αυτοματοποιημένα, η οποία κατασκευάστηκε από τον Charles F. Brush το 1888 [Πηγή: wikipedia.org].



Εικόνα 0.2: Το ιστορικό ρεκόρ καθαρής ενέργειας που επιτεύχθηκε στην Ελλάδα την 14^η Σεπτεμβρίου 2020 [Πηγή: ΑΔΜΗΕ].

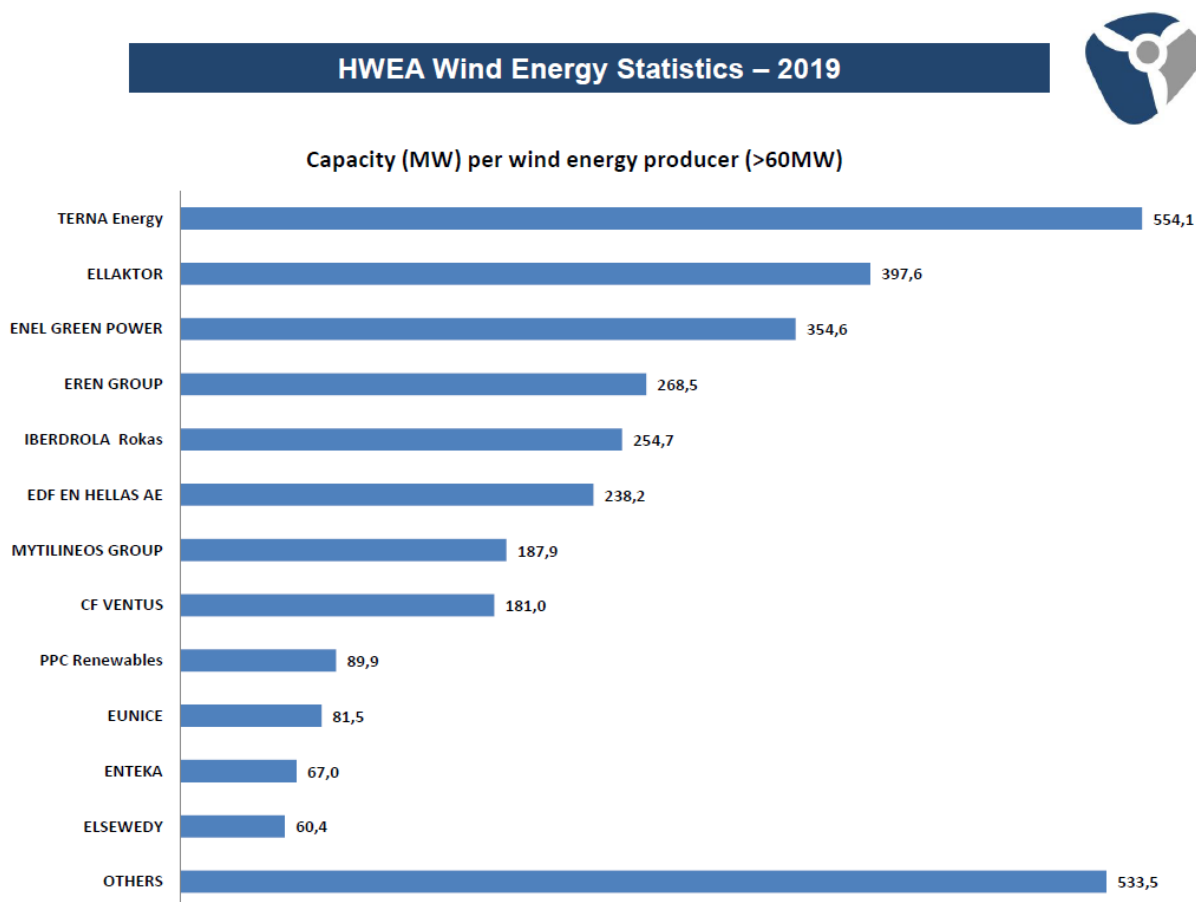


Εικόνα 0.3: Η εξέλιξη των ανεμογεννητριών [Πηγή: shaikmohasin.wordpress.com].

Η παγκόσμια παραγωγή αιολικής και ηλιακής ενέργειας υπολογίστηκε τον Ιούνιο του 2018 ότι ξεπέρασε το ορόσημο του ενός TW εγκατεστημένης ισχύος, σύμφωνα με στοιχεία του Bloomberg. Οι αναλυτές εκτιμούν ότι το δεύτερο TW αιολικής και ηλιακής ενέργειας θα επιτευχθεί στα μέσα του 2023 και θα κοστίσει περίπου 46% λιγότερο σε σχέση με το πρώτο. Το μερίδιο της κάθε πηγής είναι ισορροπημένο, με την αιολική να έχει 54% και την ηλιακή το 46%. Αξίζει να σημειωθεί πως η συνολική εγκατεστημένη ισχύς έχει αυξηθεί κατά 65 φορές από το 2000 και υπερτετραπλασιαστεί από το 2010 [naftemporiki.gr].

Μάλιστα, μέχρι το 2007 είχαν εγκατασταθεί μόλις 8 GW φωτοβολταϊκών, σε σύγκριση με τα 89 GW αιολικής ισχύος. Από τότε, η ηλιακή ενέργεια έχει αυξήσει το μερίδιο της από 8% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος σε 46%, και αναμένεται να ξεπεράσει την αιολική ενέργεια στο εγγύς μέλλον. Αν συνυπολογιστούν και οι άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της υδροηλεκτρικής ενέργειας, το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος θα υπερέβαινε ήδη τα δύο TW, ξεπερνώντας το ένα TW πριν από περίπου μια δεκαετία. Το μεγαλύτερο μέρος της ανάπτυξης στην ενδιάμεση περίοδο μπορεί να αποδοθεί στην αιολική και ηλιακή ενέργεια.

Στο τέλος του 2019, το σύνολο των αιολικών πάρκων που βρισκόταν σε εμπορική ή δοκιμαστική λειτουργία ήταν 3.576,4 MW. Η ισχύς αυτή είναι αυξημένη κατά 25,4% σε σχέση με το τέλος του 2018 [ΕΛΕΤΑΕΝ].



Εικόνα 0.4: Η διανομή της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος στην Ελλάδα στα τέλη του 2019 μεταξύ των παραγωγών (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ).

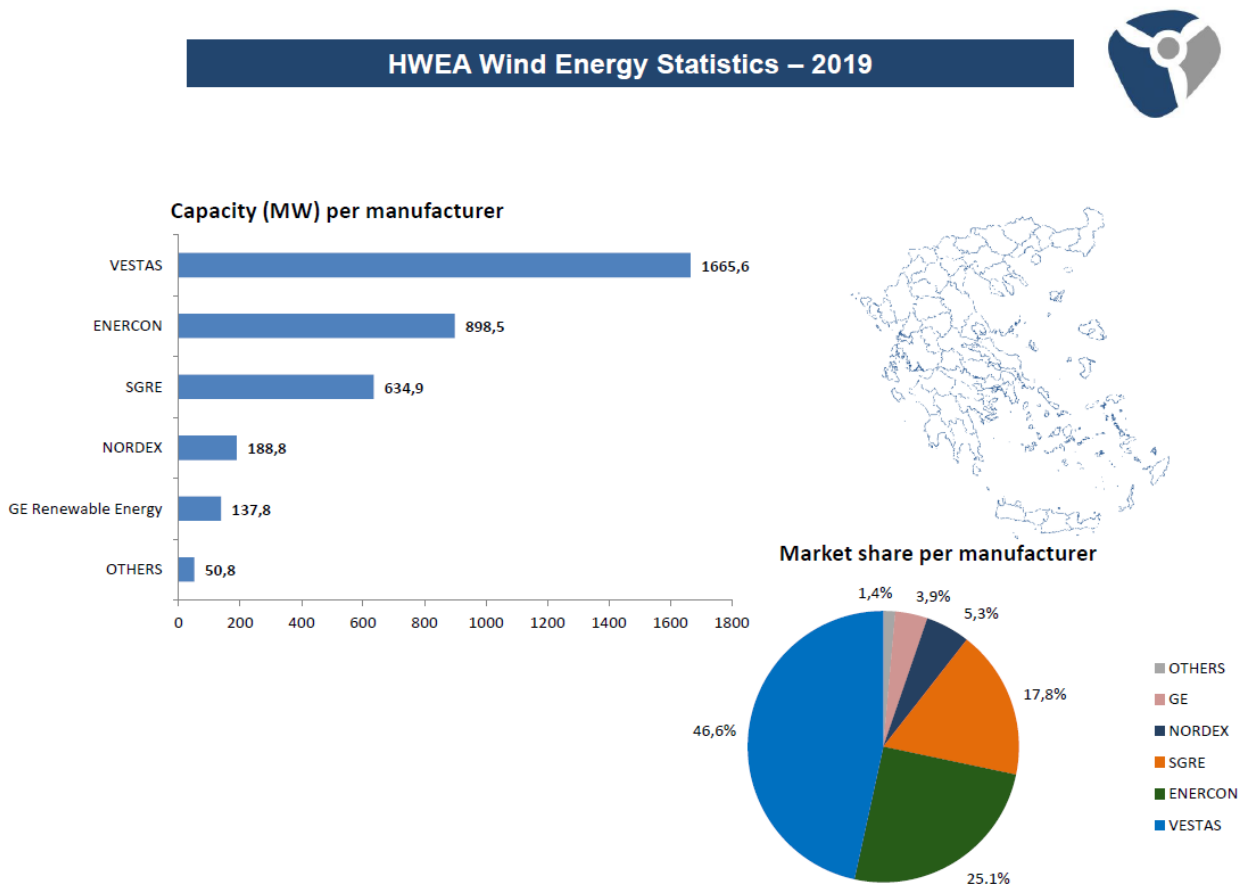
Όσον αφορά στους επιχειρηματικούς ομίλους που δραστηριοποιούνται στην Ελλάδα στην εγκατάσταση αιολικών πάρκων, στο Top-5 κατατάσσονται οι ακόλουθοι Όμιλοι [ΕΛΕΤΑΕΝ]:

1. η ΤΕΡΝΑ Ενέργειακή με 554,1 MW (15,5%)
2. η ΕΛ.ΤΕΧ. ΑΝΕΜΟΣ (ΕΛΛΑΚΤΩΡ) με 397,5 MW (11,1%)
3. η ENEL Green Power με 354,6 MW (9,9%)
4. η EREN με 268,5 MW (7,5%) και
5. η Iberdrola Rokas με 254,7 MW (7,1%).

Από το σύνολο των εν λειτουργία 3.576,4MW, το 43% ανήκει σε ξένους επενδυτές (Εικόνα 0.4).

Η εικόνα για τους κατασκευαστές των ανεμογεννητριών (που δραστηριοποιούνται στην Ελλάδα) είναι η εξής [ΕΛΕΤΑΕΝ]:

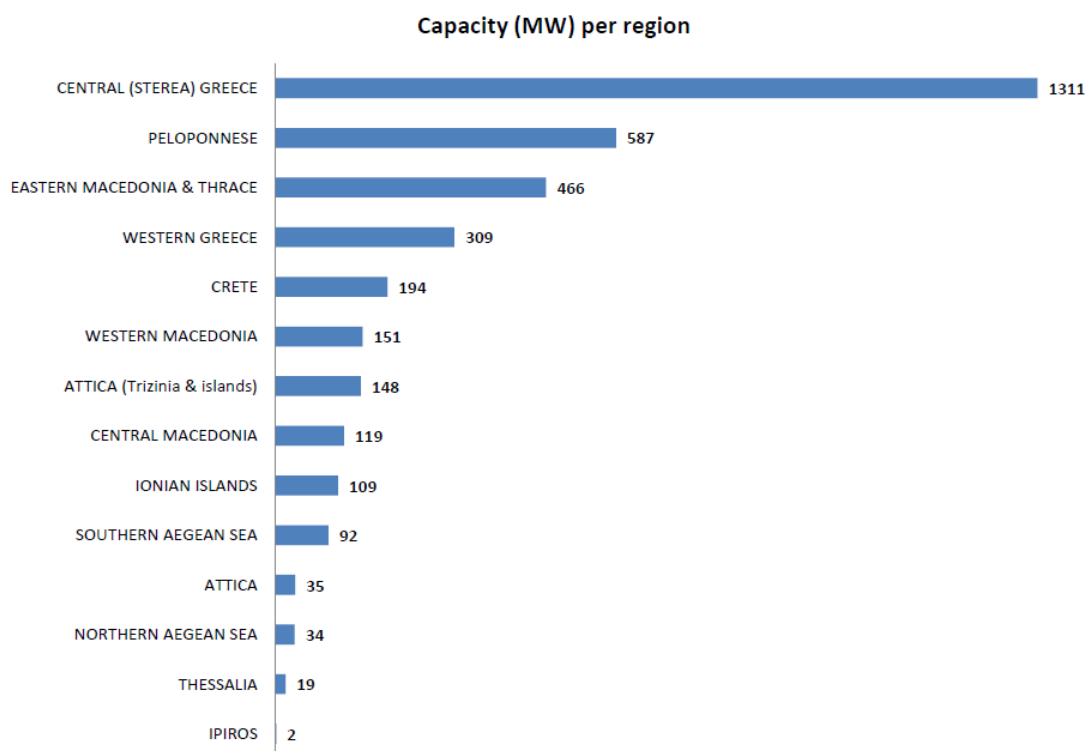
Η Vestas έχει προμηθεύσει το 46,6% της συνολικής εγκατεστημένης αιολικής ισχύος στην Ελλάδα. Ακολουθούν η Enercon με 25,1%, η Siemens Gamesa με 17,8%, η Nordex με 5,3%, η GE Renewables με 3,9% και άλλοι κατασκευαστές με 1,4% (Εικόνα 0.5).



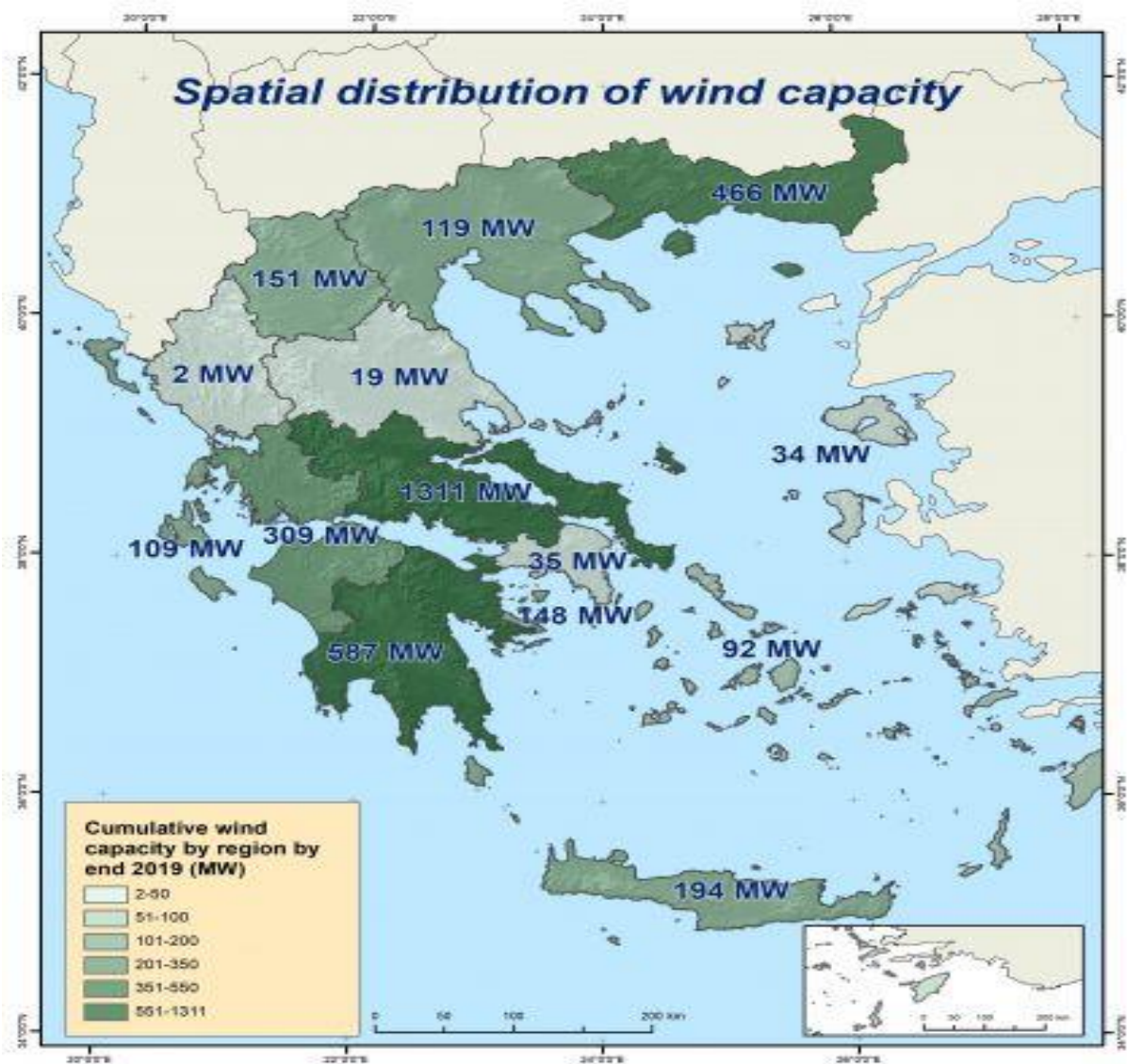
Εικόνα 0.5: Η διανομή της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος στην Ελλάδα στα τέλη του 2019 μεταξύ των μεγαλύτερων κατασκευαστών ανεμογεννητριών (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ).

Σε επίπεδο Περιφερειών, η Στερεά Ελλάδα παραμένει στην κορυφή των αιολικών εγκαταστάσεων, αφού φιλοξενεί 1.311 MW (36,7%) και ακολουθεί η Πελοπόννησος με 587 MW (16,4%) και η Ανατολική Μακεδονία – Θράκη, όπου βρίσκονται εγκατεστημένα αιολικά πάρκα ισχύος 466 MW (13%) (Εικόνες 0.6, 0.7) [ΕΛΕΤΑΕΝ].

HWEA Wind Energy Statistics – 2019



Εικόνα 0.6: Η διανομή της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος στην Ελλάδα στα τέλη του 2019 μεταξύ των περιφερειών (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ).



Εικόνα 0.7: Η γεωγραφική διανομή της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος στην Ελλάδα στα τέλη του 2019 (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ).

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς μονάδων ΑΠΕ σε λειτουργία στο διασυνδεδεμένο σύστημα σήμερα, υπολογίζεται στα 6.625 MW. Ειδικότερα, στην κατηγορία των αιολικών είχαμε μια αύξηση κατά 43MW, φτάνοντας αθροιστικά τα 3.569 MW (Μάιος 2020) [ΕΛΕΤΑΕΝ – Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας].

Σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία του ΔΑΠΕΕΠ (Διαχειριστής ΑΠΕ και Εγγυήσεων Προέλευσης), η γεωγραφική κατανομή της αιολικής ισχύος στη χώρα διαμορφώνεται ως εξής:

- Στερεά Ελλάδα: 987,81 MW
- Πελοπόννησος: 618,60 MW
- Εύβοια: 484,68 MW
- Ανατολική Μακεδονία & Θράκη: 484,65 MW
- Δυτική Ελλάδα: 308,85 MW

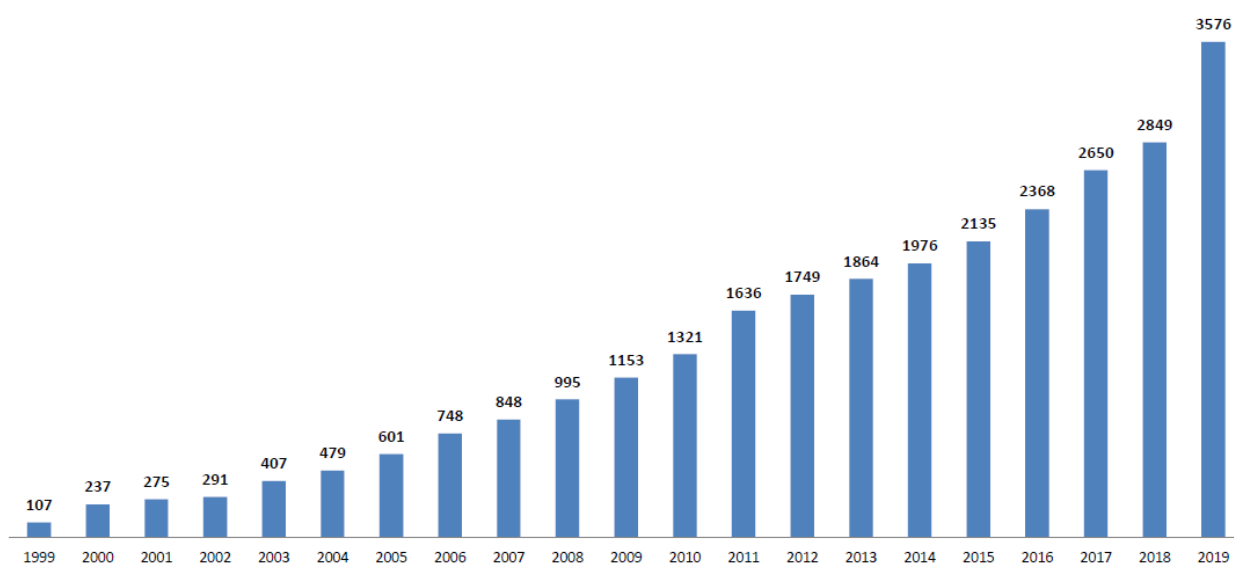
- Δυτική Μακεδονία: 146,50 MW
- Κεντρική Μακεδονία: 115,10 MW
- Νησιά Ιονίου: 108,80 MW
- Θεσσαλία: 18,60 MW

Στην **Εικόνα 0.8** παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ στην Ελλάδα τα τελευταία 20 έτη. Στην **Εικόνα 0.9** παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη των διαμέτρων του ρότορα των νεοεγκατεστημένων ανεμογεννητριών (Min / Max / Weighted average) στην Ελλάδα μέχρι τα τέλη του 2019. Είναι φανερό η τάση για εγκατάσταση ανεμογεννητριών συνεχώς μεγαλύτερων διαμέτρων του ρότορα. Η συγκεκριμένη επιλογή προσφέρει τα πλεονεκτήματα της εκμετάλλευσης ανέμων υψηλότερης ταχύτητας σε μεγαλύτερα ύψη, αλλά και χρήση μικρότερου αριθμού ανεμογεννητριών για την ίδια εγκατεστημένη ισχύ.

HWEA Wind Energy Statistics – 2019

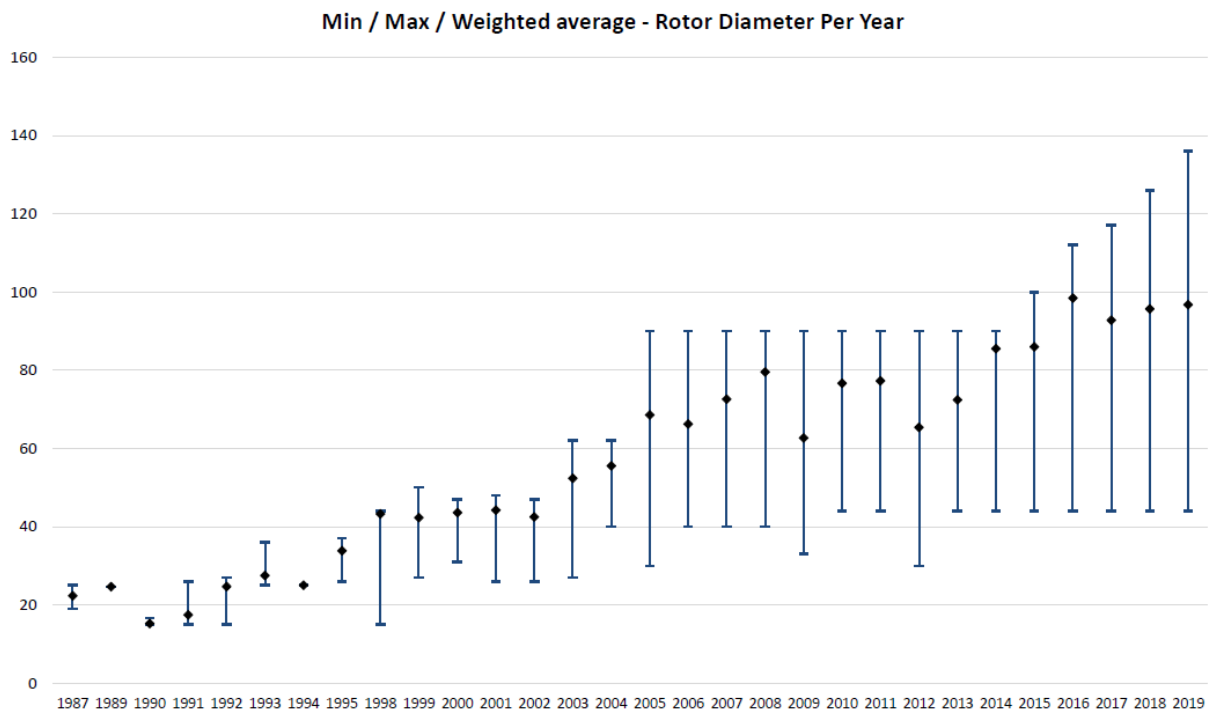


Total capacity to the grid (MW) per year



Εικόνα 0.8: Η χρονική μεταβολή της εγκατεστημένης αιολικής ισχύος (παραγωγή και δοκιμαστική λειτουργία) στην Ελλάδα μέχρι τα τέλη του 2019 (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ).

HWEA Wind Energy Statistics – 2019



Εικόνα 0.9: Η χρονική μεταβολή των διαμέτρων του ρότορα των νεοεγκατεστημένων ανεμογεννητριών (Min / Max / Weighted average) στην Ελλάδα μέχρι τα τέλη του 2019 (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ).

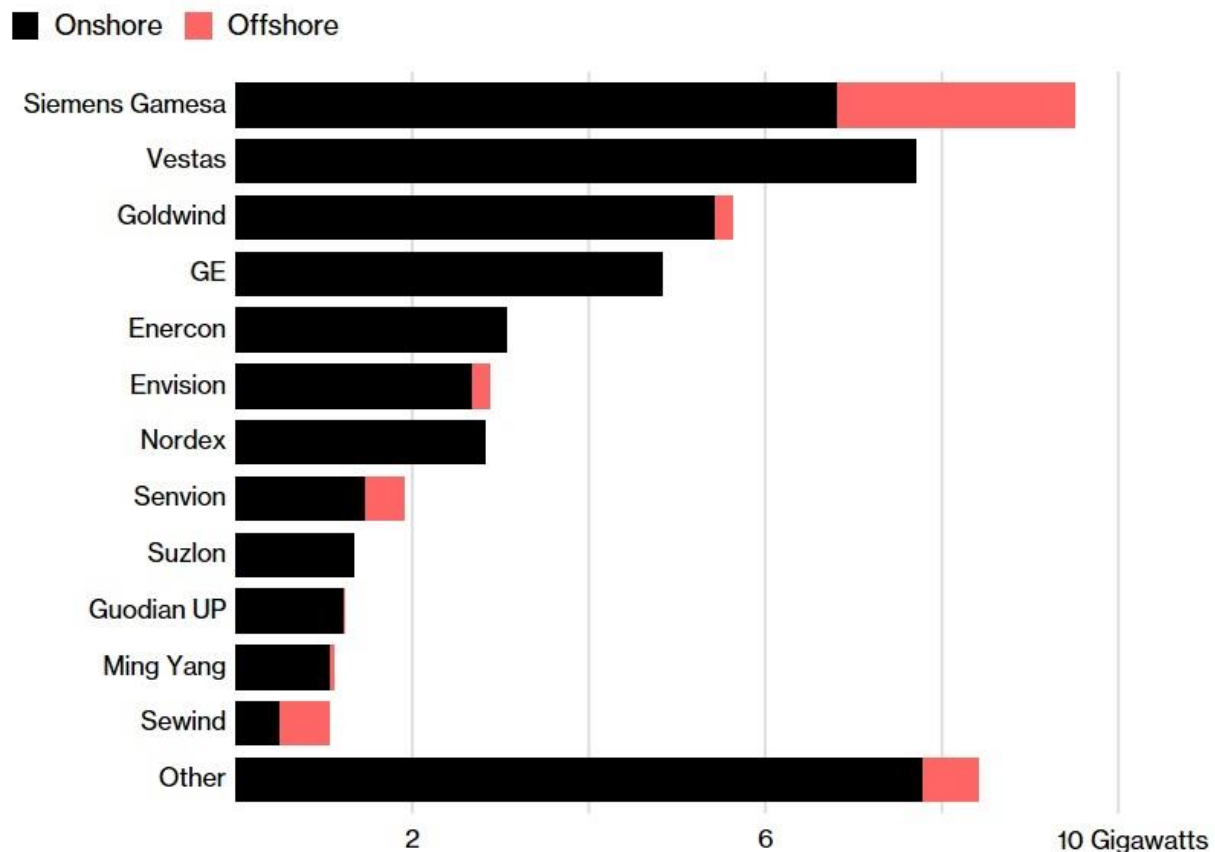
Με βάση τα στοιχεία του 2017 [<https://www.e-mc2.gr/el/node/168>], η Δανέζικη Vestas παρέμεινε ο μεγαλύτερος προμηθευτής ανεμογεννητριών, θέτοντας σε λειτουργία νέα χερσαία αιολικά 7,7 GW, ποσότητα που ισούται με το 16% της παγκόσμιας αγοράς [VESTAS]. Αφορά σε 72.991 ανεμογεννητριών, που έχουν ήδη εγκαταστήσει για λογαριασμό πελατών σε 81 χώρες σε έξι ηπείρους. Προβλέπεται να υπερβεί κατά πολύ το προβλεπόμενο 10% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τον άνεμο έως το τέλος του 2020 (**Εικόνα 0.10**) [<https://www.e-mc2.gr/el/node/168>].

Η Siemens Gamesa, όπως προέκυψε μετά την συγχώνευση της Γερμανικής Siemens και της Ισπανικής Gamesa, έθεσε σε λειτουργία νέα αιολικά πάρκα συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 6,8 GW το 2017, φτάνοντας το μερίδιο της εταιρείας στο 15% της αγοράς, αρκετά περισσότερο από το 11% που κατείχε το 2016, επιτρέποντας στην εταιρεία να ξεπεράσει τις GE και Goldwind στην παγκόσμια κατάταξη. Συμπεριλαμβανόμενων των ανεμογεννητριών ανοικτής θαλάσσης, η Siemens Gamesa έγινε ο μεγαλύτερος προμηθευτής, με συνολική ισχύ 9,5GW. Στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν εγκαταστήσει προϊόντα και τεχνολογία σε περισσότερες από 90 χώρες, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ άνω των 99 GW (**Εικόνα 0.10**) [<https://www.e-mc2.gr/el/node/168>][<https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services/onshore>].

Ακολουθούν η κινέζικη Goldwind με 5,4 GW και 11% μερίδιο αγοράς, διατηρώντας την τρίτη θέση και η GE με 4,9GW, αντιπροσωπεύοντας το 10% της παγκόσμιας αγοράς, η οποία βρέθηκε στην τέταρτη θέση από την δεύτερη που κατείχε (**Εικόνα 0.10**) [<https://www.e-mc2.gr/el/node/168>].

Top Wind Manufacturers of 2017

Siemens grabs top spot from Vestas with offshore additions



Εικόνα 0.10: Οι επιδόσεις των μεγαλύτερων κατασκευαστών ανεμογεννητριών, το 2017 (Πηγή: <https://www.e-mc2.gr/el/node/168>).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Η ΧΡΗΣΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

1.1 Αιολικό Δυναμικό

1.1.1 Αιολική Ενέργεια

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του ανέμου. Πρόκειται για την κινητική ενέργεια που περικλείει ο άνεμος κατά τη μεταφορά των αέριων μαζών και χρησιμοποιείται εκτεταμένα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αρχαιότερη μορφή εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας ήταν τα ιστία (πανιά) των πρώτων ιστιοφόρων, τα οποία τροποποιήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν αργότερα σε ανεμόμυλους στην ξηρά για την αντληση νερού, την άλεση σιτηρών κ.α. Το όνομά της προέρχεται από τον Αίολο, το θεό των ανέμων της ελληνικής μυθολογίας [wikipedia].

Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα μια ελκυστική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής. Οι ποροι της είναι άφθονοι και ανεξάντλητοι, ενώ από τη διαδικασία της παραγωγής ηλεκτρικού ρευματος δεν παράγονται ρύποι και καυσαέρια, όπως γίνεται με τις περισσότερες χρησιμοποιούμενες έως σήμερα μεθόδους. Αποτέλεσμα αυτού είναι οι επιπτώσεις στο περιβάλλον της αιολικής ενέργειας να είναι αδιαμφισβήτητα μικρότερες, καθώς η παραγωγή ρυπογόνων ουσιών κατά τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανεμογεννήτριες είναι μηδενικές.

Πιο συγκεκριμένα, η αιολική ενέργεια αποτελεί έναν από τους τύπους των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), οι οποίες είναι μέθοδοι που συλλέγουν και αξιοποιούν ενέργεια από φυσικές διεργασίες του πλανήτη, όπως ο αέρας, η βροχή, η ηλιακή ακτινοβολία κ.λπ. και την μετασχηματίζουν σε ωφέλιμη ενέργεια, συνήθως ηλεκτρική. Ενα πλήθος από ανεμογεννήτριες τοποθετημένες σε μια συγκεκριμένη περιοχή συνιστά ένα **αιολικό πάρκο**, το οποίο με τη σειρά του μπορεί να συμβάλλει στην μερική καλυψη αναγκών των πολιτών της συγκεκριμένης περιοχής σε ηλεκτρική ενέργεια [Hemami, 2012].

Δυστυχώς, οι ορυκτοί φυσικοί πόροι της Γης δεν είναι απεριόριστοι. Εάν δεν τους χρησιμοποιούμε με σύνεση και να κρατάμε τις ισορροπίες, τότε αυτοί θα εξαντληθούν πολύ σύντομα. Οι αλλαγές στον πλανήτη (ειδικά στο κλίμα) λόγω της ρύπανσης από τον άνθρωπο, στα παλαιότερα χρόνια δεν γίνονταν ιδιαίτερα αισθητές, λόγω της αργής μεταβολής. Αυτό συνέβαινε διότι ο παγκόσμιος πληθυσμός ήταν πολύ μικρότερος και η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων αρκετά μικρότερη απ' ότι σήμερα. Επιπλέον, τα φυτά και τα δάση δεσμεύουν το CO₂ και παρέχουν οξυγόνο και έτσι συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στη διατήρηση της ισορροπίας και στη συνέχιση της ανθρώπινης ζωής. Παρ' όλα αυτά, η αύξηση του πληθυσμού και η ανάγκη του ανθρώπου για ευημερία οδηγούν στη γρήγορη κατανάλωση των φυσικών πόρων (και ειδικά των ορυκτών καυσίμων), δυσχαιρένοντας την κατάσταση [Hemami, 2012].

Η παραγωγή ενέργειας με τους συμβατικούς τρόπους (καύση ορυκτών καυσίμων: λιγνίτης, πετρέλαιο, γαιάνθρακας, φυσικό αέριο) αποτελεί μια από τις κύριες αιτίες μόλυνσης του περιβάλλοντος. Παρ' όλα αυτά υπάρχει αφθονία ανέμου, ηλιοφάνειας και άλλων εναλλακτικών

πηγών ενέργειας που δεν έχουν ως αποτέλεσμα τη ρύπανση του περιβάλλοντος. Ο άνεμος έχει μεν το πλεονέκτημα ότι είναι μια άφθονη, καθαρή και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, δεν είναι όμως συνεχής και σταθερή. Αυτό καθιστά δύσκολο το να μπορεί μια μεγάλη γεωγραφικά περιοχή ή και μια ολόκληρη χώρα να βασίσει αποκλειστικά σε αυτόν τις ανάγκες για ηλεκτρική ενέργεια, τουλάχιστον προς το παρόν. Όμως, θα μπορούσε κανείς ορθά να σκεφτεί ότι σε μία μεγάλη γεωγραφική έκταση πάντα θα υπάρχουν κάποια σημεία με ικανό άνεμο, που θα μπορούν να συμβάλλουν στην παραγωγή ενέργειας και στη διατήρηση της ισορροπίας σε ένα διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό σύστημα. Ωστόσο, οι γραμμές διασύνδεσης ευρύτερων περιοχών δεν έχουν αναπτυχθεί ακόμα τόσο ώστε να μπορεί να γίνει αυτό εφικτό, ούτε έχει λυθεί αποτελεσματικά το πρόβλημα της αποθήκευσης της περίσσειας της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ [Hemami, 2012].

Έτσι το πρόβλημα της αδυναμίας στήριξης ενός μεγαλύτερου ποσοστού των ανθρώπινων αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια θα παραμένει, έως ότου δημιουργηθεί ένα ενιαίο σύστημα ελέγχου ροής με τις γραμμές μεταφοράς ενέργειας να καλύπτουν μεγάλες αποστάσεις και να συνδέουν μακρινές χώρες και κράτη [Hemami, 2012].

1.1.2 Συμβολή της Αιολικής Ενέργειας

Η συμβολή της αιολικής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας διεθνώς και ιδίως στη χώρα μας είναι αρκετά μεγάλη. Η διείσδυση εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα για τα αιολικά πάρκαραναμενόταν να φτάσει στα 3.741MW μέχρι το τέλος του 2020, το οποίο είναι ένα πολύ σημαντικό μέγεθος αν λάβουμε υπ' όψιν ότι μέχρι τα τέλη του 2019, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ (Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας) στον ελληνικό χώρο ήταν 6.965MW [www.e-mc2.gr/el/node/233].

Σύμφωνα με έρευνες, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ παγκοσμίως έφτασε τα 2179GW έως το τέλος του 2017, με υπολογιζόμενη ετήσια αύξηση στο 8,3%, σύμφωνα με τα δεδομένα των τελευταίων επτά ετών [www.e-mc2.gr/el/node/233].

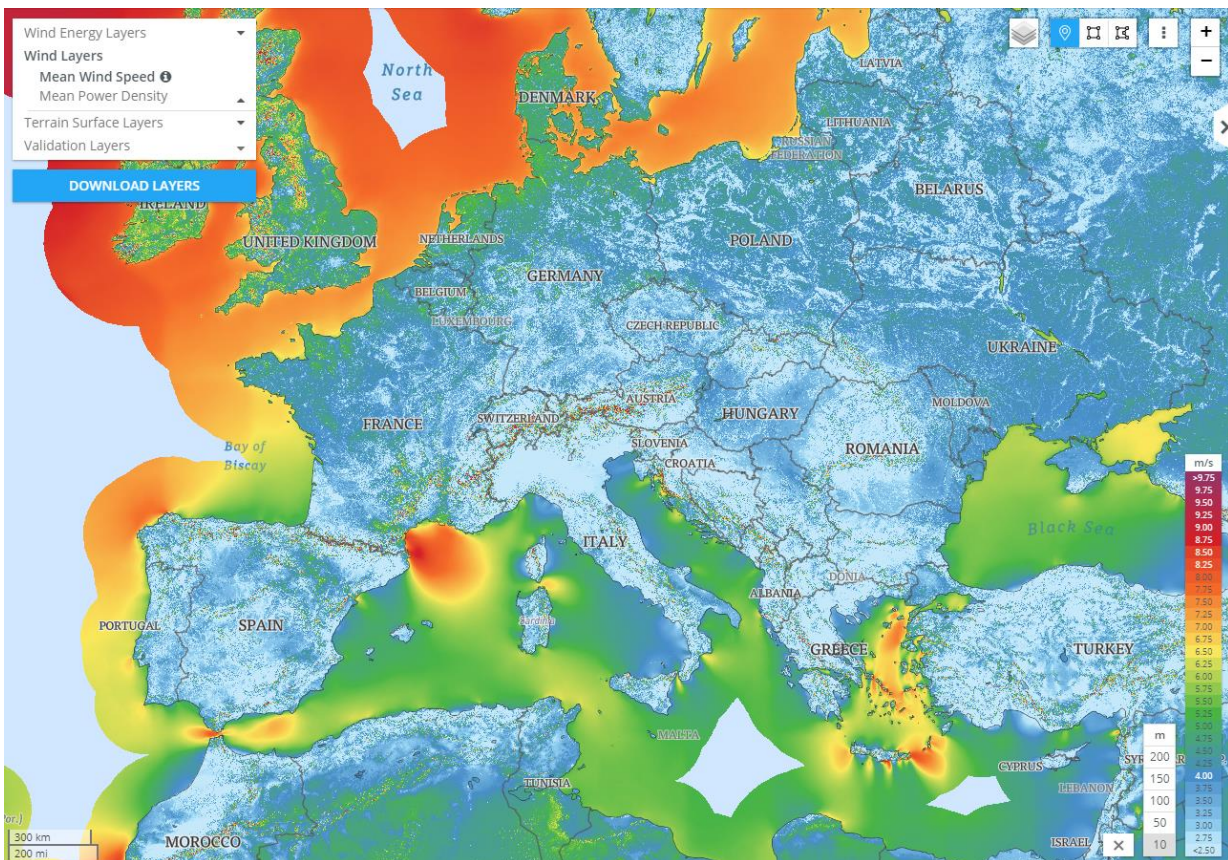
Σε συνολική κατάταξη μεταξύ των χωρών, η Ελλάδα είναι μία από τις εννέα χώρες του κόσμου, που παράγουν περισσότερο από το 20% της ηλεκτρικής τους ενέργειας από ηλιακή και αιολική ενέργεια, σύμφωνα με την Έκθεση για την Παγκόσμια Κατάσταση στον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών του δικτύου REN21 (GSR) [<https://www.insider.gr/eidiseis/115614/energeia-apo-ape-gi-i-ellada-stin-pagkosmia-katataxi>].

1.1.3 Αξιοποίηση Αιολικού Δυναμικού

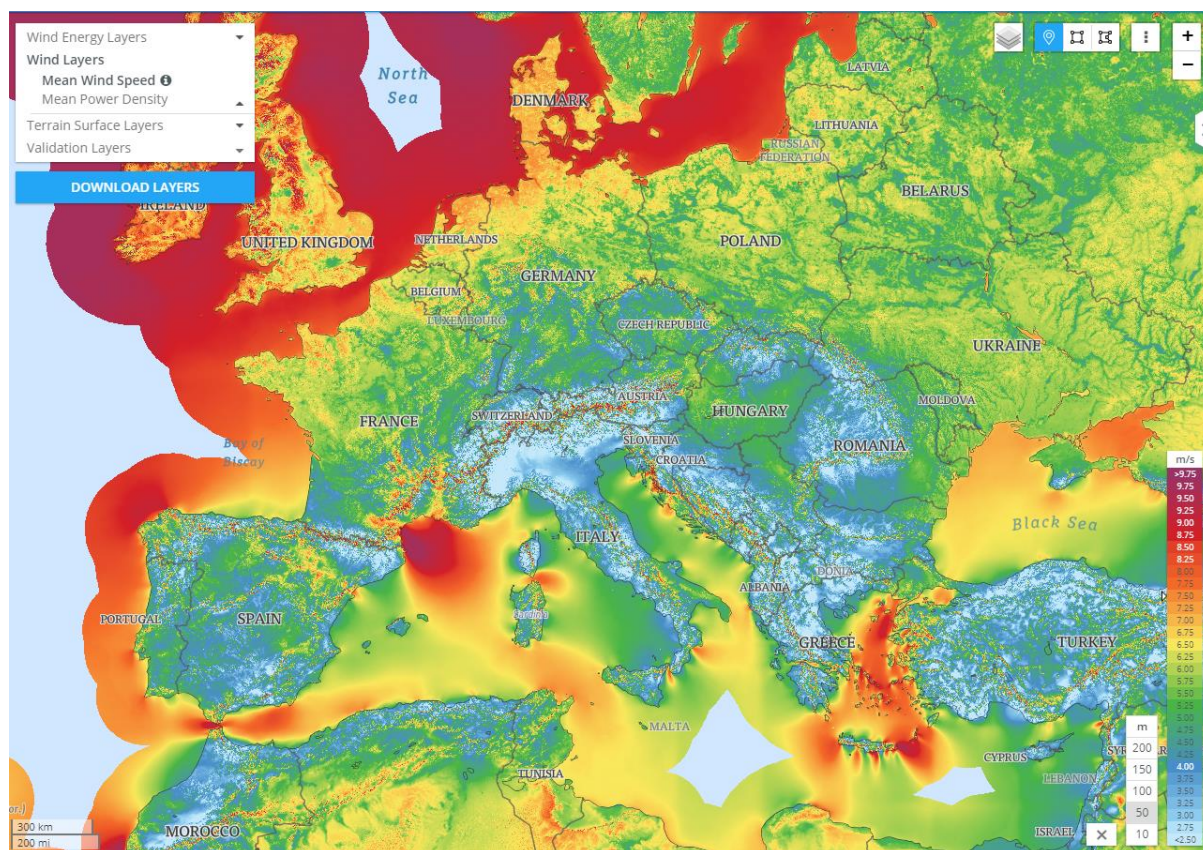
Αναφορικά με την έννοια του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής, προκύπτει από μια περίπλοκη διαδικασία ερευνών και μετρήσεων διαφόρων στοιχείων σε αυτήν την περιοχή (έντασης του ανέμου, κατεύθυνσης, υψομετρικά χαρακτηριστικά της περιοχής κ.λπ.). Με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων και συναρτήσεων επιτυγχάνεται πολλές φορές η πρόβλεψη του αιολικού δυναμικού σε κάποια περιοχή, από την οποία δεν έχουμε επαρκή δεδομένα, προκειμένου να ληφθεί απόφαση για το αν είναι κατάλληλες οι συνθήκες να εγκατασταθεί στην εν λόγω περιοχή ένα αιολικό πάρκο.

Η Ελλάδα διαθέτει σε ορισμένες περιοχές κάποια από τα ισχυρότερα αιολικά δυναμικά στην Ευρώπη. Περιοχές με ιδιαίτερα υψηλό αιολικό δυναμικό είναι: τα νησιά του Αιγαίου και κυρίως η Κρήτη, η Ν.Α. Πελοπόννησος, η Εύβοια και ορισμένες περιοχές της Θράκης.

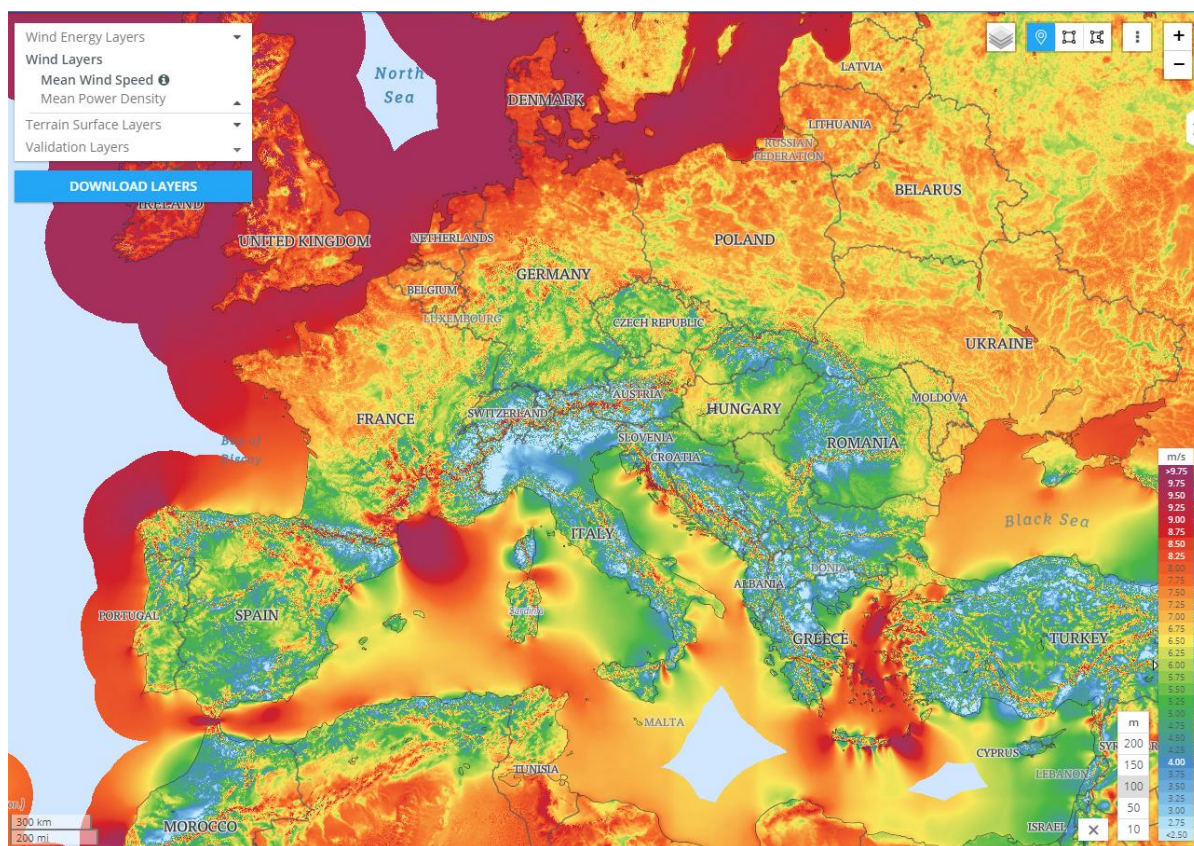
Το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό είναι της τάξης των 11.000-14.000MW και εκτιμάται πως μπορεί να καλύψει σημαντικό ποσοστό των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας. Παρόλα αυτά, η ανάπτυξη των αιολικών συστημάτων στην χώρα μας, λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη του άριστου αιολικού δυναμικού σε αυτήν, δεν είχε εξελιχθεί τα προηγούμενα χρόνια όσο θα έπρεπε [Δαγκαλίδης, 2011]. Τελευταία όμως υπάρχει μια ιδιαίτερα δυναμική ανάπτυξη της εγκατάστασης νέων αιολικών πάρκων, με πολύ ελπιδοφόρα αποτελέσματα. Στις **Εικόνες 1.1** έως **1.16** απεικονίζονται χάρτες αιολικού δυναμικού (σε διαφορετικά ύψη από το έδαφος) για την Ευρώπη, την Ελλάδα και την Κρήτη [Global Wind Atlas].



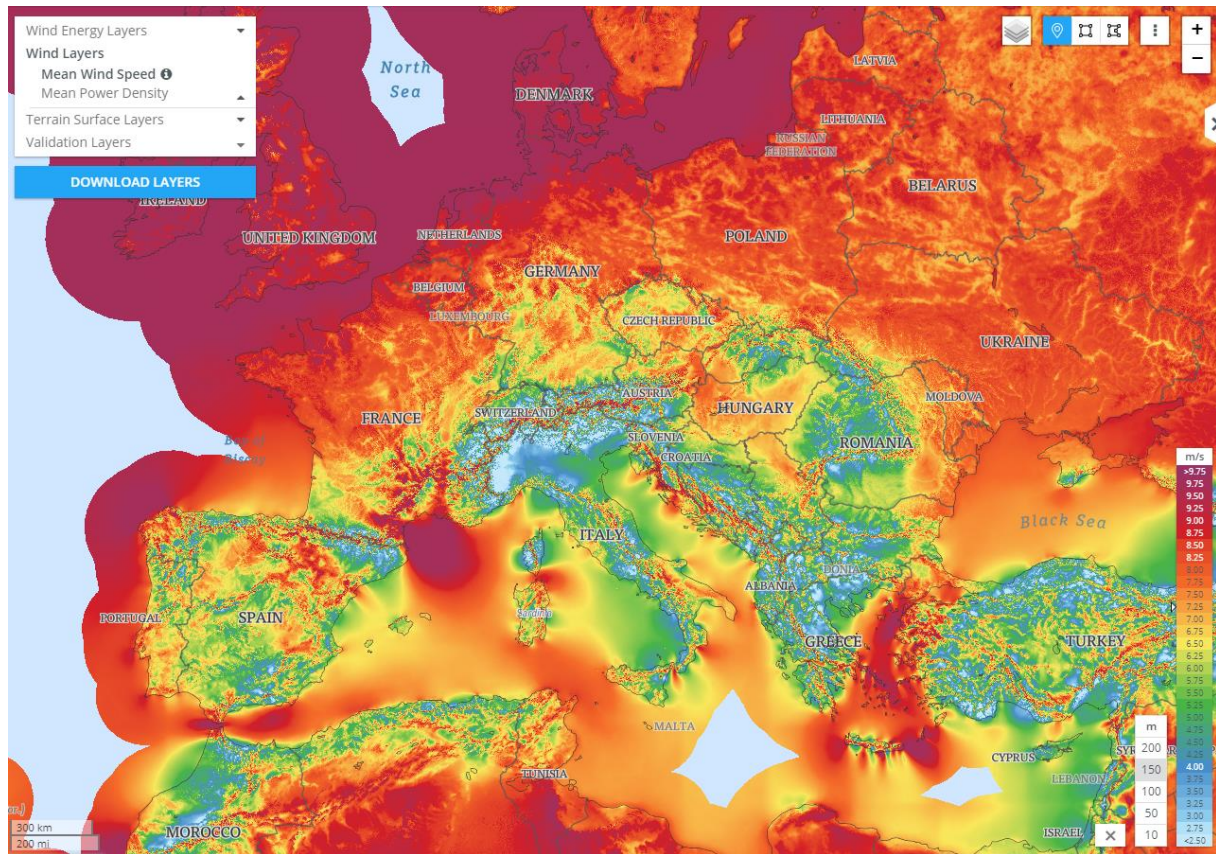
Εικόνα 1.1: Ανεμολογικός χάρτης της Ευρώπης σε ύψος 10 m από το έδαφος [Πηγή: Global Wind Atlas].



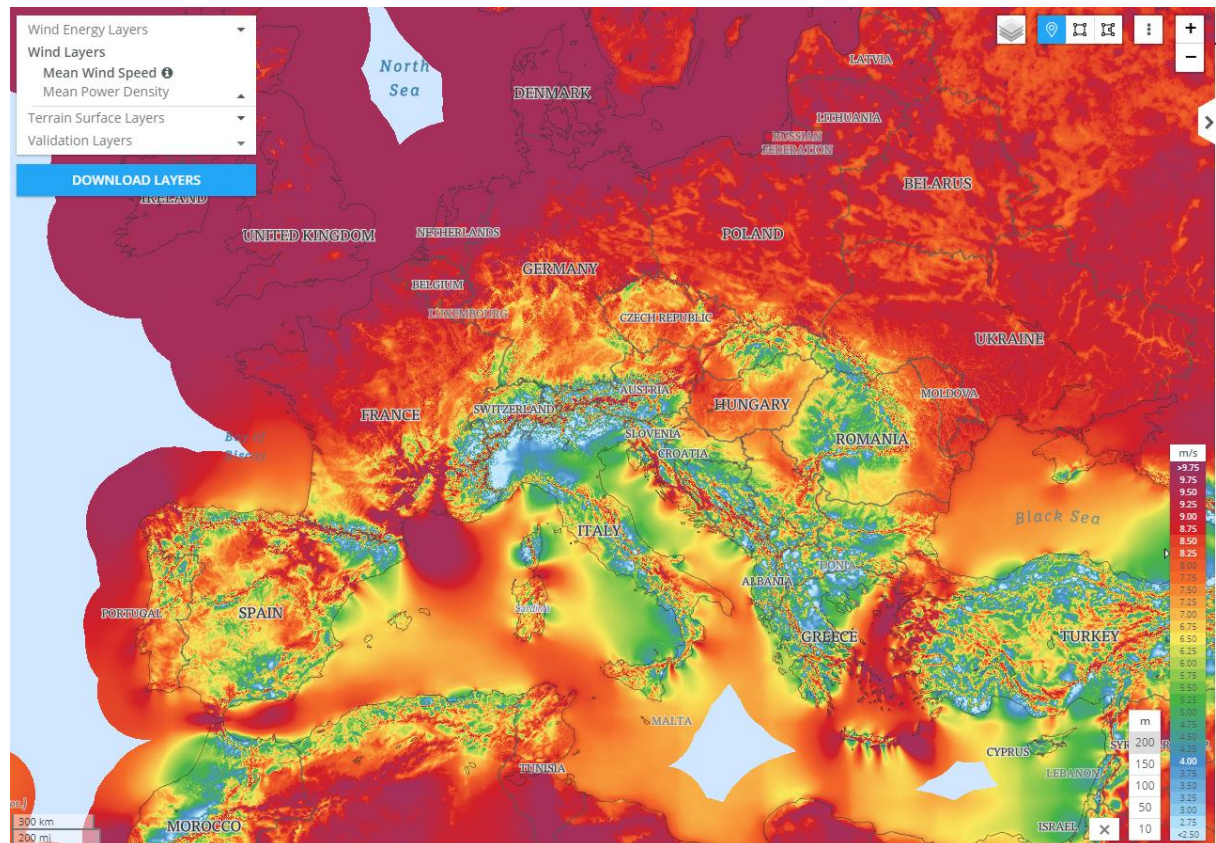
Εικόνα 1.2: Ανεμολογικός χάρτης της Ευρώπης σε ύψος 50 m από το έδαφος [Πηγή: Global Wind Atlas].



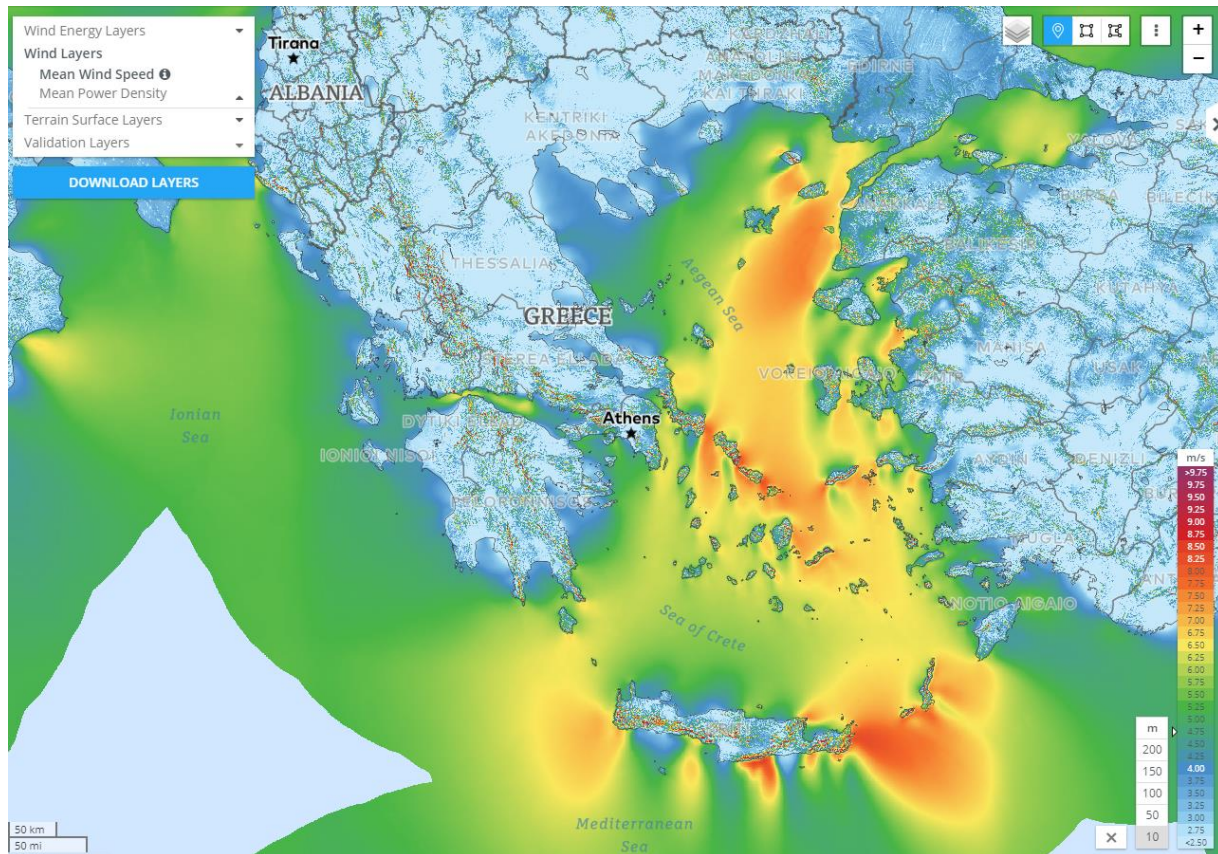
Εικόνα 1.3: Ανεμολογικός χάρτης της Ευρώπης σε ύψος 100 m από το έδαφος [Πηγή: Global Wind Atlas].



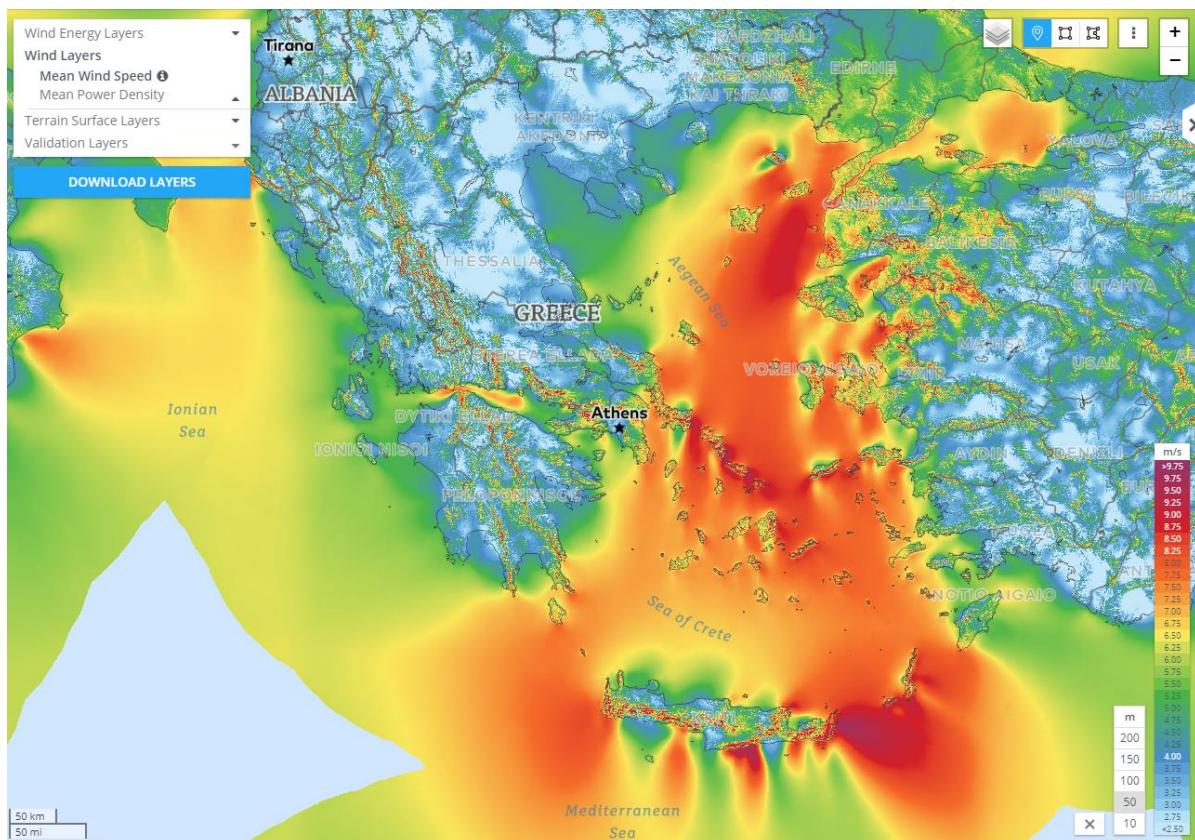
Εικόνα 1.4: Ανεμολογικός χάρτης της Ευρώπης σε ύψος 150 m από το έδαφος [Πηγή: Global Wind Atlas].



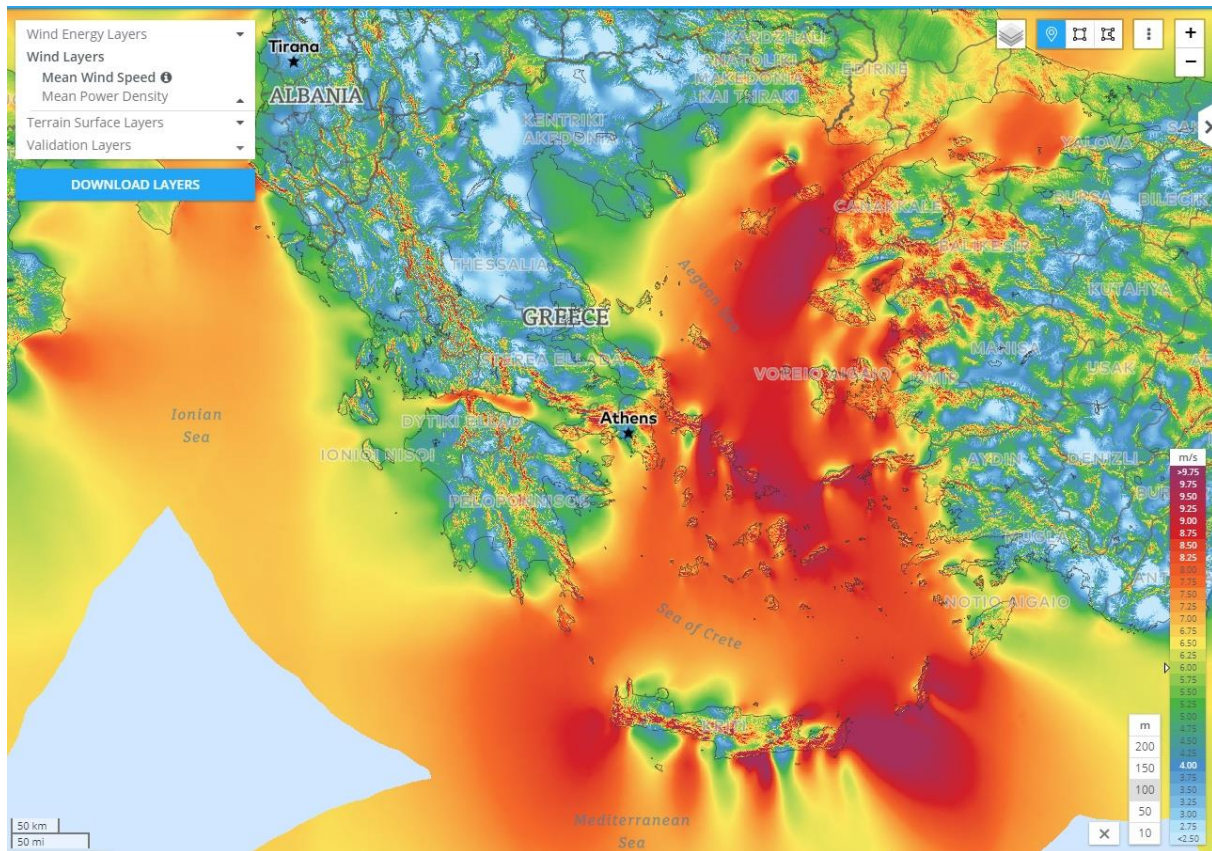
Εικόνα 1.5: Ανεμολογικός χάρτης της Ευρώπης σε ύψος 200 m από το έδαφος [Πηγή: Global Wind Atlas].



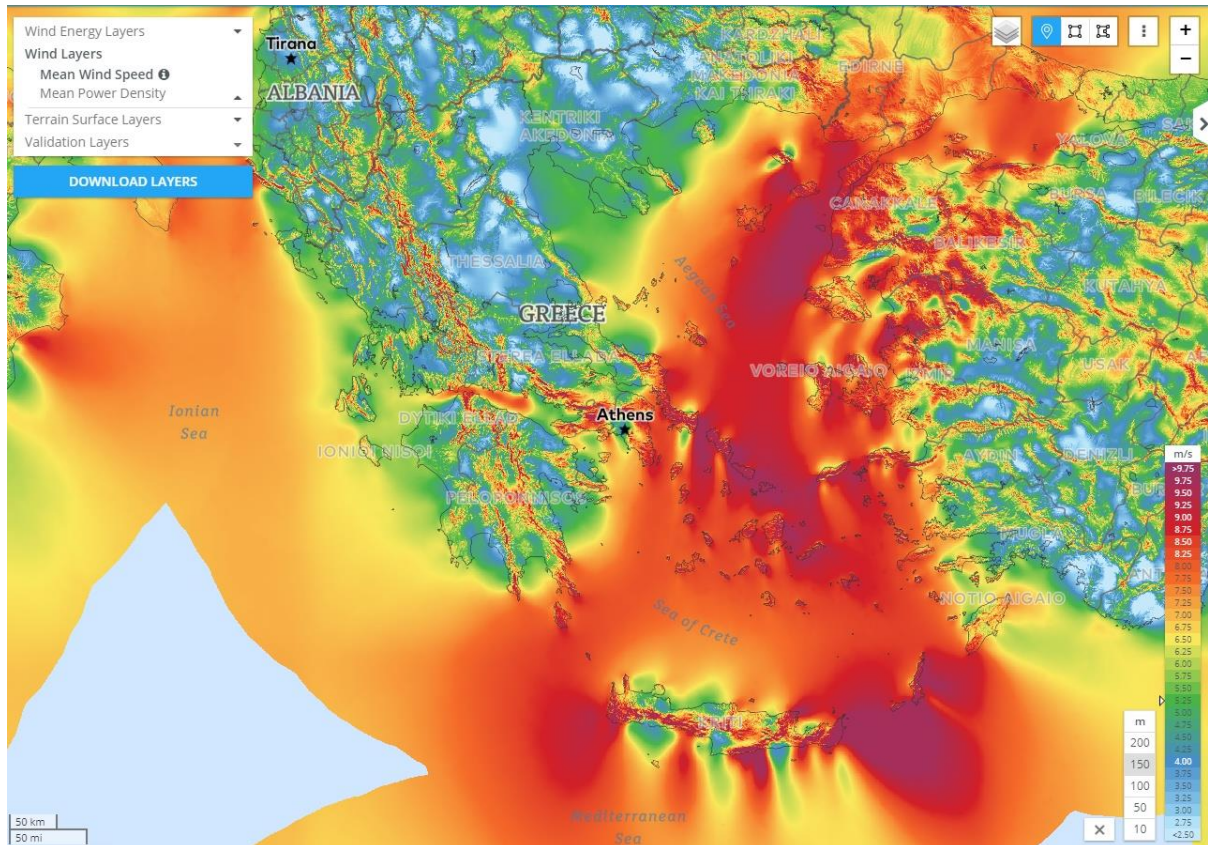
Εικόνα 1.6: Ανεμολογικός χάρτης της Ελλάδος σε ύψος 10 m από το έδαφος [Πηγή: Global Wind Atlas].



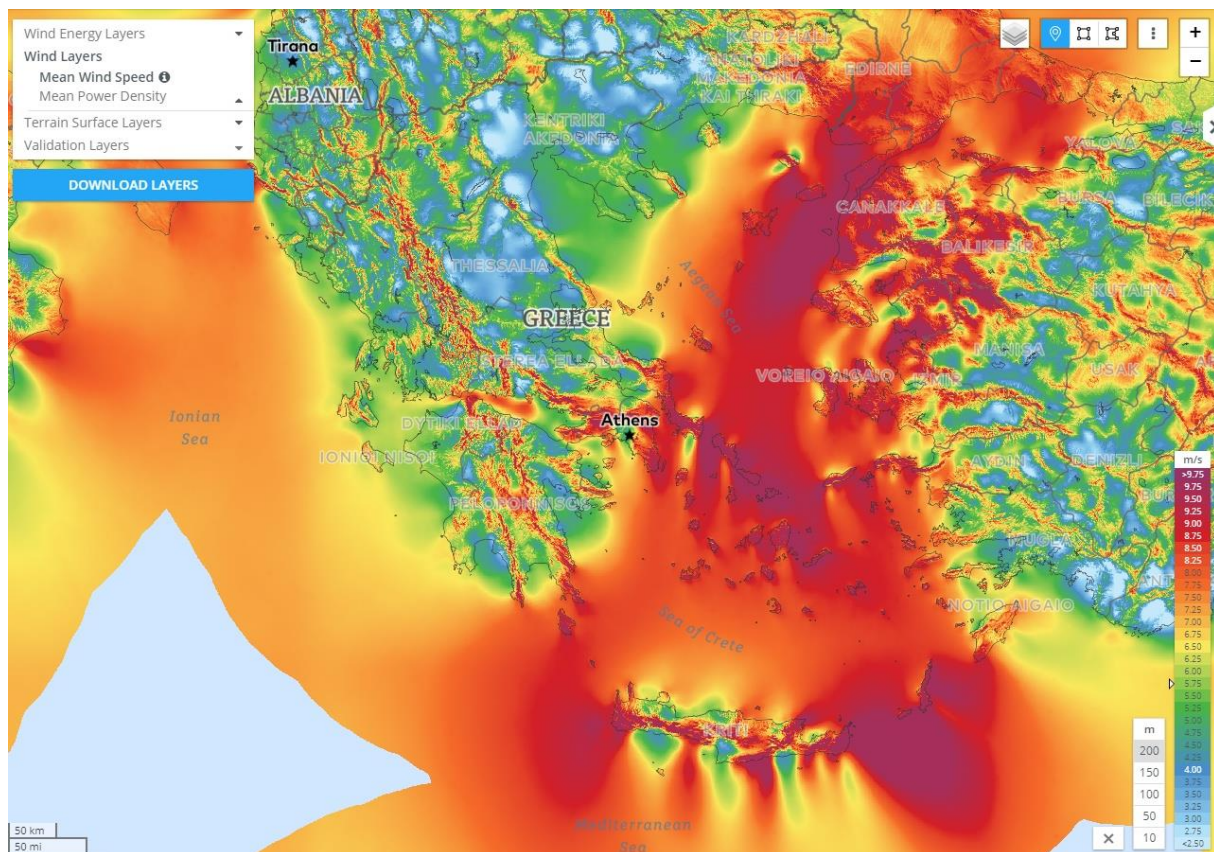
Εικόνα 1.7: Ανεμολογικός χάρτης της Ελλάδος σε ύψος 50 m από το έδαφος [Πηγή: Global Wind Atlas].



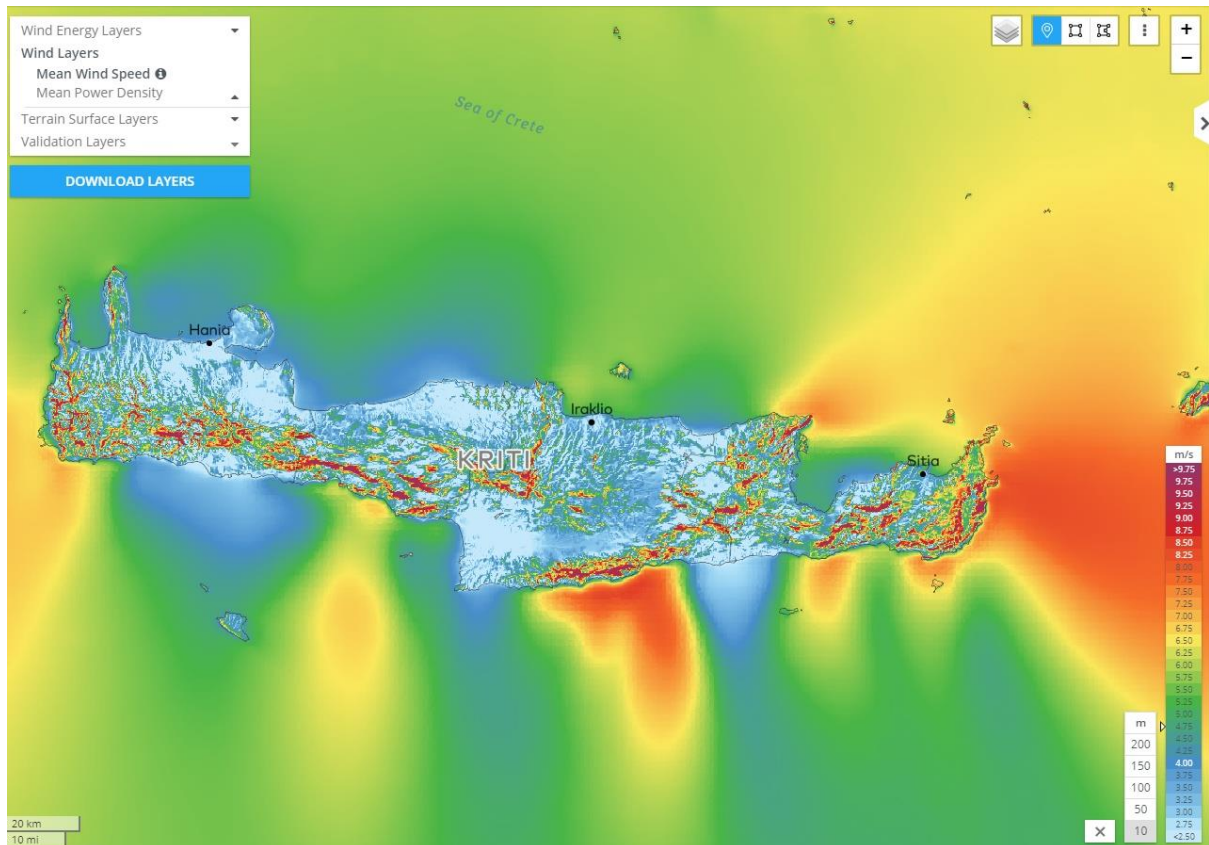
Εικόνα 1.8: Ανεμολογικός χάρτης της Ελλάδος σε ύψος 100 m από το έδαφος [Πηγή: Global Wind Atlas].



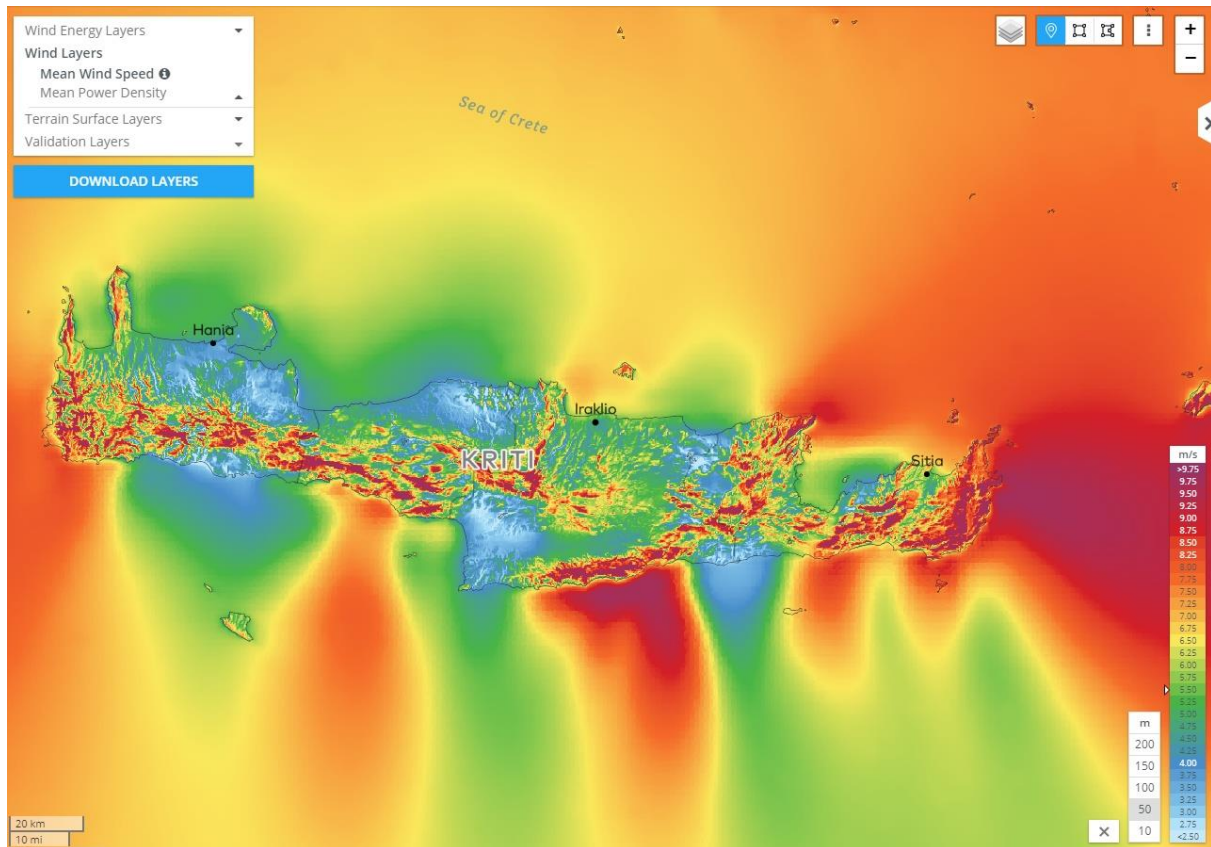
Εικόνα 1.9: Ανεμολογικός χάρτης της Ελλάδος σε ύψος 150 m από το έδαφος [Πηγή: Global Wind Atlas].



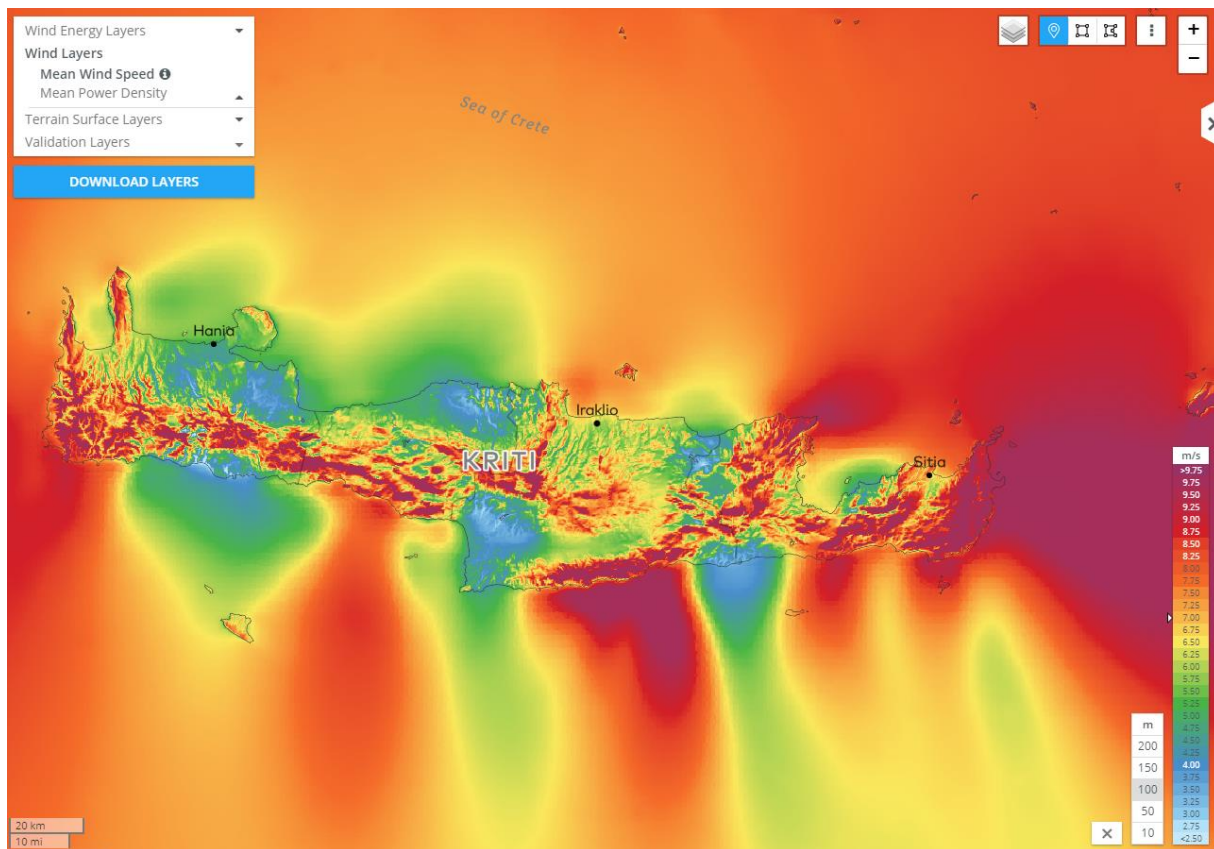
Εικόνα 1.10: Ανεμολογικός χάρτης της Ελλάδος σε ύψος 200 m από το έδαφος [Πηγή: Global Wind Atlas].



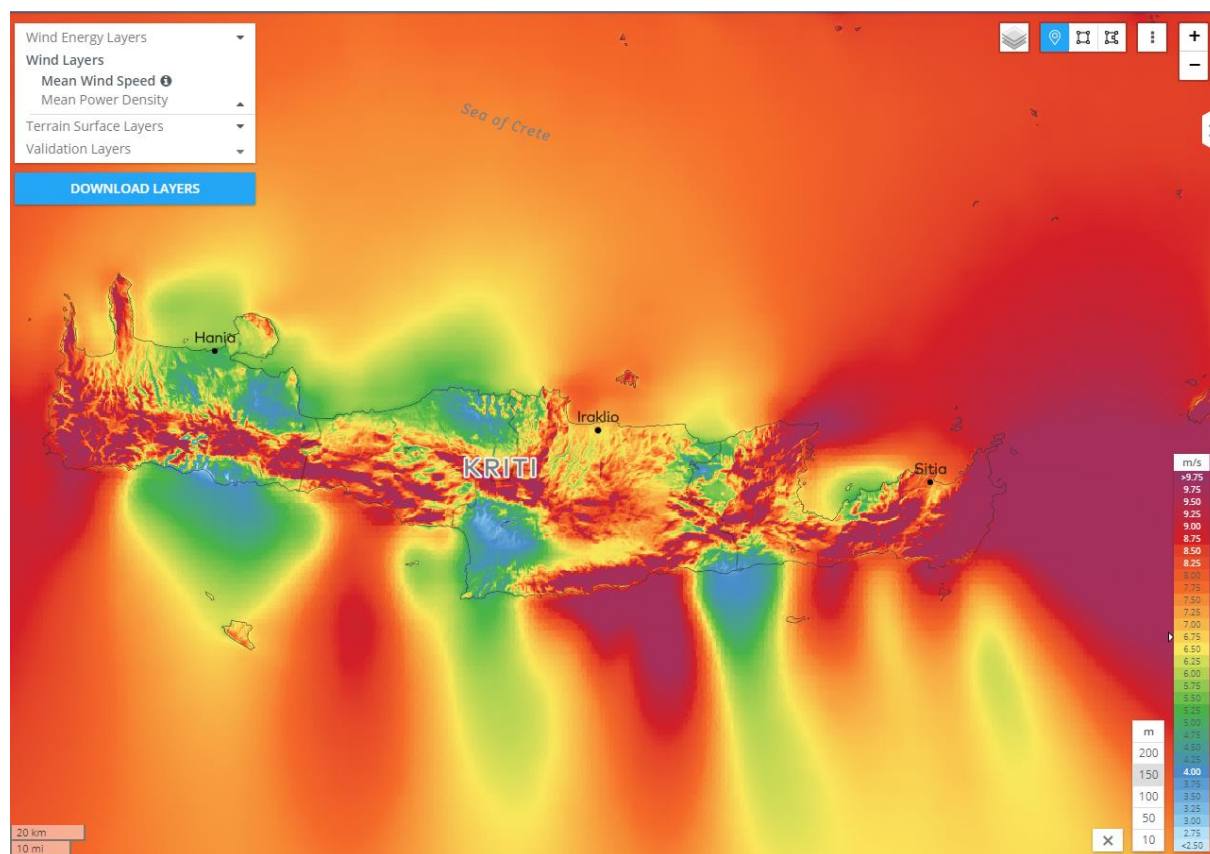
Εικόνα 1.11: Ανεμολογικός χάρτης της Κρήτης σε ύψος 10m από το έδαφος [Πηγή: Global Wind Atlas].



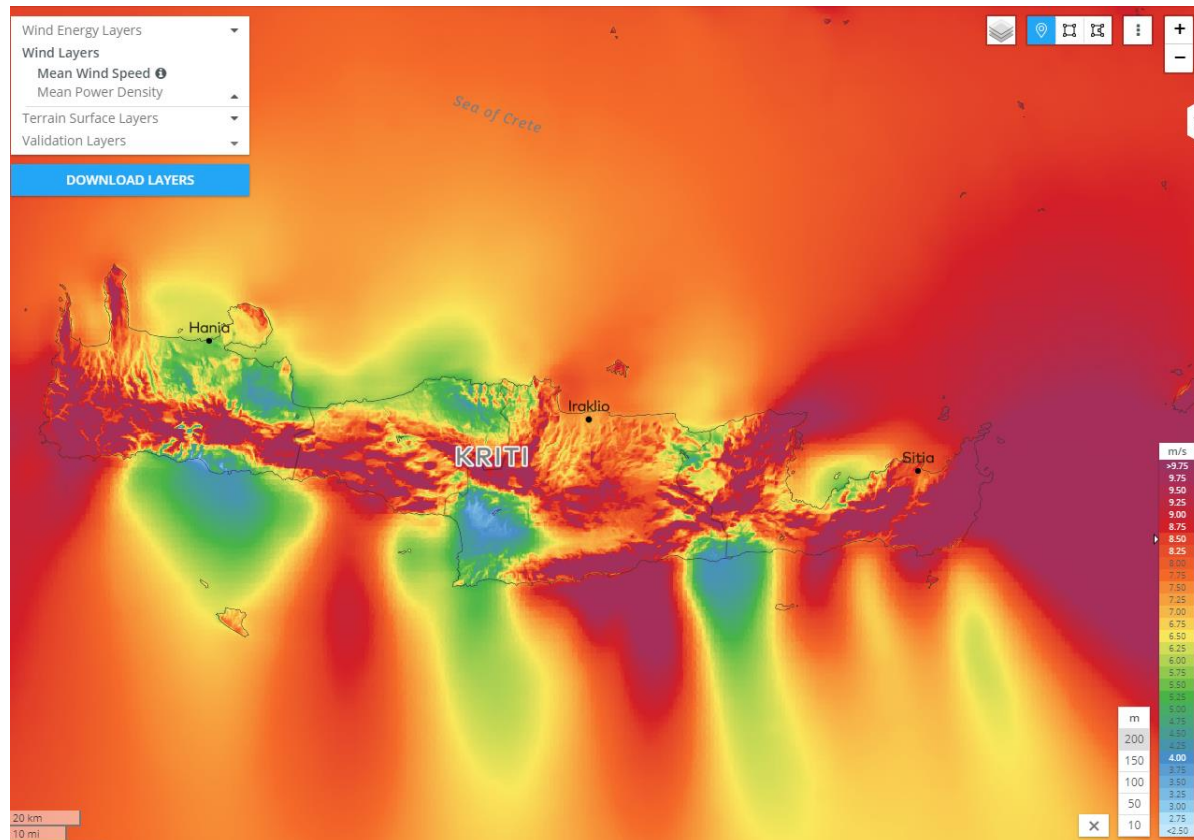
Εικόνα 1.12: Ανεμολογικός χάρτης της Κρήτης σε ύψος 50 m από το έδαφος [Πηγή: Global Wind Atlas].



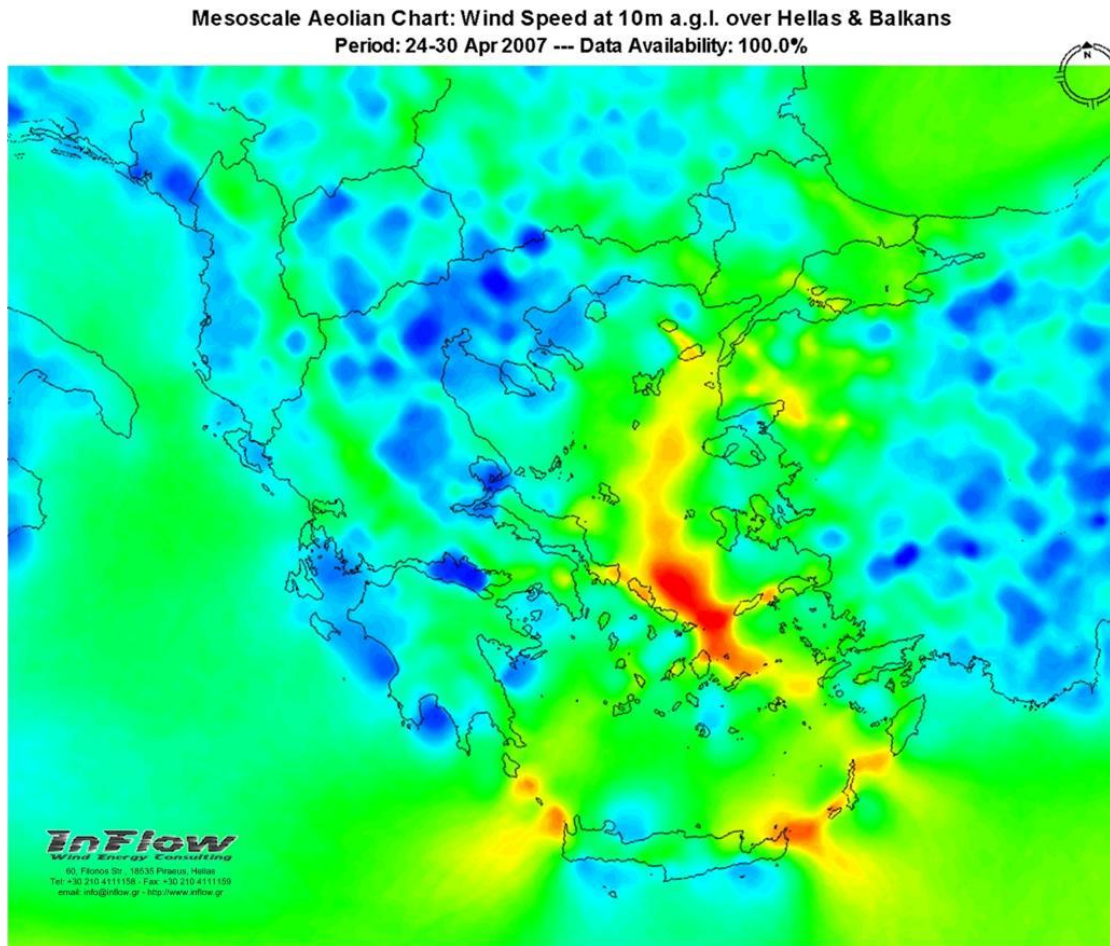
Εικόνα 1.13: Ανεμολογικός χάρτης της Κρήτης σε ύψος 100 m από το έδαφος [Πηγή: Global Wind Atlas].



Εικόνα 1.14: Ανεμολογικός χάρτης της Κρήτης σε ύψος 150 m από το έδαφος [Πηγή: Global Wind Atlas].



Εικόνα 1.15: Ανεμολογικός χάρτης της Κρήτης σε ύψος 200 m από το έδαφος [Πηγή: Global Wind Atlas].



Εικόνα 1.16: Ανεμολογικός χάρτης της Ελλάδος σε ύψος 10 m από το έδαφος. Περίοδος 24-30 Απριλίου 2007 [Πηγή: Caralis et al., 2008].

Από τις παραπάνω εικόνες, που έχουν ληφθεί από παγκόσμιο ανεμολογικό χάρτη, γίνεται αντιληπτό ότι σε ευρωπαϊκό επίπεδο οι μεγαλύτερες τιμές ανέμων συναντώνται, ήδη από πολύ χαμηλά ύψη από το έδαφος, στις σκανδιναβικές χώρες, στο Ηνωμένο Βασίλειο, στην Ιρλανδία και σε περιοχές γενικά που γειτονεύουν με τον Ατλαντικό Ωκεανό και τη Βόρεια Θάλασσα. Σε μεγαλύτερα ύψη εντοπίζονται ισχυροί άνεμοι και σε χώρες της Μεσογείου, με ιδιαίτερη εμφαση στα νότια παράλια της Γαλλίας και στην Ελλάδα.

Αν εστιάσουμε περισσότερο στη χώρα μας, ιδιαίτερο αιολικό δυναμικό παρατηρείται στις Κυκλάδες και γενικότερα στο κεντρικό Αιγαίο Πέλαγος, στη Νότια Εύβοια αλλά και στην Κρήτη. Στην Κρήτη ευνοϊκές συνθήκες για ανεμογεννήτριες και αιολικά πάρκα εμφανίζονται κυρίως στην ανατολική της πλευρά (π.χ. Ιεράπετρα, Σητεία) και σε συγκεκριμένα σημεία στα νότια παράλια του νησιού.

1.2 Λήψη και Επεξεργασία Ανεμολογικών Δεδομένων

1.2.1 Η ενέργεια του ανέμου

Η ενέργεια που μεταφέρει ο άνεμος είναι ανάλογη του κύβου της ταχύτητάς του και συνεπώς εξαρτάται κάθε χρονική στιγμή από σωρεία παραγόντων. Η κινητική ενέργεια του ανέμου προέρχεται από την θέρμανση και κίνηση των αέριων μαζών της επιφάνειας της γης, λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και από την περιστροφή της Γης. Χαρακτηριστικά του ανέμου όπως η κατεύθυνση, η μέση ταχύτητα, ο ρυθμός μεταβολών, η διάρκεια κ.λπ. επηρεάζουν την τελική παραγόμενη αιολική ενέργεια [Hemami, 2012].

1.2.2 Η Χρονική Μεταβολή της Ταχύτητας του Ανέμου

Η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου σε συνάρτηση με το χρόνο εμπίπτει σε τρεις κύριες κατηγορίες: στιγμιαίες αλλαγές, καθημερινές αλλαγές και εποχιακές αλλαγές. Πολλές φορές απλά με προσωπική παρατήρηση, μπορούμε να διαπιστώσουμε ξεκάθαρα αυτήν την αλλαγή ανέμου και να παρατηρήσουμε ότι ο άνεμος δεν φυσά με σταθερή ταχύτητα (σε μέτρο), ούτε με σταθερή διεύθυνση.

A. Μεταβολές μεγάλων χρονικών περιόδων

Έπειτα από σειρά παρατηρήσεων έχει διαπιστωθεί ότι μπορεί να συμβούν μακροχρόνιες αλλαγές στα ανεμολογικά δεδομένα μίας συγκεκριμένης γεωγραφικής θέσης. Αν και συνήθως είναι πολύ δύσκολο να έχουμε καταγεγραμμένο μακροχρόνιο ιστορικό ανεμολογικών δεδομένων για μια συγκεκριμένη γεωγραφική θέση, υπάρχουν επιστημονικές μελέτες που αποδεικνύουν ότι το φαινόμενο είναι υπαρκτό. Αυτό συνδέεται άμεσα με την αργή, μακροπρόθεσμη, αλλαγή κλίματος και την παρατηρούμενη αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη (μην ξεχνάμε ότι οι άνεμοι είναι αποτέλεσμα της διαφοράς πιέσεων και θερμοκρασιών μεταξύ διαφορετικών περιοχών της ατμόσφαιρας, καθώς και της περιστροφής της Γης).

Αυτές οι αλλαγές στο παγκόσμιο κλίμα, εκτός του ότι αυξάνουν την συχνότητα των ακραίων μετεωρολογικών φαινομένων, εντείνουν σημαντικά και την αβεβαιότητα στην πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας από κάποιο μεγάλο έργο που βρίσκεται υπό σχεδίαση ή υπό κατασκευή, όπως είναι για παράδειγμα ένα αιολικό πάρκο (επηρεάζεται ουσιαστικά η οικονομική βιωσιμότητα των έργων αιολικής ενέργειας) [Burton et al., 2001].

B. Ετήσιες μεταβολές του ανέμου

Σε χρονικές κλίμακες μικρότερες από ένα έτος, οι εποχιακές διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου είναι περισσότερο προβλέψιμες. Αν και συχνά υπάρχουν μεγάλες παραλλαγές των καιρικών φαινομένων, σε χρονικές κλίμακες οι οποίες καθιστούν αδύνατη την πρόβλεψη πέρα των λίγων και μόνο ημερών, ωστόσο οι βραχυχρόνιες αυτές μεταβολές/παραλλαγές δεν γίνονται αισθητές σε μία μέση αποτύπωση της ανεμολογικής δραστηριότητας.

Το ροδόγραμμα ανέμου (Wind Rose) είναι ένα γραφικό εργαλείο που απεικονίζει την κατανομή της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου σε μια τοποθεσία. Στο παράδειγμα της [Εικόνας 1.17](#) το ροδόγραμμα ανέμου μπορεί να αναπαρασταθεί ως τροχός με ακτίνες, με γωνιακή διακριτοποίηση, η οποία είναι 30 μοίρες στη συγκεκριμένη περίπτωση. Για κάθε τομέα, ο άνεμος θεωρείται

ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους τομείς. Η χρονική διάρκεια του ανέμου για την οποία ο άνεμος έρχεται από τη συγκεκριμένη διεύθυνση, αναπαριστάται από το μήκος της αντίστοιχης ακτίνας στο ροδόγραμμα, ενώ η ταχύτητα του ανέμου αναπαριστάται από το πάχος της αντίστοιχης ακτίνας [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

Ο σχεδιασμός ενός αιολικού πάρκου για μια συγκεκριμένη τοποθεσία εξαρτάται από τη μορφή που θα έχει η απεικόνιση του ροδογράμματος ανέμου της συγκεκριμένης τοποθεσίας. Σε ορισμένες περιοχές, ιδιαίτερα εκεί όπου ο άνεμος οδηγείται από θερμικές επιδράσεις, παρατηρείται ο άνεμος να αποκτά πολύ συγκεκριμένη κατεύθυνση. Για παράδειγμα, στο Παλμ Σπρινγκς στις ΗΠΑ, ο άνεμος προέρχεται από έναν τομέα πλάτους 10 μοιρών, για το 95% του έτους. Σε τέτοιου είδους τοποθεσίες, αναλογικά και η διάταξη των αιολικών πάρκων γίνεται με πυκνές-γεμάτες σειρές, κάθετα στη συγκεκριμένη κύρια διεύθυνση του ανέμου (**Εικόνα 1.18**), με μεγάλες αποστάσεις κατάντη [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

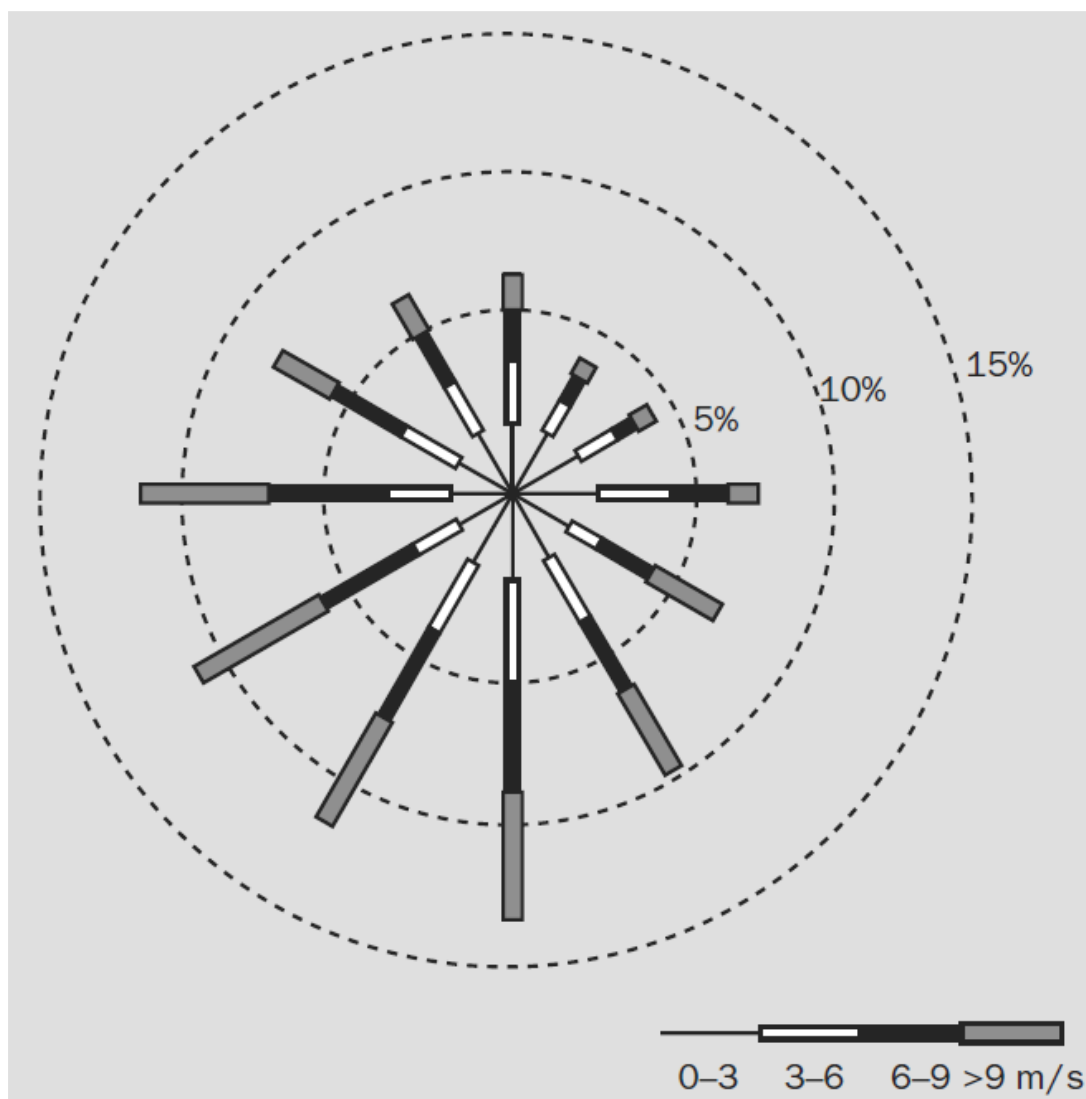
Στη Βόρεια Ευρώπη, αν και παρατηρούνται αρκετοί άνεμοι με νοτιοδυτική προέλευση, όμως σημειώνονται άνεμοι και από άλλες κατευθύνσεις για σημαντικά χρονικά διαστήματα, και ως εκ τούτου οι ανεμογεννήτριες στα αιολικά πάρκα τείνουν να κατανέμονται πιο ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις (**Εικόνα 1.18**).

Αποδεικνύεται ότι μια πολύ σημαντική παράμετρος, πέρα από το μέτρο της ταχύτητας και τη διεύθυνση του ανέμου, είναι η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου (speed distribution), η οποία παίζει καθοριστικό ρόλο στην παραγωγικότητα ενός αιολικού πάρκου. Περιγράφει το ποσοστό του χρόνου (σε συγκεκριμένη περιοχή) που η ταχύτητα του ανέμου λαμβάνει τιμές εντός συγκεκριμένου εύρους τιμών. Αυτή η κατανομή, σε συνδυασμό με την καμπύλη ισχύος της προτεινόμενης ανεμογεννήτριας (που ταιριάζει στα συγκεκριμένα ανεμολογικά χαρακτηριστικά), καθορίζουν μαζί την παραγωγή ενέργειας από τη συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια στη συγκεκριμένη περιοχή [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

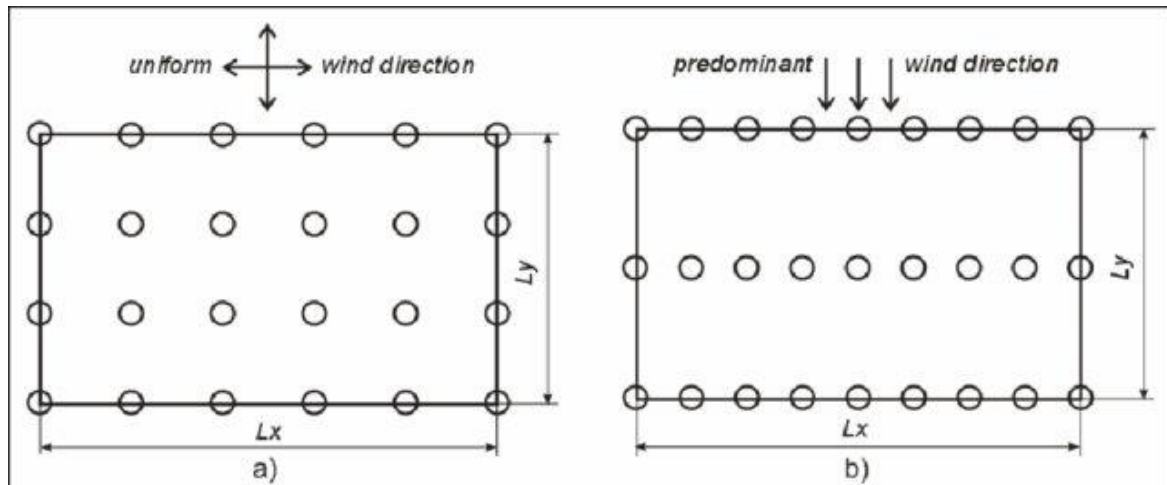
Ως παράδειγμα μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε δύο διαφορετικές τοποθεσίες Α και Β με διαφορετικά ανεμολογικά χαρακτηριστικά. Στην περιοχή Α ο άνεμος φυσάει μόνιμα στα 9 m/s με αποτέλεσμα ένα σύγχρονο αιολικό πάρκο στη συγκεκριμένη περιοχή να έχει υψηλή ενεργειακή απόδοση. Στην περιοχή Β υποθέτουμε ότι ο άνεμος φυσάει στα 4 m/s (κάτω από την αξιοποιήσιμη ταχύτητα ανέμου (cut-in speed) για μια τυπική ανεμογεννήτρια) για το ένα τρίτο του χρόνου, στα 26 m/s (πάνω από την αξιοποιήσιμη ταχύτητα ανέμου (cut-out speed) για τις περισσότερες ανεμογεννήτριες) για το ένα τρίτο του χρόνου και τέλος στα 9 m/s για το ένα τρίτο του χρόνου. Η μέση ταχύτητα ανέμου για την τοποθεσία Β προκύπτει ως εξής:

$$(1/3) \times (4 + 9 + 26) = 13 \text{ m/s}$$

πολύ υψηλότερη από την αντίστοιχη στην τοποθεσία Α, αλλά η απόδοση ενέργειας στην τοποθεσία Β θα ήταν αρκετά χαμηλότερη από αυτήν της τοποθεσίας Α (λόγω των ακραίων και μη αξιοποιήσιμων τιμών ταχύτητας ανέμου για τα 2/3 του χρόνου). Από ένα τέτοιο παράδειγμα μπορούμε απλοϊκά να συμπεράνουμε ότι η μέση ταχύτητα του ανέμου από μόνη της δεν αρκεί για να περιγράψει την πιθανή αξιοποιήσιμη ενέργεια σε μια τοποθεσία. Οι παραπάνω κατανομές χρησιμοποιούνται μόνο ως παράδειγμα, αφού δεν είναι ρεαλιστικές [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

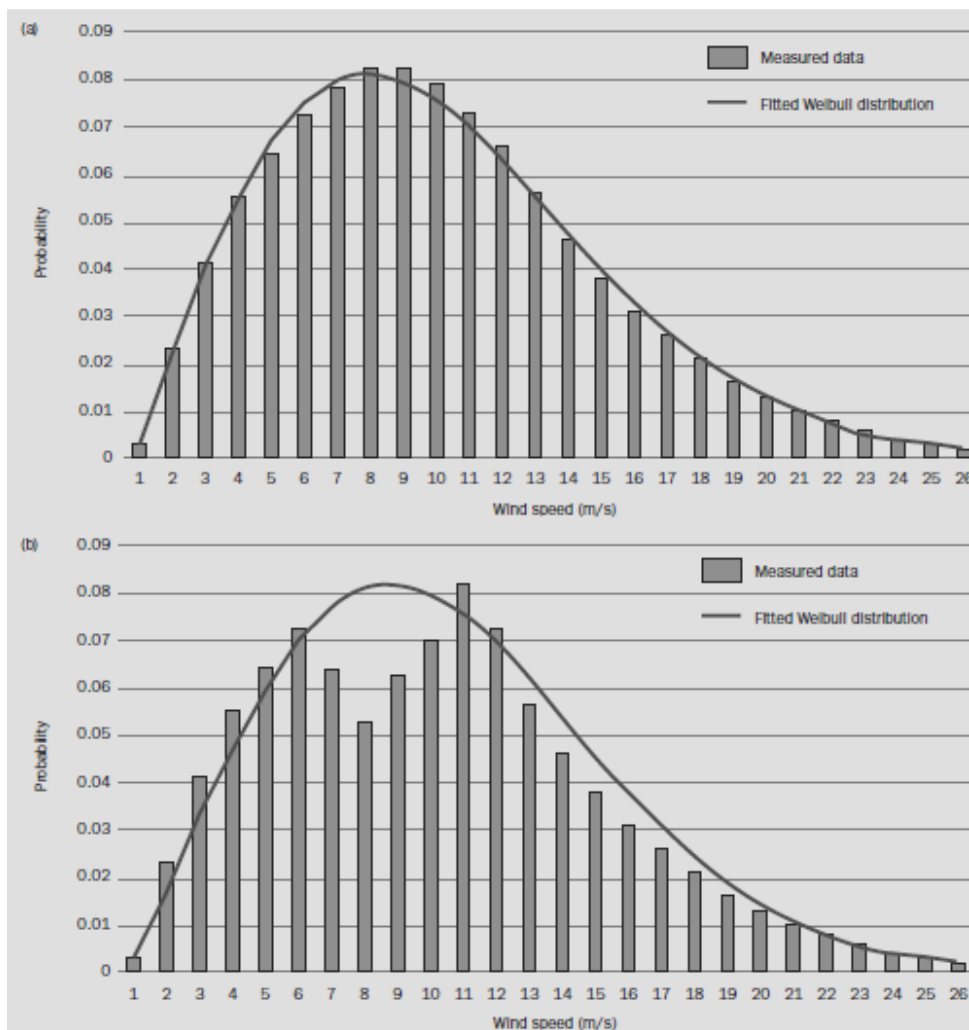


Εικόνα 1.17: Ροδόγραμμα ανέμου (windrose) [Πηγή: <https://www.wind-energy-the-facts.org>].



Εικόνα 1.18: Διαφορετική χωροθέτηση των ανεμογεννητριών σε αιολικό πάρκο, για την περίπτωση ομοιόμορφης διανομής στην διεύθυνσης του ανέμου (αριστερά) και για την περίπτωση κύριας διεύθυνσης του ανέμου (δεξιά)
[Πηγή: Mustakerov & Borissova, 2011].

Δύο πιο ρεαλιστικές κατανομές ταχύτητας ανέμου παρουσιάζονται στην **Εικόνα 1.19**. Στη συγκεκριμένη εικόνα εμφανίζεται η πραγματική κατανομή ταχύτητας ανέμου, καθώς και η προσαρμογή μιας κατανομής Weibull στις πραγματικές μετρήσεις. Η κατανομή Weibull εμφανίζει πολύ καλή προσέγγιση της κατανομής της ταχύτητας του ανέμου σε αρκετές περιοχές και για το λόγο αυτό τη χρησιμοποιούμε συχνά για τον ανεμολογικό χαρακτηρισμό μιας τοποθεσίας. Η κατανομή αυτή προσδιορίζει την πιθανότητα, η ταχύτητα του ανέμου να πάρει μία συγκεκριμένη τιμή, ενώ χρησιμοποιεί δύο παραμέτρους, την παράμετρο σχήματος (shapeparameter) και την παράμετρο κλίμακας (scaleparameter). Η παράμετρος κλίμακας είναι συνάρτηση της μέσης τιμής της ταχύτητας του ανέμου, ενώ η παράμετρος σχήματος περιγράφει το εύρος της κατανομής. Η χρήση της κατανομής Weibull, επιτρέπει την περιγραφή των χαρακτηριστικών της ταχύτητας του ανέμου σε μία περιοχή, με τη χρήση μόνο δύο παραμέτρων. Οι τιμές των εν λόγω παραμέτρων ποικίλουν ανάλογα με την τοποθεσία, επειδή εξαρτώνται από τη διαμόρφωση του εδάφους, καθώς και από τις τοπικές κλιματικές συνθήκες [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].



Εικόνα 1.19: Πειραματικές κατανομές ταχύτητας ανέμου σε δύο διαφορετικές περιοχές, μαζί με τις αντίστοιχες κατανομές Weibull. Στην πάνω εικόνα, οι μετρήσεις προσεγγίζονται πολύ καλύτερα από την κατανομή Weibull [Πηγή: <https://www.wind-energy-the-facts.org>].

Ωστόσο, όπως φαίνεται και από την **Εικόνα 1.19**, απαιτεί προσοχή η χρήση της εφαρμογής Weibull. Αυτό διότι για πολλές περιοχές μπορεί να παρέχει καλή ομοιότητα με την πραγματική κατανομή ταχύτητας ανέμου, όμως υπάρχουν ορισμένες περιοχές με κλιματολογικές συνθήκες, όπου οι διαφορές μπορεί να είναι σημαντικές.

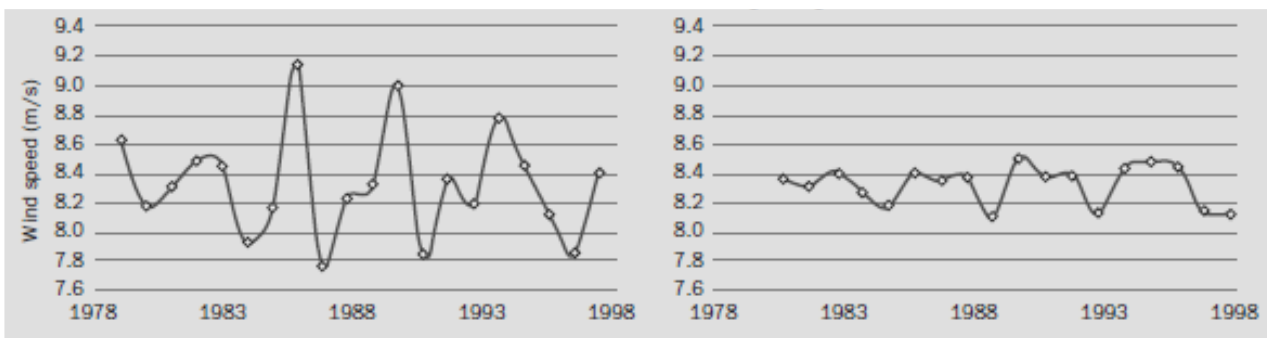
Η ετήσια μεταβλητότητα στο ροδόγραμμα ανέμου και στην κατανομή συχνότητας του ανέμου είναι επίσης σημαντική για την αξιολόγηση της αβεβαιότητας στην ετήσια παραγωγή ενέργειας ενός αιολικού πάρκου. Στο επόμενο παράδειγμα θα λάβουμε υπόψη μόνο την ετήσια διακύμανση της μέσης ταχύτητας του ανέμου, καθώς συνήθως οι υπόλοιποι παράγοντες έχουν μικρή επίδραση [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

Ετήσια μεταβλητότητα

Στη συνέχεια θα παρουσιάστεί ένα παράδειγμα με απεικόνιση τυπικών επιπέδων ετήσιας μεταβλητότητας στην ταχύτητα του ανέμου, που επιδιώκει να αποτιμήσει την αξία της πρόβλεψης σε περίπτωση που υπάρχουν διαθέσιμα ανεμολογικά δεδομένα ενός, τριών, ή παραπάνω ετών για μια περιοχή, και ποιό σφάλμα λαμβάνει χώρα σε κάθε περίπτωση.

Στην **Εικόνα 1.20** παρουσιάζεται ημεταβολή της μέσης ταχύτητας του ανέμου, που καταγράφηκε στον Μετεωρολογικό Σταθμό Malin Head στην Ιρλανδία για μια περίοδο 20 ετών. Είναι εμφανής η σημαντική διακύμανση στην ετήσια μέση ταχύτητα ανέμου, με τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές να κυμαίνονται από 7,8 m/s έως περίπου 9,2 m/s. Η τυπική απόκλιση της μέσης ετήσιας ταχύτητας ανέμου κατά την περίοδο των 20 ετών είναι περίπου 5% του μέσου όρου.

Ο **Πίνακας 1.1** παρουσιάζει τιμές μέσης ταχύτητας ανέμου και ετήσιας παραγωγής ενέργειας (για ένα τυπικό αιολικό πάρκο 10 MW τοποθετημένο στο MalinHead της Ιρλανδίας) για τα έτη με την μέση ταχύτητα ανέμου, την μέγιστη και την ελάχιστη. Ο πίνακας δείχνει ότι αν είχαν πραγματοποιηθεί μετρήσεις στην ταχύτητα του ανέμου για ένα μόνο χρόνο και είχαν χρησιμοποιηθεί αυτές οι μετρήσεις για πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς του αιολικού δυναμικού (με την προϋπόθεση ότι αυτό το έτος θα ήταν αντιπροσωπευτικό της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς) τότε η μακροπρόθεσμη πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου στην τοποθεσία θα είχε 10 % περιθώριο σφάλματος. Όσον αφορά στην παραγωγή ενέργειας, είναι προφανές ότι η προβλεπόμενη παραγόμενη ενέργεια θα μπορούσε να σφάλει κατά περίπου 14%, εάν είχε γίνει η παραπάνω υπόθεση. Για μια τοποθεσία χαμηλότερης ταχύτητας ανέμου, ένα σφάλμα 10% στην ταχύτητα του ανέμου θα μπορούσε εύκολα να έχει επίδραση 20% στην παραγωγή ενέργειας, λόγω της υψηλότερης ευαισθησίας της παραγωγής ενέργειας στις αλλαγές στην ταχύτητα του ανέμου, σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].



Εικόνα 1.20: Η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου στο MalinHead της Ιρλανδίας για περίοδο 20 ετών (αριστερά). Κυλιόμενη μέση τιμή 3 ετών για το ίδιο χρονικό διάστημα (δεξιά) [Πηγή: <https://www.wind-energy-the-facts.org>].

Πίνακας 1.1: Τιμές μέσης ταχύτητας ανέμου και ετήσιας παραγωγής ενέργειας (για ένα τυπικό αιολικό πάρκο 10 MW τοποθετημένο στο Malin Head της Ιρλανδίας) για τα έτη με την μέση ταχύτητα ανέμου, την μέγιστη και την ελάχιστη [Πηγή: <https://www.wind-energy-the-facts.org>].

	Annual mean wind speed (m/s)	Percentage of average year (%)	Energy production (MWh/annum)	Percentage of average year (%)
Lowest wind speed year (1987)	7.77	93.3	29,491	89.8
Average year	8.33	100.0	32,847	100.0
Highest wind speed year (1986)	9.16	110.0	37,413	113.9

Μεταβλητότητα τριών ετών

Στην **Εικόνα 1.20** (δεξιά) απεικονίζονται τα ίδια δεδομένα όπως παρουσιάζονται στην **Εικόνα 1.20** (αριστερά) αλλά σε αυτήν την περίπτωση έχει ληφθεί τριετής κυλιόμενος μέσος όρος των δεδομένων. Είναι προφανές ότι η μεταβλητότητα στη μέση ταχύτητα ανέμου σε τριετείς περιόδους μειώνεται σημαντικά σε σύγκριση με εκείνη των περιόδων διάρκειας ενός έτους. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1.1** αναπαράγονται στον **Πίνακα 1.2**, αυτή τη φορά με βάση τους υψηλότερους και χαμηλότερους μέσους όρους περιόδου τριών ετών.

Πίνακας 1.2: Τιμές μέσης ταχύτητας ανέμου και ετήσιας παραγωγής ενέργειας (για ένα τυπικό αιολικό πάρκο 10 MW τοποθετημένο στο Malin Head της Ιρλανδίας) για τα έτη με την μέση ταχύτητα ανέμου, την μέγιστη και την ελάχιστη (για τριετή κυλιόμενο μέσο όρο) [Πηγή: <https://www.wind-energy-the-facts.org>].

	Annual mean wind speed (m/s)	Percentage of average year (%)	Energy production (MWh/annum)	Percentage of average year (%)
Lowest wind speed year (1989)	8.10	97.2	31,540	96.0
Average year	8.33	100.0	32,847	100.0
Highest wind speed year (1990)	8.51	102.2	33,871	103.1

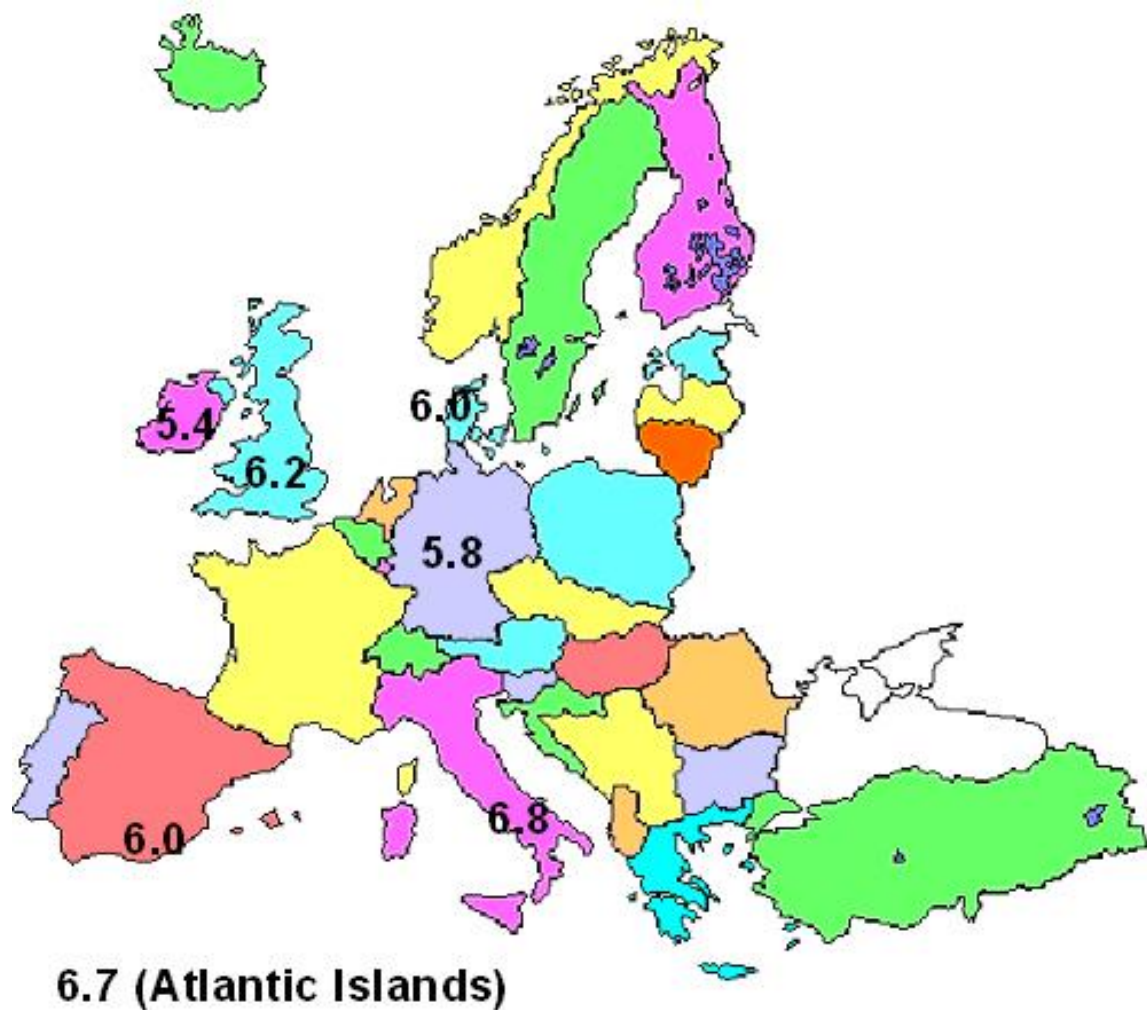
Ο **Πίνακας 1.2** δείχνει χαρακτηριστικά ότι, εάν διατίθενται δεδομένα τριών ετών από μια τοποθεσία, οι μέγιστες αποκλίσεις στην ταχύτητα του ανέμου και στην παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια της 20-ετούς περιόδου μειώνονται ουσιαστικά. Πιο συγκεκριμένα, οι αποκλίσεις 10% και 14% στην ταχύτητα και την ενέργεια του ανέμου αντίστοιχα, για την ανάλυση που βασίζεται σε ένα σύνολο δεδομένων ενός έτους, μειώνονται σε αποκλίσεις 3% και 4% αντίστοιχα όταν λαμβάνονται υπόψη περίοδοι τριών ετών [<https://www.wind-energy-the-facts.org>]. Το γεγονός αυτό από μόνο του δείχνει τη σημαντικότητα της ύπαρξης ανεμολογικών δεδομένων για μεγάλα χρονικά διαστήματα για την ορθή αξιολόγηση του αιολικού δυναμικού μιάς περιοχής.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο παράδειγμα είναι εστιασμένα σε μια τοποθεσία (MalinHead, Ιρλανδία) όμως μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικά για οποιαδήποτε άλλη εφαρμογή αιολικού πάρκου στην Ευρώπη. Η αξιοπιστία των μακροπρόθεσμων δεδομένων και η σταθερότητα του ανέμου είναι ένα ζήτημα πρωταρχικής σημασίας για την εμπορική αξιολόγηση και τη βιωσιμότητα ενός αιολικού πάρκου.

Στα πλαίσια ερευνητικής εργασίας [<https://www.wind-energy-the-facts.org>] συγκεντρώθηκαν ανεμολογικά δεδομένα από όλο τον κόσμο και έγινε προσπάθεια αναγνώρισης κάποιων κοινών χαρακτηριστικών του ανέμου ανά τόπους. Στα ανεμολογικά δεδομένα διάρκειας περίπου 30 ετών για κάθε περιοχή υπολογίστηκε ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση. Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο λόγος της τυπικής απόκλισης προς το μέσο όρο και βρέθηκε ότι ο λόγος αυτός διέφερε πολύ λίγο από τοποθεσία σε τοποθεσία. Η τάση αυτή παρατηρήθηκε σε πολλές περιοχές σε όλο τον κόσμο, καθώς δεδομένα συλλέχθηκαν από την Αυστραλία, την Ιαπωνία, τις ΗΠΑ και την Ευρώπη. Αυτό το αποτέλεσμα είναι χρήσιμο για τον προσδιορισμό της αναμενόμενης διακύμανσης του ανέμου. Τα αποτελέσματα για την Ευρώπη παρουσιάζονται στην **Εικόνα 1.21** [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

Από την παραπάνω έρευνα εξάγεται ότι η ετήσια μεταβλητότητα των μακροπρόθεσμων μέσων ταχυτήτων ανέμου σε τοποθεσίες σε ολόκληρη την Ευρώπη είναι παρόμοια και μπορεί να

περιγράφει μέσω κανονικής κατανομής με τυπική απόκλιση 6%. Αυτό το αποτέλεσμα παίζει σημαντικό ρόλο στην εκτίμηση της αβεβαιότητας και στην πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας για αιολικά πάρκα [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].



Εικόνα 1.21: Ανεμολογικός χάρτης της Ευρώπης: τιμή του λόγου της τυπικής απόκλισης ως προς τη μέση ταχύτητα του ανέμου σε κάθε περιοχή (%) [Πηγή: <https://www.wind-energy-the-facts.org>].

1.2.3 Η Μεταβολή της Ταχύτητας του Ανέμου με το Ύψος

Είναι γνωστό ότι σε μεγαλύτερα ύψόμετρα οι ταχύτητες των ανέμων αυξάνονται προοδευτικά. Όπως άλλωστε παρατηρήσαμε και στις [Εικόνες 1.1](#) έως [1.16](#), η κατανομή της έντασης των ανέμων στα 10 m από το έδαφος είναι διαφορετική από αυτή στα 100 m και ακόμα περισσότερο με εκείνη στα 200 m. Όσο αυξάνεται το ύψος από το έδαφος τόσο αυξάνεται και η ένταση των ανέμων σε μια συγκεκριμένη περιοχή.

Ο τρόπος με τον οποίο διαφοροποιείται η ταχύτητα του ανέμου σε σχέση με το ύψος από το έδαφος δεν είναι ίδιος σε κάθε περιοχή, αλλά εξαρτάται πολύ από το ανάγλυφο του εδάφους. Επίσης, το προφίλ της ταχύτητας του ανέμου (σε σχέση με την κατακόρυφη απόσταση από το έδαφος) δεν είναι γραμμικό. Ωστόσο, μετά από ένα ορισμένο ύψος (ίσο με το πάχος του οριακού

στρώματος ταχύτητας στη συγκεκριμένη γεωγραφική θέση) το ρεύμα ανέμου έχει ομοιόμορφη ταχύτητα και δεν γίνονται πλέον αισθητές αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος [Hemami, 2012]. Σε επόμενες παραγράφους θα αναλυθούν οι συνηθέστερες μαθηματικές σχέσεις, που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση (και προσέγγιση) της μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος.

1.2.4 Η Μεταβολή της Ταχύτητας του Ανέμου με τη Μορφολογία του Εδάφους

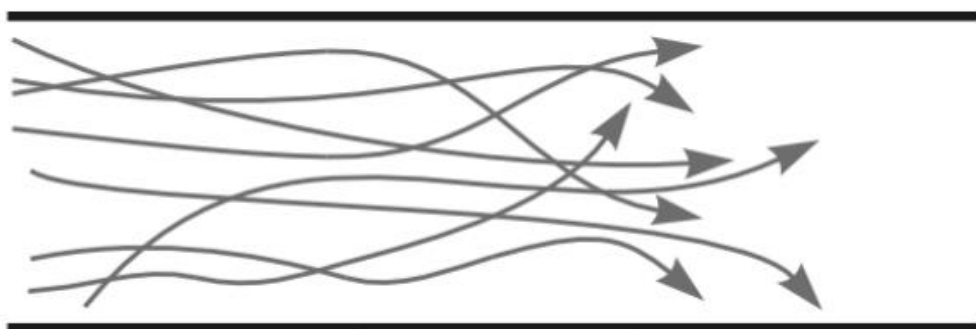
Εκτός από την αλλαγή στην ταχύτητα του ανέμου ανάλογα με το ύψος, εκείνη διαφοροποιείται και με τη μορφολογία του εδάφους της υπό εξέταση περιοχής. Αρκετά μακριά από την επιφάνεια της Γης επικρατεί περισσότερη σταθερότητα στα ρεύματα του ανέμου, όπου η διεύθυνση και η ταχύτητά του δεν διαταράσσονται σημαντικά.

Εμπόδια, όπως δένδρα, λόφοι, κτήρια των πόλεων, δημιουργούν ανομοιογένεια στο έδαφος και επιβραδύνουν τη ροή του αέρα. Αντίθετα σε μεγάλες επίπεδες εκτάσεις γης, όπου δεν υπάρχει πολύ βλάστηση, όπως και πάνω από λίμνες ή θάλασσες, εκεί δηλαδή όπου μειώνεται η τραχύτητα της επιφάνειας, παρατηρείται πιο ελεύθερη ροή του ανέμου και αυξάνεται η ταχύτητά του σε μικρότερα ύψη από την επιφάνεια [Hemami, 2012].

1.2.5 Η Τύρβη και η ανάπτυξη του οριακού στρώματος

Η τύρβη του ανέμου χαρακτηρίζει την (τυχαία) μεταβλητότητα στο πεδίο ροής του ανέμου με τον χρόνο και τον στροβιλισμό που δημιουργείται εξαιτίας αυτού του φαινομένου (Εικόνα 1.22). Η ένταση της τύρβης ορίζεται ως το πηλίκο, της τυπικής απόκλισης των παραλλαγών της ταχύτητας του ανέμου, ως προς τη μέση τιμή της ταχύτητας αυτού:

$$I = \sigma/u$$



Εικόνα 1.22: Απεικόνιση τυρβώδους ροής [Πηγή:

https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/4185/1/%CE%9ACE%B5%CF%86%CE%B1%CC%81%CE%BB%CE%B1%CE%B9%CE%BF_3.pdf].

Βασική αιτία που προκαλεί την τύρβη του ανέμου είναι η τριβή του με την επιφάνεια της γης, λόγω των τοπογραφικών χαρακτηριστικών (λόφοι, βουνά, κτήρια, δάση). Επιπλέον, οι θερμοκρασιακές μεταβολές αλλάζουν και την πυκνότητα του αέρα, ενώ προκαλούν κατακόρυφη κίνηση αέριων

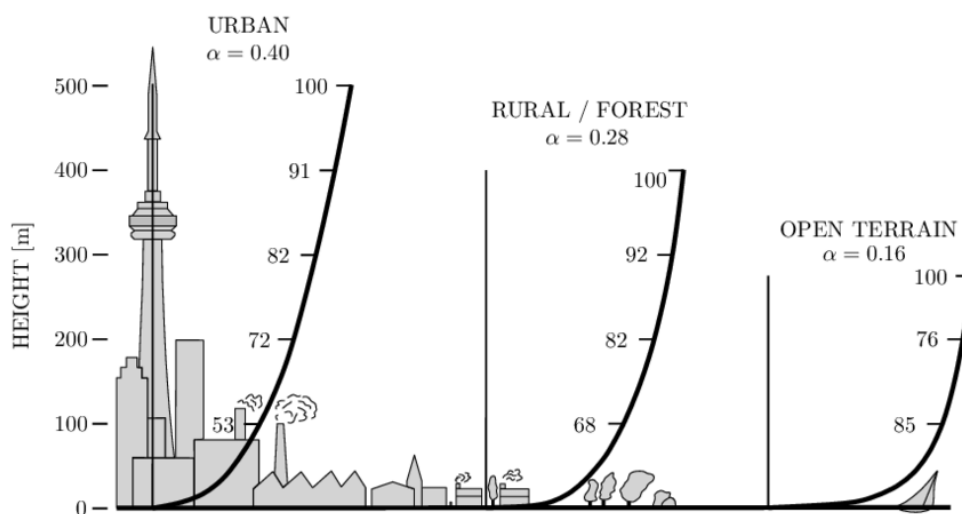
μαζών. Συχνά οι δύο αυτές περιπτώσεις συνδέονται, αφού όταν μια αέρια μάζα ρέει πάνω από μία οροσειρά, ωθείται σε ψυχρότερες περιοχές, οπότε ψύχεται αναγκαστικά.

Η τύρβη αποτελεί ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο φαινόμενο που είναι δύσκολο να αναπαράσταθεί γραφικά και μαθηματικά (**Εικόνα 1.22**). Την περιγράφουμε έμμεσα χρησιμοποιώντας τους νόμους διατήρησης μάζας, ορμής και ενέργειας (διαφορικές εξισώσεις ροής), όπου η τύρβη εμφανίζεται ως αποτέλεσμα της παρουσίας μη γραμμικών όρων στις διαφορικές εξισώσεις ορμής. Για την απλοποιημένη μοντελοποίηση της τύρβης (σε εφαρμογές Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής - Computational Fluid Dynamics - CFD), συνήθως εισάγονται επιπλέον διαφορικές εξισώσεις (μοντέλα τύρβης - turbulence models), τα οποία επιτρέπουν την ευκολότερη και ταχύτερη προσομοίωση των αντίστοιχων φαινομένων, με κόστος όμως στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Όσον αφορά στις ανεμογεννήτριες είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπ' όψη η τύρβη του ανέμου, όχι μόνο για την ακριβή μοντελοποίηση του επαγόμενου πεδίου ροής, αλλά και για τον υπολογισμό των μεταβαλλόμενων φορτίων, που μπορούν να οδηγήσουν σε γήρανση και πρόωρη φθορά των υλικών τους [Burton et al., 2001].

Οριακό στρώμα ταχύτητας είναι η περιοχή της ροής κοντά σε στερεές επιφάνειες, όπου υπάρχει σχετικά ομαλή μετάβαση από την μηδενική (σχετική) ταχύτητα πάνω στη στερεή επιφάνεια έως την ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής, μακριά από την στερεή επιφάνεια. Η ομαλή αυτή μετάβαση της ταχύτητας οφείλεται στη δράση των διατμητικών τάσεων (τάσεων τριβής), οι οποίες είναι σημαντικές εντός του οριακού στρώματος (λόγω της κλίσης της ταχύτητας), αλλά σχεδόν αμεληταίες εκτός του οριακού στρώματος.

Έτσι, το πεδίο ροής μπορεί να χωριστεί σε δύο διακριτές περιοχές, το οριακό στρώμα και την περιοχή εκτός του οριακού στρώματος, στην οποία το ιξώδες παύει να αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη διαμόρφωση της ροής. Για τη διαμόρφωση του οριακού στρώματος, που αναπτύσσεται πάνω από το έδαφος για την περίπτωση του ανέμου, σημαντικό ρόλο παίζει η τραχύτητα του εδάφους, η παρουσία εμποδίων (κτίρια, δάση, κ.λπ.), καθώς και το θερμοκρασιακό πεδίο (**Εικόνα 1.23**).



Εικόνα 1.23: Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους στη διαμόρφωση του οριακού στρώματος του ανέμου [Recoskie et al., 2017].

1.3 Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται στις βασικές κατηγορίες **οριζοντίου άξονα** και **κατακόρυφου άξονα**, ανάλογα με τη στοίχιση που έχει ο κύριος άξονάς τους (άτρακτος). Γύρω από αυτόν περιστρέφονται τα διάφορα μέρη της ανεμογεννήτριας (πτερωτή, άτρακτος, πυρήνας ηλεκτρογεννήτριας, κ.λπ.). Στις οριζοντίου άξονα εκείνος είναι συνεχώς παράλληλος με το έδαφος και την κατεύθυνση του ανέμου, ενώ στη δεύτερη κατηγορία είναι σταθερός και κατακόρυφος.

Η κατηγοριοποίηση επίσης μπορεί να γίνει και με βάση το είδος της ενεργούς δύναμης που στρέφει τις πτερωτές των ανεμογεννητριών.

Στα βασικά εξαρτήματα μιας ανεμογεννήτριας συγκαταλέγονται η πτερωτή, το σύστημα μετάδοσης κίνησης (ή κιβώτιο οδοντωτών τροχών), η ηλεκτρογεννήτρια, το σύστημα απόκλισης και το σύστημα ελέγχου της μηχανής [Τσαβαρή, 2018].

1.3.1 Ανεμογεννήτριες Οριζοντίου Άξονα

Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (HAWTs – Horizontal Axis Wind Turbines) είναι οι πιο διαδεδομένες, ενώ επιτυγχάνουν υψηλή απόδοση πολλών kW. Βασικά τμήματα που τις αποτελούν είναι ο πύργος στήριξης, η πτερωτή, ο άξονας (άτρακτος) περιστροφής, το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, το σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας, η ηλεκτρογεννήτρια και το σύστημα προσανατολισμού (**Εικόνα 1.24**).



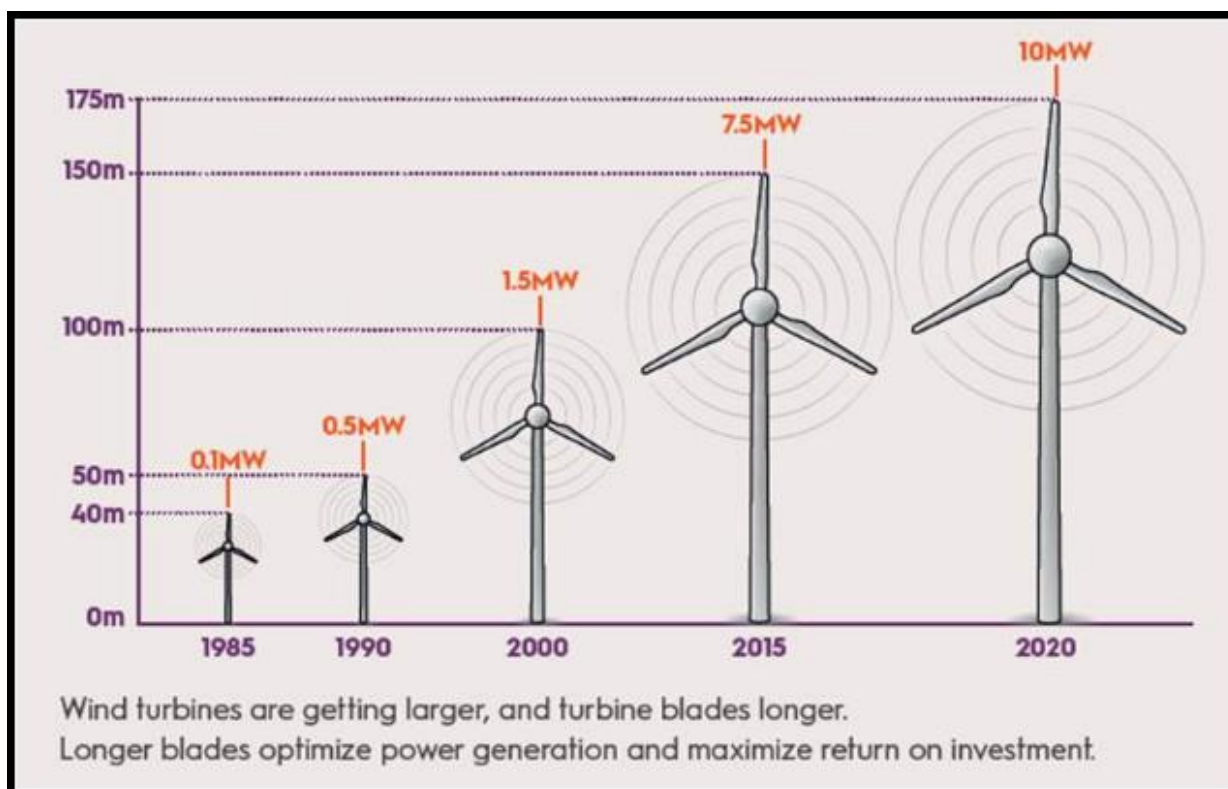
Εικόνα 1.24: Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα σε offshore αιολικό πάρκο [Πηγή: Wikipedia].

Αποτελεί τον πλέον δημοφιλή τύπο ανεμογεννήτριας, που οι περισσότεροι γνωρίζουν και μπορεί να αναγνωρίσουν. Φέρει την ηλεκτρογεννήτρια στην κορυφή ενός πύργου-ιστού, ενώ διαθέτει συνήθως τρία πτερύγια στην πτερωτή της. Ενώ η πτερωτή της δύναται να διαθέτει οποιονδήποτε αριθμό πτερυγίων, ωστόσο από έρευνες έχει αποδειχθεί ότι τρία είναι ο καλύτερος συνδυασμός από άποψη αποδοτικότητας και αποτελεσματικότητας. Τα πτερύγια τοποθετούνται σε απόσταση από τον πύργο στήριξης και μερικές φορές με μία μικρή κλίση προς τα εμπρός, ενώ το μήκος τους μπορεί να ξεπεράσει τα 100 m (**Εικόνα 1.25**).



Εικόνα 1.25: Πτερύγιο σύγχρονης ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα με μήκος 88.4 m [Πηγή: LM Wind Power].

Το μέγεθος και το ύψος των ανεμογεννητριών αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου (**Εικόνα 1.26**). Ανεμογεννήτριες που υποστηρίζουν αιολικά πάρκα διαθέτουν πτερύγια που ξεπερνούν πλέον τα 100 m, ενώ ταυτόχρονα ο πύργος στον οποίο στηρίζεται η γεννήτρια, κατασκευασμένος συνήθως από χάλυβα, μπορεί να περάσει σε ύψος τα 100 m ή σε ακραίες περιπτώσεις και τα 150 m.

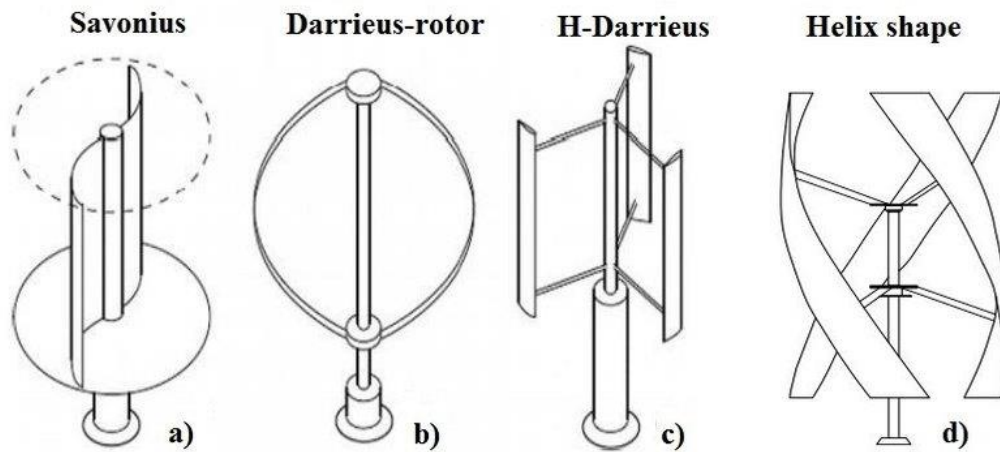


Εικόνα 1.26: Η εξέλιξη του μεγέθους των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα με τον χρόνο [Πηγή: <https://stopthesethings.com/2020/01/26/toxic-shock-millions-of-wind-turbine-blades-leave-poisoned-landfill-legacy-for-generations-to-come/>].

1.3.2 Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (VAWT – Vertical Axis Wind Turbines) παράγουν συνήθως λιγότερη ενέργεια σε σχέση με τις οριζοντίου άξονα και είναι λιγότερο συχνές. Η πτερωτή τους τοποθετείται κατακόρυφα πάνω από το έδαφος και λόγω του σχεδιασμού τους έχουν το βασικό πλεονέκτημα να είναι πιο αποδοτικές σε περιοχές, όπου η κατεύθυνση των ανέμων μεταβάλλεται αρκετά συχνά. Αυτό συμβαίνει διότι εκτελούν συνεχώς κατακόρυφη περιστροφή 360° και δεν χρειάζεται να αλλάζουν κάθε φορά τον προσανατολισμό τους, για να αξιοποιούν τον άνεμο. Ένα ακόμα πλεονέκτημά τους αφορά στην εύκολη πρόσβαση για μηχανική υποστήριξη και συντήρηση στον εξοπλισμό τους, όπως το κιβώτιο οδοντωτών τροχών και η ηλεκτρογεννήτρια, αφού αυτά τοποθετούνται κοντά στο έδαφος. Βασικά χαρακτηριστικά τους, όπως το υψηλό κόστος κατασκευής τους ή ο χαμηλός βαθμός απόδοσης, τις κάνουν να υστερούν έναντι των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα στο εμπορικό κομμάτι [Hemami, 2012].

Οι Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα διαχωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, όπως είναι οι τύπου H, οι Darrieus, οι Savonius και οι ελικοειδούς τύπου (Εικόνα 1.27).

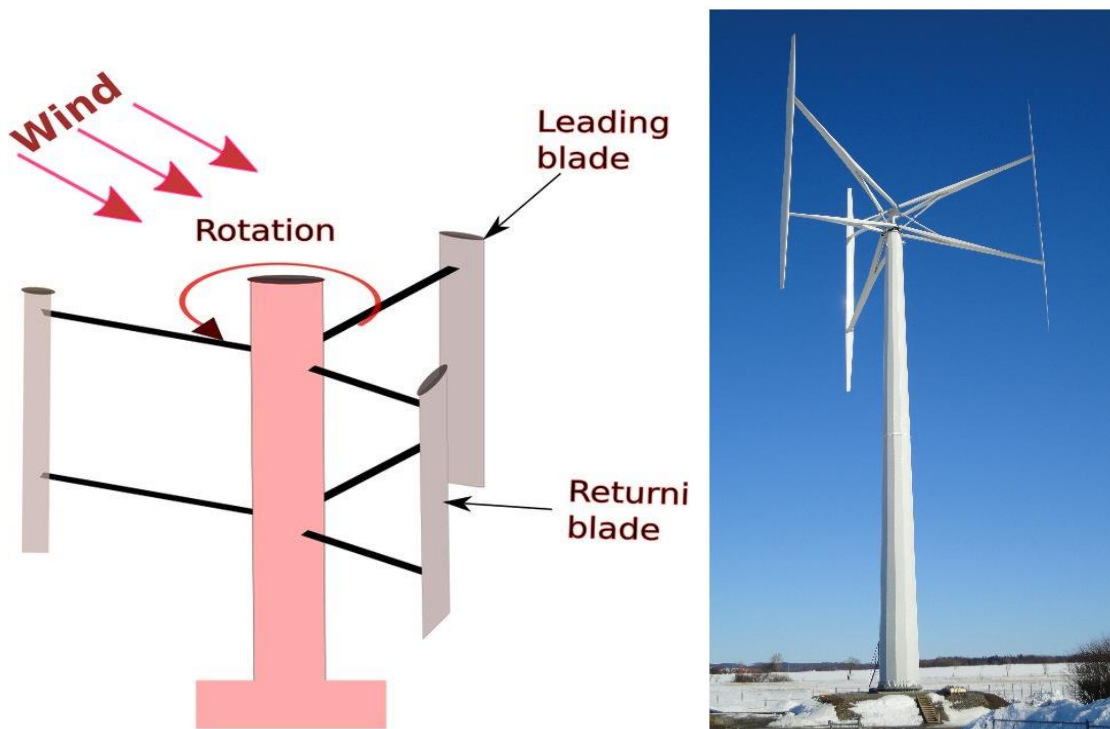


Εικόνα 1.27: Τύποι ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα [Πηγή:

https://www.researchgate.net/figure/Different-kinds-of-vertical-axis-wind-turbines-VAWT-a-Savonius-b-Darrieus-with_fig1_333316757].

A. Τύπου H

Η ανεμογεννήτρια τύπου H (**Εικόνα 1.28**) είναι κατακόρυφου άξονα, της οποίας τα πτερύγια σχηματίζουν το γράμμα H. Τα πτερύγια έχουν μορφή αεροτομής και χρησιμοποιούν τη δύναμη άνωσης για να παράξουν μία ροπή ώστε να περιστραφούν γύρω από τον κατακόρυφο άξονα περιστροφής. Δεδομένου ότι η πτερωτή έχει κατακόρυφο άξονα, δεν είναι ευαίσθητη στην κατεύθυνση του ανέμου [Hemami, 2012].



Εικόνα 1.28: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα τύπου H [Πηγή:

https://www.researchgate.net/figure/Three-bladed-H-rotor-Darrieus-turbine_fig1_330729122].

Β. Τύπου Darrieus

Οι ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus (**Εικόνα 1.29**) αποτελούν εφεύρεση του Γάλλου Ζορζ Ντάρριους και διαθέτουν πτερύγια αεροδυναμικής άνωσης με υψηλά επίπεδα ταχύτητας περιστροφής. Αυτά διαθέτουν συμμετρική αεροτομή, συχνά έχουν κυρτό σχεδόν ημικυκλικό σχήμα και προσφέρουν μεγάλη σταθερότητα στο ρότορα. Ο αέρας που περνά από τα πτερύγια δημιουργεί αεροδυναμική άνωση, λόγω της θετικής γωνίας προσβολής που αντικρίζουν σε σχέση με τη ροή του ανέμου, με αποτέλεσμα να αναγκάζονται σε περιστροφή. Έχουν καλή απόδοση, πολλές φορές όμως μπορεί να χρειάζονται μία εξωτερική πηγή ενέργειας για να ξεκινήσει η περιστροφή της πτερωτής, καθώς εμφανίζει πολύ χαμηλή ροπή εκκίνησης [Hemami, 2012]. Νεότερη παραλλαγή των ανεμογεννητριών τύπου Darrieus αποτελούν οι ανεμογεννήτριες κατακορύφου άξονα ελικοειδούς μορφής (Helix) (**Εικόνα 1.30**).



Εικόνα 1.29: Ανεμογεννήτρια κατακορύφου άξονα τύπου Darrieus [Πηγή: http://www.wind-works.org/cms/index.php?id=64&tx_ttnews%5Btt_news%5D=5322&cHash=345e48d80ec1772b603ffc838ab3a6e].



Εικόνα 1.30: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα ελικοειδούς μορφής, τύπου Helix [Πηγή: <https://vwtpower.com/>].

Γ. Τύπου Savonius

Η ανεμογεννήτρια τύπου Savonius (**Εικόνα 1.31**) εφευρέθηκε το 1922 από τον Φιλανδό μηχανικό S.J. Savonius. Πρόκειται για μία πολύ απλής φιλοσοφίας ανεμογεννήτρια, που λειτουργεί χρησιμοποιώντας κατά κύριο λόγο την αντίσταση του ανέμου. Σε μία απλοϊκή της μορφή αποτελείται από τα δύο μισά ενός κυλίνδρου, προσαρτημένα σε αντίθετες κατευθύνσεις πάνω σε ένα κατακόρυφο άξονα περιστροφής, σχηματίζοντας το γράμμα S. Είναι εφικτό κάποιος να προσθέσει περισσότερους μισούς κυλίνδρους στον άξονα περιστροφής, προκειμένου να αυξήσει την ικανότητα δέσμευσης του ανέμου και άρα την αποτελεσματικότητα της πτερωτής. Αυτό πρακτικά γίνεται με την εγκατάσταση ενός δεύτερου σετ ημικυλίνδρων σε γωνία 90° από το υπάρχον και ουσιαστικά είναι ισοδύναμο με την αύξηση του μήκους των πρώτων τμημάτων.

Σε κάθε στιγμή ένα πτερύγιο συλλαμβάνει τον αέρα, ο οποίος κινείται κάθετα σε αυτό, την ίδια ώρα που τα υπόλοιπα πτερύγια κινούνται (περιστρεφόμενα) σε αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του ανέμου. Η ροπή που αποκτά κάθε στιγμή πτερωτή προκύπτει από την ροπή που αποκτά το πτερύγιο που εγκλωβίζει την αιολική ενέργεια, μείον την αντίσταση στον άνεμο που προκαλούν τα

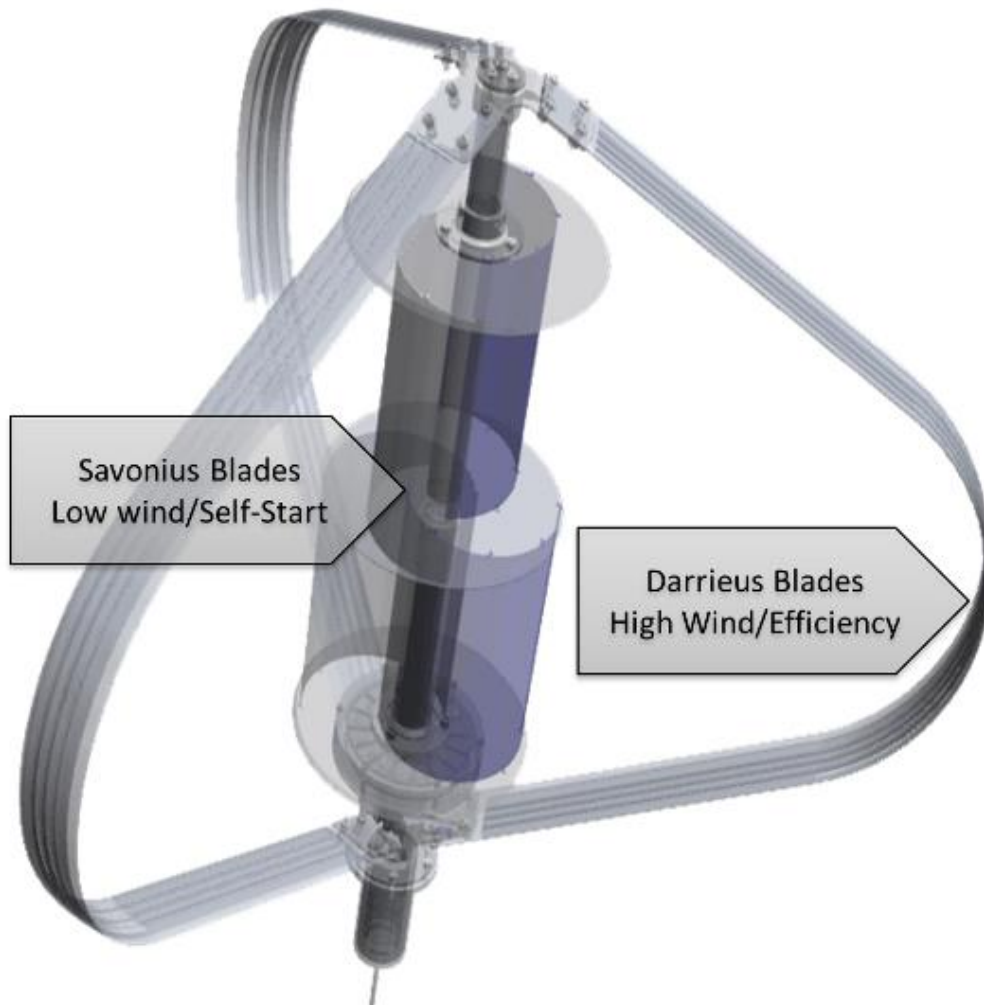
υπόλοιπα πτερύγια. Μία ανεμογεννήτρια Savonius μπορεί μεν να συλλάβει και να αξιοποιήσει ανέμους σε πολύ χαμηλές ταχύτητες, παρ' όλα αυτά δεν παύει να αποτελεί μια αρκετά ογκώδη κατασκευή με μικρό συντελεστή απόδοσης, που περιορίζεται μόλις στο 25% [Hemami, 2012].



Εικόνα 1.31: Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα τύπου Savonius [Πηγή: pinterest.de , pixabay.com].

Δ. Υβριδικές ανεμογεννήτριες

Συναντώνται επίσης ανεμογεννήτριες συνδυασμένου τύπου, που βασίζονται πάνω στον ίδιο άξονα περιστροφής. Αυτές ονομάζονται υβριδικές ανεμογεννήτριες και φέρουν μια λύση στο πρόβλημα της αυτο-εκκίνησης μιας ανεμογεννήτριας. Πρόκειται για συνδυασμό των δύο παραπάνω τύπων ανεμογεννητριών, όπου η Savonius έχει την ικανότητα να τίθεται σε λειτουργία και να παράγει έργο από χαμηλές ταχύτητες αέρα, ενώ η Darrieus παίρνει την αρχική απαιτούμενη ροπή εκκίνησης από τη Savonius, έτσι ώστε να ξεκινήσει και εκείνη την περιστροφή της (**Εικόνα 1.32**). Επίσης, κατά τη λειτουργία προσφέρουν και οι δύο ανεμογεννήτριες στη συνολική παραγόμενη ενέργεια. Εφαρμογή μπορεί να έχει και σε θαλάσσιο περιβάλλον με τη Savonius να λειτουργεί ως υδροστρόβιλος μέσα στο νερό, και τη Darrieus να λειτουργεί με τον αέρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας [Μπαγιάτης, 2015].



Εικόνα 1.32: Υβριδική ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα [Πηγή: hi-vawt.com.tw].

1.3.3 Ανεμογεννήτριες Ειδικού Τύπου

Σε περιπτώσεις όπου οι συμβατικές ανεμογεννήτριες είναι ανέφικτο να εγκατασταθούν σε μια περιοχή, λόγω του μεγέθους τους ή των χαμηλών ταχυτήτων του αέρα, συχνά κρίνεται αναγκαία η επεξεργασία μιας πιο καινοτόμας εφαρμογής. Μια παραλλαγή ανεμογεννήτριας, που έχει δημιουργηθεί προκειμένου να αξιοποιείται ο άνεμος σε πιο ιδιαίτερες συνθήκες, είναι η ανεμογεννήτρια υποβοηθούμενη από διαχύτη (Diffuser Augmented Wind Turbine - DAWT) (**Εικόνα 1.33**). Ως χαρακτηριστικό αυτή διαθέτει έναν στατικό διαχύτη (diffuser), τοποθετημένο γύρω από τον δρομέα, έτσι ώστε να αναγκάζει μεγαλύτερη ποσότητα αέρα να περνάει μέσα από το στρόβιλο και παράλληλα να επιτυγχάνει την αύξηση της ταχύτητάς του. Αποτελεί μια σαφώς μικρότερη και ευέλικτη για εγκατάσταση εφαρμογή, καθώς μπορεί να έχει πτερύγια μικρότερου μήκους και ρότορες μικρότερης διαμέτρου και να μπορεί να παράγει μεγαλύτερη ισχύ, μέσω της αύξησης της ταχύτητας του ανέμου. Η φιλοσοφία της είναι να απορροφά μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας από τον άνεμο και να επιτυγχάνει αρκετά μεγαλύτερους συντελεστές ισχύος, συγκριτικά με μία συμβατική ανεμογεννήτρια με αντίστοιχη διάμετρο ρότορα [Τερζάκης, 2018].



Εικόνα 1.33: Diffuser Augmented Wind Turbine – DAWT [Πηγή: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-13531-7_13].

1.4 Αιολικά Πάρκα

1.4.1 Ανάπτυξη Αιολικού Πάρκου

Ως αιολικό πάρκο εννοούμε μια έκταση γης στην οποία εγκαθίσταται αριθμός ανεμογεννητριών, με σκοπό να εκμεταλλευτούμετο αιολικό δυναμικό της συγκεκριμένης περιοχής. Ουσιαστικά αποτελεί ένα σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου βέβαια η παραγωγή δεν γίνεται με κάποιο συμβατικό τρόπο. Απαρτίζεται από έναν αριθμό ανεμογεννητριών, των οποίων το μέγεθος και το πλήθος τους αλλά και το αιολικό δυναμικό της περιοχής καθορίζουν την παραγόμενη ισχύ και τη δυναμικότητα του πάρκου.

Καθώς η φιλοσοφία σχεδίασης ενός αιολικού πάρκου στηρίζεται στην μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική, βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη ενός αιολικού πάρκου σε μία περιοχή είναι να υπάρχουν ευνοϊκές συνθήκες και ικανοποιητικές ταχύτητες ανέμων. Έτσι, μια περιοχή της γης που φαίνεται να είναι ευάλωτη σε έντονα ανεμολογικά φαινόμενα, πιθανώς να αποτελεί ένα κατάλληλο μέρος για την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου. Μια απλή παρατήρηση αυτού του τύπου όμως δεν αρκεί για να δρομολογηθεί ένα τόσο μεγάλο και κοστοβόρο έργο. Απαιτείται να μελετηθούν ιστορικά ανεμολογικά δεδομένα και χάρτες αιολικών πόρων για διάφορες περιοχές μιας ευρείας έκτασης, προκειμένου να αποκτηθεί σαφής εικόνα για

τη μέση ταχύτητα των ανέμων. Στη συνέχεια ακολουθεί εστιασμένη παρακολούθηση και συλλογή εκτεταμένων μετρήσεων σε κάποιες γεωγραφικές τοποθεσίες που εμφανίζουν καλύτερα ανεμολογικά χαρακτηριστικά. Αυτό πραγματοποιείται με την εγκατάσταση σε μία τέτοια τοποθεσία ενός μετεωρολογικού πύργου, που διαθέτει όργανα καταγραφής των καιρικών συνθηκών, αλλά και της ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου. Ένας τέτοιος πύργος μπορεί να έχει ύψος από 10 m έως 70 m, ανάλογα με το είδος των μετρήσεων. Σε περιπτώσεις που δεν υπάρχουν ιστορικά δεδομένα, η μελέτη και η άντληση δεδομένων δύναται να κρατήσει τρία ή και παραπάνω χρόνια [Hemami, 2012].

Μια άλλη βασική προϋπόθεση για την ανάπτυξη ενός αιολικού πάρκου είναι να υπάρχει διαθέσιμη γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή και να έχει γίνει επαλήθευση χωρητικότητας σε αυτή, ώστε να μπορεί να διοχετευθεί η παραγόμενη ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο. Επίσης, ζωτικής σημασίας αποτελεί η κατάθεση φακέλου και η έγκριση της κατασκευής του αιολικού πάρκου από τις αρμόδιες αρχές (με βάση τυποποιημένες διαδικασίες που ισχύουν για κάθε κράτος). Αξίζει να σημειωθεί ότι σε παγκόσμιο επίπεδο, πολλές κυβερνήσεις αποδίδουν φορολογικές ελαφρύνσεις προκειμένου να ενθαρρύνουν τη δημιουργία τέτοιων έργων, όπως ένα αιολικό πάρκο και γενικότερα τις επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [Hemami, 2012].



Εικόνα 1.34: Το αιολικό πάρκο Χανδρά στην ανατολική Κρήτη [Πηγή: <http://www.greekscapes.gr/index.php/2010-01-21-16-47-29/landscapescat/67-2009-07-31-09-57-33/168-anemogennitries-kritis>].

1.4.2 Τοποθέτηση Αιολικού Πάρκου

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι πολλά τα κριτήρια που πρέπει να ικανοποιούνται για την χωροθέτηση ενός αιολικού πάρκου. Συνήθως ως τοποθεσίες επιλέγονται λόφοι, βουνά, πεδιάδες

και παράκτιες περιοχές, όπου και συναντούνται ικανοποιητικά ανεμολογικά δεδομένα. Χρειάζεται όμως ιδιαίτερη προσοχή στις κλιματολογικές και καιρικές συνθήκες της περιοχής, και στην μορφολογία του εδάφους. Αν το έδαφος είναι ασταθές ή έχει μεγάλες κλίσεις, τότε αυξάνεται η δυσκολία και το κόστος εγκατάστασης, ενώ μπορεί να επηρεάσει τη λειτουργική απόδοση και την ασφάλεια του έργου. Απ' την άλλη, συχνές και ισχυρές ριπές ανέμων ή σημαντική πιθανότητα εμφάνισης τυφώνων ή ακραίων τιμών στην ταχύτητα του ανέμου, δεν σημαίνουν την ταχύτερη περιστροφή των ανεμογεννητριών και άρα την μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας. Αντί αυτού αποτελούν καταστροφικές συνθήκες για ένα αιολικό πάρκο, που μειώνουν την απόδοση και τη βιωσιμότητά του. Εξάλλου, σε μια δυνατή καταιγίδα οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν το σύστημα πέδησης για να σταματήσουν τη λειτουργία τους, προλαμβάνοντας έτσι πιθανή ζημιά στα μηχανικά μέρη τους [Hemami, 2012].

Η προσαρμογή ενός αιολικού πάρκου σε ένα τόπο βασίζεται μεν στην τήρηση κρατικών προδιαγραφών αλλά και στη θετική στάση των κατοίκων των γύρω περιοχών. Εκτός αυτών πρέπει και αισθητικά να εντάσσεται στο περιβάλλον, τα επίπεδα θορύβου να μην προκαλούν προβλήματα και να μην διαταράσσεται ιδιαίτερα το περιβάλλον.

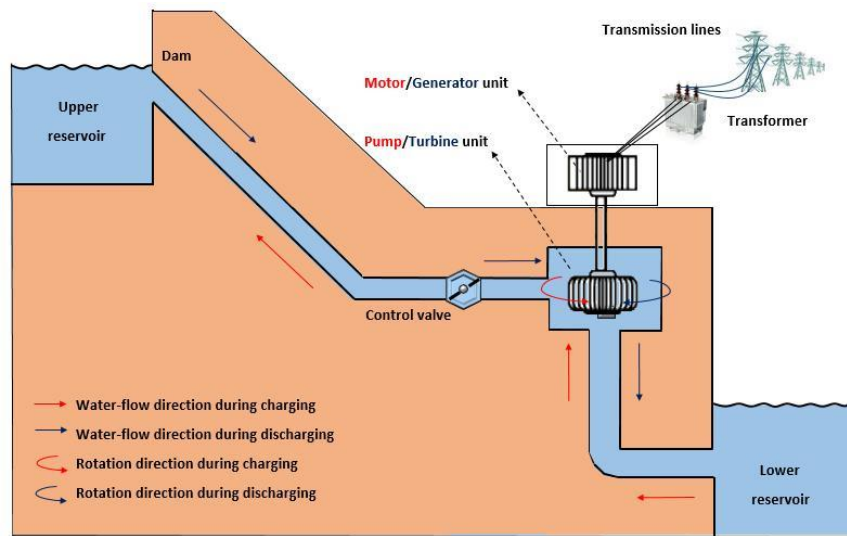
1.4.3 Διαχείριση και Αποθήκευση Παραγόμενης Ενέργειας

Όσον αφορά στη διαχείριση της παραγόμενης ενέργειας που προκύπτει από τα αιολικά πάρκα, στόχος είναι να φτάνει άμεσα στους καταναλωτές και να απορροφάται εξ' ολοκλήρου από αυτούς, χωρίς να απιατείται η αποθήκευσή της. Αυτός ο στόχος όμως δεν είναι πάντα εφικτός. Η αιολική παραγωγή παρουσιάζει αρκετές διακυμάνσεις, λόγω της μεταβλητότητας του ανέμου και των σφαλμάτων στην πρόβλεψη, αλλά και εξ' αιτίας της μεταβαλλόμενης ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Σε συνδυασμό με τις απρόβλεπτες μεταβολές στην κατανάλωση, αλλά και τις εξαναγκασμένες διακοπές λειτουργίας των ανεμογεννητριών, αποτελεί μεγάλη πρόκληση ο προσδιορισμός της συνολικής εγγυημένης ισχύος που μπορεί να παρέχει ένα αιολικό πάρκο, σε κατάσταση υψηλής ζήτησης. Η τεχνολογία δεν έχει φτάσει ακόμα στο επίπεδο να μπορεί να διαχειριστεί αξιόπιστα πολλούς σταθμούς παραγωγής, ιδίως όταν σε αυτούς περιλαμβάνονται αρκετά αιολικά πάρκα και άλλες ΑΠΕ. Ζητούμενο συνεπώς αποτελεί η ανάπτυξη μεθόδων απόλυτης συνεργασίας της αιολικής παραγωγής με τη συμβατική ηλεκτρική παραγωγή, ώστε να υπάρχει ευελιξία στο σύστημα και σιγουριά για την ικανοποίηση των απαιτήσεων των πελατών κάθε χρονική στιγμή [Hemami, 2012].

Μια λύση στο πρόβλημα δίνει η άποψη που υποστηρίζει ότι η ένταση των διακυμάνσεων της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά πάρκα μπορεί να μειωθεί εάν τα αιολικά πάρκα είναι διασκορπισμένα γεωγραφικά σε διαφορετικές περιοχές, ώστε να καλύπτονται από διαφορετικά μετεωρολογικά συστήματα καιρού. Μια άλλη προσέγγιση είναι αυτή της αποθήκευσης ενέργειας σε εφεδρικές πηγές ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο όταν η ζήτηση είναι μικρή, ενώ υπάρχει περίσσεια παραγόμενης ενέργειας, τότε μέρος αυτής θα μπορεί να αποθηκευτεί και να αποδοθεί στο σύστημα όταν απαιτείται και μάλιστα με πλήρη αμεσότητα. Η αποταμίευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί ενδεικτικά να γίνει με χρήση μπαταριών, με τη μέθοδο σταθμών πεπιεσμένου αέρα, είτε με αντλησιοταμίευση [Μικέδης, 2011].

Η αντλησιοταμίευση (άντληση - ταμίευση) είναι μια τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας η οποία χρησιμοποιεί τις αρχές της υδροηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να αποδώσει ενέργεια στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρήση ενός παράλληλου υδροηλεκτρικού σταθμού

μπορεί να ικανοποιήσει την απαίτηση για εφεδρικές πηγές ισχύος, καθώς η αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ύδατος σε φυσικές ή τεχνητές λίμνες και η αποδέσμευση και εκτόνωσή τους σε υδροστροβίλους οδηγεί στην ελεγχόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [Μικέδης, 2011].



Εικόνα 1.35: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος αντλησιοταμίευσης [Πηγή: <http://docplayer.gr/113190988-Eisagogi-stin-energeiaki-tehnologia-ydryayliki-energeia.html>].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Στη συνέχεια παρουσιάζονται επιλεγμένα εμπορικά μοντέλα ανεμογεννητριών, μαζί με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους, ώστε να δοθεί στον αναγνώστη μία εικόνα της παρούσας κατάστασης που επικρατεί στη διεθνή αγορά ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα.

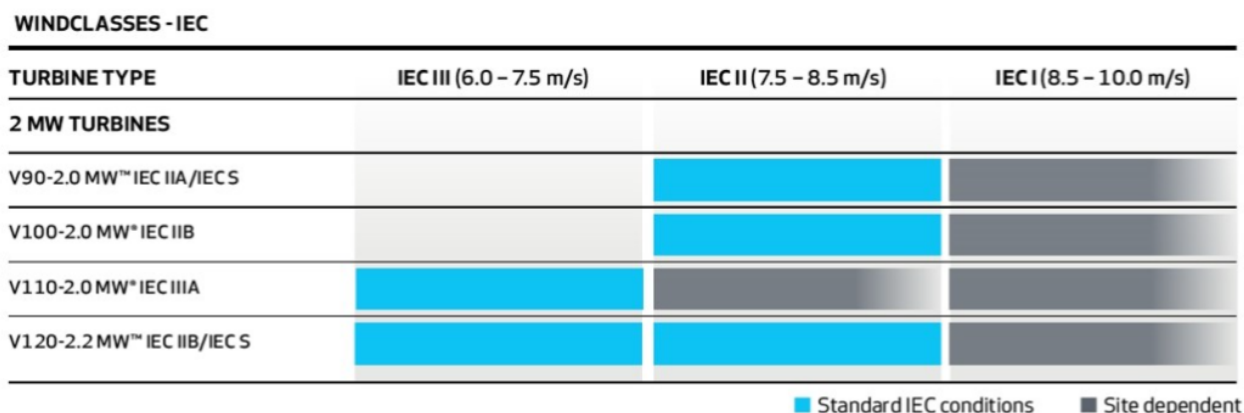
2.1 VESTAS

2.1.1 Πλατφόρμα VESTAS 2 MW

Η πλατφόρμα 2 MW αποτελεί μια ανταγωνιστική επιλογή στρόβιλων για όλα τα είδη ανέμου. Η προβλεψιμότητα της πλατφόρμας επιτρέπει μια σωστή πρόβλεψη έργου, ενώ η σχεδίαση εξασφαλίζει χαμηλότερο κόστος παραγωγής ενέργειας για χερσαίες τοποθεσίες χαμηλού, μεσαίου και υψηλού ανέμου, ακόμη και σε ακραίες καιρικές συνθήκες.

Με περισσότερα από 48 GW τοποθετημένων στρόβιλων-2 MW από το 2000, η πλατφόρμα των 2 MW έχει γίνει μια από τις πιο δημοφιλείς πλατφόρμες της εταιρίας.





Στην ακόλουθη **Εικόνα 2.1** παρουσιάζονται οι εφαρμογές των επιμέρους μοντέλων της πλατφόρμας 2 MW της εταιρίας Vestas, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου.



Εικόνα 2.1: Τα μοντέλα ανεμογεννητριών της πλατφόρμας 2MW της εταιρίας Vestas και οι εφαρμογές τους ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου [Πηγή: www.vestas.com].

Στη συνέχεια, στον **Πίνακα 2.1**, παρατίθεται μια περιληπτική περιγραφή των μοντέλων της συγκεκριμένης οικογένειας ανεμογεννητριών, μαζί με σχετικές απεικονίσεις τους.

Πίνακας 2.1: Τα μοντέλα ανεμογεννητριών της πλατφόρμας 2MW της εταιρίας Vestas και οι εφαρμογές τους
[Πηγή: www.vestas.com].

<p>Μοντέλο V120-2.2 MW™ IEC IIB/IEC S</p> <p>Βελτιστοποιεί τη στάθμη παραγωγής ενός αιολικού Πάρκου υπό σταθερές συνθήκες χαμηλού έως μεσαίου ανέμου.</p>	
<p>Μοντέλο V110-2.0 MW™ IEC IIIA</p> <p>Προσφέρει υψηλές επιδόσεις και αποδόσεις σε χαμηλές έως μεσαίες ταχύτητες ανέμων.</p>	
<p>Μοντέλο V100-2.0 MW™ IEC IIB</p> <p>Προσφέρει υψηλές αποδόσεις σε μεσαίες και υψηλές ταχύτητες ανέμων.</p>	
<p>Μοντέλο V90-2.0 MW™ IEC IIA/IEC S</p> <p>Είναι κατάλληλο για περιοχές με υψηλό άνεμο με περιορισμούς στο μέγεθος του ρότορα.</p>	

Ενδεικτικά, η ανεμογεννήτρια V100-2.0 MW® IEC IIB επιτρέπει την αύξηση της παραγωγικότητας σε περιοχές χαμηλού και μεσαίου ανέμου, που προηγουμένως θεωρούνταν μη βιώσιμες. Οι τεχνικές προδιαγραφές της παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2.2** που ακολουθεί.

Πίνακας 2.2: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας V100-2.0 MW® IEC IIB [Πηγή: www.vestas.com].

Λειτουργικά στοιχεία		Κιβώτιο ταχυτήτων (τύπος):	Δύο πλανητικά στάδια και ένα ελικοειδές στάδιο.
Ονομαστική ισχύς	2.000 kW	Πύργος (τύπος) (ύψος):	Πύργος σωληνοειδούς χάλυβα 80m(IECIIB) και 95m(IECIIB)
Ταχύτητα ενεργοποίησης	3 m/s	Διαστάσεις θαλάμου:	
Ταχύτητα απενεργοποίησης	22m/s	Ύψος για μεταφορά	4 m
Re cut-in wind speed	20 m/s	Εγκατεστημένο ύψος	5,4 m
Κατηγορία ανέμου	IEC IIB	Μήκος	10,4 m
Τυπικό εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας	-20°C έως +40°C	Πλάτος	3,5 m
Ηχητική ισχύς(maximum):	105 dB	Διαστάσεις:	
Ρότορας:		Μέγιστο ύψος μεταφοράς	3,4 m
Διάμετρος ρότορα	100 m	Μέγιστο πλάτος μεταφοράς	4 m
Περιοχή κάλυψης	7.854m ²	Μέγιστο μήκος μεταφοράς	4,2m
Φρένο αέρα	Πλήρες πτερύγιο με τρεις κυλίνδρους	Διαστάσεις πτερυγίου:	
Ηλεκτρικά:		Μήκος	49m
Συχνότητα	50/60 Hz	Μέγιστη χορδή	3,9 m
Τύπος γεννήτριας	4-πόλων(50Hz)/ 6-πόλων(60Hz) Γεννήτρια διπλής τροφοδοσίας, δακτύλιοι ολίσθησης	Μέγιστο βάρος ανά μονάδα για μεταφορά	70 τόνοι

2.1.2 Πλατφόρμα VESTAS 4 MW

Η πλατφόρμα 4 MW της εταιρείας Vestas έχει σχεδιαστεί για ένα ευρύ φάσμα συνθηκών ανέμου και τοποθεσίας, τόσο στην ξηρά όσο και στην θάλασσα (υπεράκτια αιολικά πάρκα). Η πλατφόρμα 4 MW παρουσιάστηκε το 2010 με την κυκλοφορία του μοντέλου V112-3.0 MW. Έκτοτε έχουν εγκατασταθεί πάνω από 35 GW της πλατφόρμας 4 MW σε όλο τον κόσμο, καθιστώντας την μία από τις πιο δημοφιλείς πλατφόρμες στο χαρτοφυλάκιο της Vestas.





Οι διάμετροι του ρότορα κυμαίνονται από 105 m έως 150 m και η ονομαστική ισχύς εξόδου είναι έως 4,2 MW. Χρησιμοποιώντας αξιόπιστες τεχνολογίες, η πλατφόρμα 4 MW πληροί ακόμη και τις πιο απαιτητικές απαιτήσεις δικτύου, παρέχοντας εξαιρετική απόδοση ενέργειας σε όλες τις συνθήκες ανέμου και καιρού. Στην ακόλουθη **Εικόνα 2.2** παρουσιάζονται οι εφαρμογές των επιμέρους μοντέλων της πλατφόρμας 4 MW της εταιρείας Vestas, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου.


WINDCLASSES			
TURBINE TYPE	Low Wind Speeds	Medium Wind Speeds	High Wind Speeds
4 MW TURBINES			
V105-3.45 MW™ IEC IA			
V112-3.45 MW® IEC IA			
V117-3.45 MW® IEC IB/IEC IIA			
V117-4.2 MW™ IEC IB-T/IEC IIA-T/IEC S-T			
V126-3.45 MW® IEC IIA/IEC IIB			
V136-3.45 MW® IEC IIB/IEC IIIA			
V136-4.2 MW™ IEC IIB/IEC S			
V150-4.2 MW™ IEC IIIB/IEC S			

Εικόνα 2.2: Τα μοντέλα ανεμογεννητριών της πλατφόρμας 4 MW της εταιρείας Vestas και οι εφαρμογές τους ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου [Πηγή: www.vestas.com].

Στη συνέχεια, στον **Πίνακα 2.3**, παρατίθεται μια περιληπτική περιγραφή των μοντέλων της συγκεκριμένης οικογένειας ανεμογεννητριών, μαζί με σχετικές απεικονίσεις τους.

Πίνακας 2.3: Τα μοντέλα ανεμογεννητριών της πλατφόρμας 4 MW της εταιρίας Vestas και οι εφαρμογές τους
[Πηγή: www.vestas.com].

<p>Μοντέλο V150-4.2 MW™ IEC IIB/IECS</p> <p>Προσφέρει έναν πολύ υψηλό συντελεστή χωρητικότητας, βελτιώνοντας την παραγωγή σε περιοχές χαμηλού ανέμου.</p>	
<p>Μοντέλο V136-4.2 MW™ IEC IIB/IEC S</p> <p>Έχει σχεδιαστεί για περιοχές χαμηλού έως μεσαίου ανέμου και προσφέρει ανταγωνιστικό επίπεδο ηχητικής ισχύος.</p>	
<p>Μοντέλο V136-3.45 MW™ IEC IIB/IEC S</p> <p>Παρέχει υψηλή και αποδοτική παραγωγή σε χαμηλές και μεσαίες ταχύτητες ανέμου.</p>	
<p>Μοντέλο V126-3.45 MW® IEC IIB/IEC S</p> <p>Έχει σχεδιαστεί για περιοχές μεσαίου ανέμου με υψηλή αναταραχή.</p>	

<p>Μοντέλο V117-4.2 MWTM IB-T/IEC IIA-T/IECS-T</p> <p>Έχει σχεδιαστεί για μεσαίες έως υψηλές ταχύτητες ανέμου και αντέχει πολύ σε σοβαρές κλιματολογικές συνθήκες.</p>	
<p>Μοντέλο V117-3.45 MW[®] IEC IB/IEC IIA</p> <p>Αποτελεί μία σταθερή επιλογή για τοποθεσίες μεσαίου και υψηλού ανέμου με υψηλή αναταραχή.</p>	
<p>Μοντέλο V112-3.45 MW[®]</p> <p>Έχει σχεδιαστεί για τοποθεσίες με υψηλούς ανέμους και προσφέρει υψηλή συμβατότητα δικτύου.</p>	
<p>Μοντέλο V105-3.45 MWTM IEC A</p> <p>Έχει σχεδιαστεί και ιδιαίτερες κλιματολογικές συνθήκες και είναι αρκετά κατάλληλο για αγορές με απαιτήσεις ύψους.</p>	

Ενδεικτικά, η V105-3.45 MWTM IEC IA είναι η ανεμογεννήτρια που ταιριάζει στις πιο σοβαρές συνθήκες ανέμου με υψηλή αναταραχή και είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για αγορές με περιορισμούς ύψους και υψηλές απαιτήσεις δικτύου. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της παρουσιάζονται στον [Πίνακα 2.4](#).

Πίνακας 2.4: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας V105-3.45 MW[™] IEC IA [Πηγή: www.vestas.com].

Λειτουργικά στοιχεία		Κιβώτιο ταχυτήτων (τύπος):	Δύο πλανητικά στάδια και ένα ελικοειδές στάδιο.
Ονομαστική ισχύς	3.450 kW	Πύργος (ύψος):	72,5 m (IEC IA)
Ταχύτητα ενεργοποίησης	3 m/s	Διαστάσεις θαλάμου:	
Ταχύτητα απενεργοποίησης	25 m/s	Ύψος για μεταφορά	3,4 m
Re cut-in wind speed	23 m/s	Εγκατεστημένο ύψος	6,9 m
Κατηγορία ανέμου	IEC IA	Μήκος	12,8 m
Τυπικό εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας	-20°C έως +45°C	Πλάτος	4,22 m
Ηχητική ισχύς:	-	Διαστάσεις:	
Ρότορας:		Μέγιστο ύψος μεταφοράς	3,8 m
Διάμετρος ρότορα	105 m	Μέγιστο πλάτος μεταφοράς	3,8 m
Περιοχή κάλυψης	8.659 m ²	Μέγιστο μήκος μεταφοράς	5,55 m
Φρένο αέρα	Πλήρες πτερύγιο με τρεις κυλίνδρους	Διαστάσεις πτερυγίου:	
Ηλεκτρικά:		Μήκος	51,2 m
Συχνότητα	50/60 Hz	Μέγιστη χορδή	4 m
Μετατροπέας (Converter)	Πλήρους κλίμακας	Μέγιστο βάρος ανά μονάδα για μεταφορά	70 τόνοι

2.1.3 Πλατφόρμα VESTAS ENVENTUS

Η πλατφόρμα EnVentus της εταιρίας VESTAS παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 2019 με την κυκλοφορία των μοντέλων της V150-5.6 MW και V162-5.6 MW και αποτελεί την επόμενη γενιά στην εξέλιξη των ανεμογεννητριών. Η αρχιτεκτονική της πλατφόρμας συνδυάζει την τεχνολογία των δύο προηγούμενων (των 2MW και 4MW), χρησιμοποιώντας τα καλά χαρακτηριστικά από την καθεμία, προκειμένου να εξασχθεί ένα ευέλικτο και βελτιωμένο αποτέλεσμα. Στην ακόλουθη [Εικόνα 2.3](#) παρουσιάζονται οι εφαρμογές των επιμέρους μοντέλων της πλατφόρμας EnVentus της εταιρίας Vestas, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου.

WIND CLASSES

Turbine type	Low wind speeds	Medium wind speeds	High wind speeds
EnVentus™ turbines			
V150-5.6 MW™			
V162-5.6 MW™			

Εικόνα 2.3: Τα μοντέλα ανεμογεννητριών της πλατφόρμας EnVentus της εταιρίας Vestas και οι εφαρμογές τους, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου [Πηγή: www.vestas.com].

Στη συνέχεια, στον [Πίνακα 2.5](#), παρατίθεται μια περιληπτική περιγραφή των μοντέλων της συγκεκριμένης οικογένειας ανεμογεννητριών, μαζί με σχετικές απεικονίσεις τους.

Πίνακας 2.5: Τα μοντέλα ανεμογεννητριών της πλατφόρμας EnVentus της εταιρίας Vestas και οι εφαρμογές τους [Πηγή: www.vestas.com].

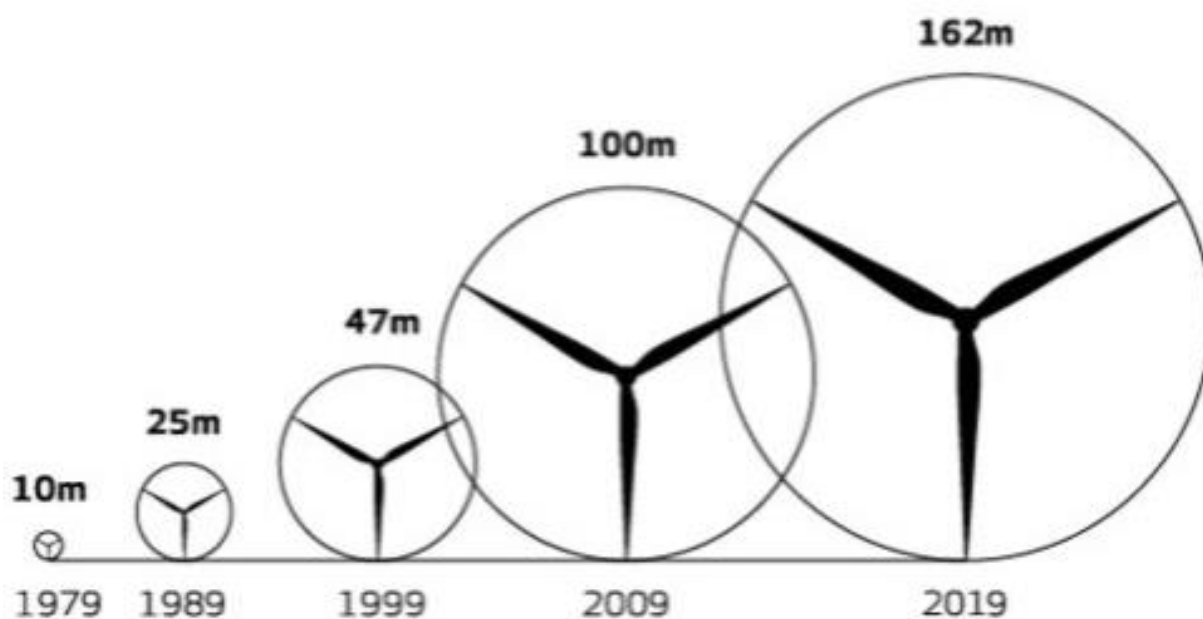
<p>Μοντέλο V162-5.6 MWTM IEC S</p> <p>Έχει σχεδιαστεί για περιοχές με χαμηλό έως μεσαίο άνεμο και έχει εκτεταμένη εφαρμογή σε υψηλές ταχύτητες ανέμων.</p>	
<p>Μοντέλο V150-5.6 MWTM IEC S</p> <p>Προσφέρει ένα μεγάλο επιχειρησιακό φάκελο, βελτιστοποιώντας την παραγωγή σε μεσαίες έως υψηλές ταχύτητες ανέμου.</p>	

Ενδεικτικά, με εμβαδόν κάλυψης άνω των 20.000 m², το μοντέλο V162-5.6 MWTM εφαρμόζει το μεγαλύτερο μέγεθος ρότορα στο χαρτοφυλάκιο της Vestas για να επιτύχει κορυφαία παραγωγή ενέργειας. Το μοντέλο V162-5.6 MWTM IEC S έχει σχεδιαστεί για θέσεις χαμηλού έως μεσαίου ανέμου, με εκτεταμένη εφαρμογή όμως σε υψηλές ταχύτητες ανέμου. Οι τεχνικές προδιαγραφές της συγκριμένης ανεμογεννήτριας παρουσιάζονται στον [Πίνακα 2.6](#).

Πίνακας 2.6: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας V162-5.6 MWTM IEC S [Πηγή: www.vestas.com].

Ρύθμιση ισχύος	Ρυθμιζόμενη θέση με μεταβλητή ταχύτητα	Κιβώτιο ταχυτήτων (τύπος):	Δύο πλανητικά στάδια.
Λειτουργικά στοιχεία			
Ονομαστική ισχύς	5.600 kW	Πύργος (ύψος):	119 m (IEC S/DIBt S) 125 m (IEC S) 148 m (DIBt S) 149 m (IEC S) 166 m(DIBt S)
Ταχύτητα ενεργοποίησης	3 m/s		
Ταχύτητα απενεργοποίησης	25 m/s		
Κατηγορία ανέμου	IEC S		
Τυπικό εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας	-20°C έως +45°C		
Ηχητική ισχύς:	104 dB(A)		
Ρότορας:			
Διάμετρος ρότορα	162 m		
Περιοχή κάλυψης	20.612m ²		
Φρένο αέρα	Πλήρες πτερύγιο με τρεις κυλίνδρους		
Ηλεκτρικά:			
Συχνότητα	50/60 Hz		
Μετατροπέας (Converter)	Πλήρους κλίμακας		

Στην ακόλουθη **Εικόνα 2.4** μπορούμε να παρατηρήσουμε την εντυπωσιακή εξέλιξη των ανεμογεννητριών της εταιρίας Vestas, όσον αφορά στο μέγεθός τους, με την παρέλευση των χρόνων. Εστιάζουμε στη αύξηση της διαμέτρου του ρότορα, καθώς για να επιτευχθεί αυτό κρύβει από πίσω του αρκετή πολυπλοκότητα και τεχνολογική ανάπτυξη.



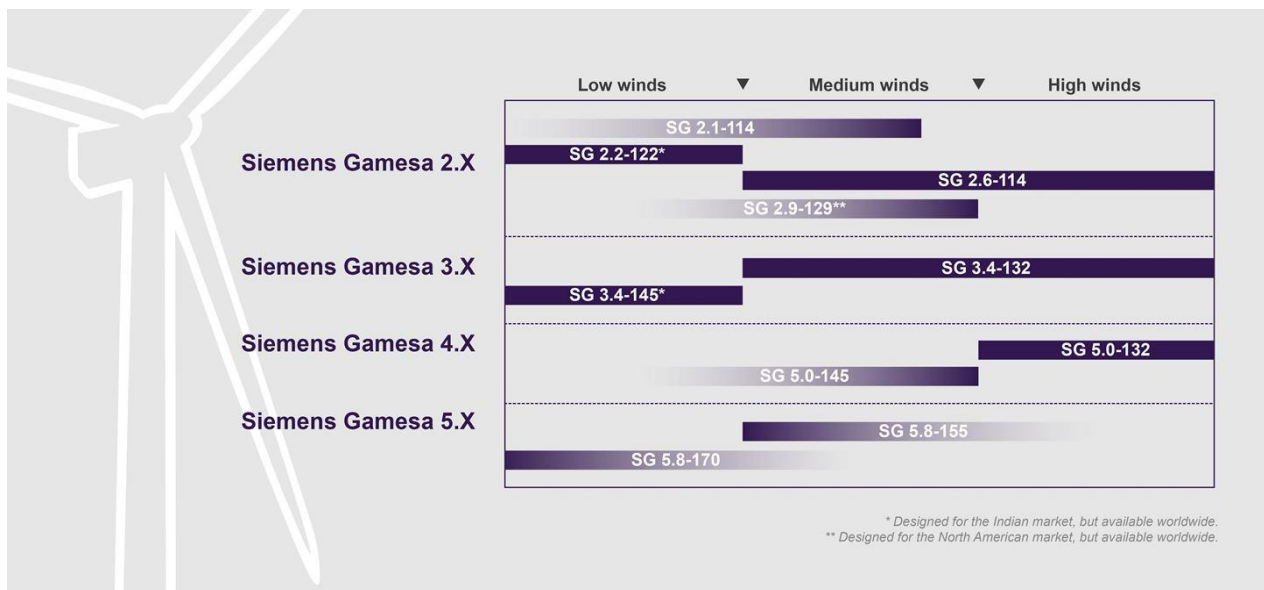
Εικόνα 2.4: Η αύξηση του μεγέθους των ανεμογεννητριών της εταιρίας Vestas με τη πάροδο των χρόνων. [Πηγή: www.vestas.com].

2.2 SIEMENS-GAMESA

2.2.1 Siemens-Gamesa Onshore

Λειτουργώντας σε περίπου 90 χώρες, η Siemens-Gamesa προσφέρει ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών ανεμογεννητριών στην ξηρά για την κάλυψη όλων των κατηγοριών ανέμου και συνθηκών χώρου. Έχει εγκαταστήσει παγκόσμια ανεμογεννήτριες στην ξηρά, με την εγκατεστημένη ισχύ να ξεπερνά τα 87,5 GW, ενώ εκτιμάται ότι η συνολική εγκατεστημένη ισχύς της εταιρίας για τα 40 περίπου χρόνια λειτουργίας της ανέρχεται στα 103 GW.






Στην ακόλουθη **Εικόνα 2.5** παρουσιάζονται οι εφαρμογές των διαφόρων μοντέλων της εταιρίας Siemens-Gamesa, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου.



Εικόνα 2.5: Τα μοντέλα ανεμογεννητριών ξηράς της εταιρίας Siemens-Gamesa και οι εφαρμογές τους, ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου [Πηγή: www.siemensgamesa.com].

Στη συνέχεια, στον **Πίνακα 2.7**, παρατίθεται μια περιληπτική περιγραφή των μοντέλων της συγκεκριμένης οικογένειας ανεμογεννητριών, μαζί με σχετικές απεικονίσεις τους.

Πίνακας 2.7: Τα μοντέλα ανεμογεννητριών Onshore της εταιρίας Siemens-Gamesa και οι εφαρμογές τους
[Πηγή: www.siemensgamesa.com].

<p>ΜοντέλοSG 2.1-114</p> <p>Το πιο επιτυχημένο μοντέλο ανεμογεννήτριας ξηράς για την εταιρία, ιδανικό για τοποθεσίες χαμηλού και μεσαίου ανέμου, λόγω της χαμηλής πυκνότητας ισχύος (power density) (διάμετρος ρότορα: 114 m, ονομαστική ισχύς: 2,1 MW).</p>	
<p>ΜοντέλοSG 2.2-122</p> <p>Με τη χαμηλότερη πυκνότητα ισχύος και μεγάλη αποδοτικότητα, το μοντέλο αυτό είναι σχεδιασμένο για χαμηλούς ανέμους και επίπεδα στροβιλισμού του αέρα (διάμετρος ρότορα: 122 m, ονομαστική ισχύς: 2,2 MW).</p>	
<p>Μοντέλο SG 2.6-114</p> <p>Αυτή η ανεμογεννήτρια προσφέρει μέγιστη αποδοτικότητα και χαμηλό κόστος ενέργειας σε περιοχές με ισχυρούς ανέμους (διάμετρος ρότορα: 114 m, ονομαστική ισχύς: 2,625 MW).</p>	
<p>Μοντέλο SG 2.9-129</p> <p>Έχει αναπτυχθεί για συνθήκες μεσαίου έως χαμηλού ανέμου, εστιασμένη στην αγορά της Αμερικής. Προτείνεται για αύξηση της ετήσιας ενεργειακής παραγωγής (διάμετρος ρότορα: 129 m, ονομαστική ισχύς: 2,9 MW).</p>	
<p>Μοντέλο SG 3.4-132</p> <p>Έχει σχεδιαστεί για περιοχές όπου επικρατούν μεσαίοι και υψηλοί άνεμοι. Η ανεμογεννήτρια προσφέρει μεταβαλλόμενη απόδοση και αρκετές επιλογές ύψους πύργου, για μεγαλύτερη ευελιξία με τους περιορισμούς (διάμετρος ρότορα: 132 m, ονομαστική ισχύς: 3,465 MW).</p>	

<p>Μοντέλο SG 5.0-132</p> <p>Η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια καλύπτει ένα μεγάλο εύρος υψηλών ανέμων. Είναι γνωστή για την αποδοτικότητά της και τη μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας (διάμετρος ρότορα: 132 m, ονομαστική ισχύς: 5,0 MW).</p>	
<p>Μοντέλο SG 5.0-145</p> <p>Αποτελεί μια πολύ καλή επιλογή για περιοχές με μέτριας έντασης ανέμων. Με την σύγχρονη τεχνολογία της μεταβαλλόμενης αεροδυναμικής πτερυγίων ανοίγει το δρόμο για την επόμενη γενιά ανεμογεννητριών (διάμετρος ρότορα: 145 m, ονομαστική ισχύς: 5,0 MW).</p>	
<p>Μοντέλο SG 5.8-155</p> <p>Σχεδιασμένη για μεσαίας και υψηλής ταχύτητας άνεμο, αποτελεί μια ιδιαίτερα αξιόπιστη επιλογή, που εφαρμόζει τελευταίες τεχνολογικές απαιτήσεις (διάμετρος ρότορα: 155 m, ονομαστική ισχύς: 5,8 MW).</p>	
<p>Μοντέλο SG 5.8-170</p> <p>Μια από τις μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες ξηράς στο χαρτοφυλάκιο της εταιρίας, η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια μπορεί να ικανοποιήσει απόλυτα στόχους, σε περιπτώσεις με χαμηλούς έως μεσαίους ανέμους (διάμετρος ρότορα: 170 m, ονομαστική ισχύς: 5,8 MW).</p>	

Ενδεικτικά, η ανεμογεννήτρια SG 2.1-114 αποτελεί σημείο αναφοράς της εταιρίας, για τοποθεσίες με μεσαία και χαμηλή ταχύτητα ανέμου. Αυτό αποδεικνύεται με την παρουσία της στην αγορά, καθώς έχουν εγκατασταθεί 6.663 MW από το συγκεκριμένο είδος παγκοσμίως. Οι τεχνικές προδιαγραφές της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας παρουσιάζονται στον [Πίνακα 2.8](#).

Πίνακας 2.8: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας SG 2.1-114 [Πηγή: www.siemensgamesa.com].

Λειτουργικά στοιχεία:		Κιβώτιο ταχυτήτων:	3 στάδια.
Ονομαστική ισχύς	2.100 kW	Πύργος (ύψος - m):	68/80/93/106/125/127/153
Κατηγορία ανέμου	IEC IIA/IIIA/S	Γεννήτρια:	
Τυπικό εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας	-20°C έως +40°C		Επαγωγική μηχανή Διπλής τροφοδοσίας
Ελεγχος	Pitch and variable speed	Τάση	690 V AC
Ρότορας:		Συχνότητα	50/60 Hz
Διάμετρος ρότορα	114 m	Τύπος προστασίας	IP 54
Περιοχή κάλυψης	10.207 m ²	Συντελεστής ισχύος	0,95 CAP – 0.95 IND
Πυκνότητα ισχύος	205.74 W/m ²	Πτερύγια:	
		Μήκος	56 m
		Υλικό κατασκευής	Fiberglass ενισχυμένο με εποξική ή πολυεστερική ρητίνη

2.2.2 Siemens-Gamesa Offshore

Η εκθετική αύξηση της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας μπορεί να αποδοθεί σε έναν αριθμό παραγόντων, συμπεριλαμβανομένης της αφθονίας του χώρου και των μεγαλύτερων σταθερών αιολικών πόρων, που έχουν ως αποτέλεσμα μια ενεργειακή παραγωγή έως και 40% υψηλότερη από την ξηρά. Η εταιρία Siemens-Gamesa πρωτοστάτησε στον κλάδο των υπεράκτιων αιολικών από το 1991, δημιουργώντας τον πρώτο αιολικό σταθμό στον κόσμο, στη Δανία. Μέχρι σήμερα έχει εγκαταστήσει παγκοσμίως περισσότερα από 15 GW αιολικά πάρκα επί θαλάσσης, και φαίνεται να κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς στον συγκεκριμένο τομέα.

Στη γκάμα της εταιρίας περιλαμβάνονται τα μοντέλα ανεμογεννητριών που παρουσιάζονται στον ακόλουθο **Πίνακα 2.9**.

Πίνακας 2.9: Τα μοντέλα ανεμογεννητριών Offshore της εταιρίας Siemens-Gamesa και οι εφαρμογές τους
[Πηγή: www.siemensgamesa.com].

<p>Μοντέλο SG 8.0-167DD</p> <p>Προσφέρει υψηλές αποδόσεις παραγωγής σε όλες τις ταχύτητες ανέμου, ενώ συνιστάται κυρίως για χρήση σε περιοχές με αρκετά υψηλούς ανέμους. Η τεχνολογία του να λειτουργεί με μεγαλύτερο ρότορα συμβάλει στη μείωση του ρίσκου και στην αύξηση της παραγωγής ενέργειας (διάμετρος ρότορα: 167 m, ονομαστική ισχύς: 8,0 MW).</p>	
<p>Μοντέλο SG 11.0-200DD</p> <p>Αποτελεί για την εταιρία η ιδανική επιλογή υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. Σε σύγκριση με την προηγούμενη έχει αρκετά βελτιωμένα στοιχεία, επιτυγχάνοντας αύξηση 40% του συντελεστή παραγωγής ισχύος. Συνιστάται κυρίως για τοποθεσίες με υψηλούς ανέμους. Η σειριακή παραγωγή της έχει προγραμματιστεί για το 2022 (διάμετρος ρότορα: 200 m, ονομαστική ισχύς: 11,0 MW).</p>	
<p>Μοντέλο SG 14.0-222DD</p> <p>Βασισμένη στην παρατήρηση της κλιματικής αλλαγής, που συνεπάγεται πολύ ισχυρούς ανέμους, η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια αποτελεί σχεδιασμό της Siemens-Gamesa με τη σειριακή παραγωγή της να έχει προγραμματιστεί για το 2024. Στόχος είναι οι ισχυροί άνεμοι που θα παρατηρηθούν στα επόμενα χρόνια, να τροφοδοτήσουν την μεγαλύτερη από ποτέ παραγωγή ενέργειας από ανεμογεννήτρια. Η αναμενόμενη αύξηση του συντελεστή</p>	

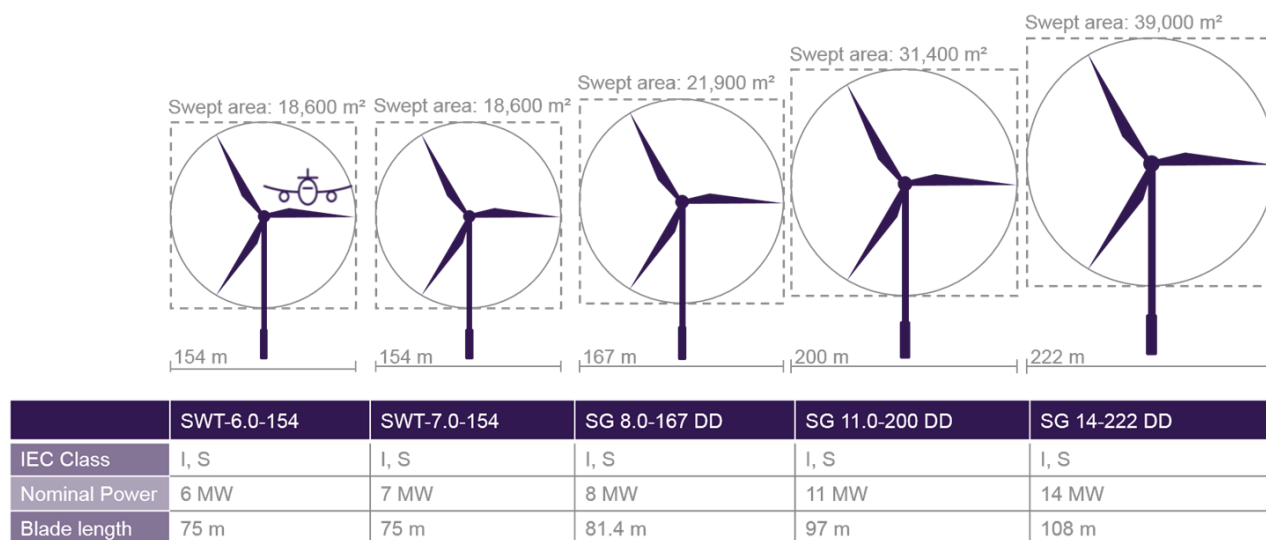
παραγωγής συγκριτικά με το προηγούμενο μοντέλο είναι της τάξης του 25% (διάμετρος ρότορα: 222 m, ονομαστική ισχύς: 14,0 MW).

Ενδεικτικά, κάποια από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας SG 8.0-166DD παρουσιάζονται στον **Πίνακα 2.10**.

Πίνακας 2.10: Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας SG 8.0-166DD [Πηγή: www.siemensgamesa.com].

Κατηγορία ανέμου IEC	I, S
Ονομαστική ισχύς	8.000 kW
Διάμετρος ρότορα	167 m
Μήκος πτερυγίου	81,4 m
Περιοχή κάλυψης ρότορα	21.900 m ²
Ύψος κόμβου	Εξ/ται από την περιοχή
Ρύθμιση ισχύος	Ρυθμιζόμενη με βήμα Μεταβλητή ταχύτητα

Στην ακόλουθη **Εικόνα 2.6** παρουσιάζεται η μεταβολή της διαμέτρου του ρότορα καθώς και της αντίστοιχης μετωπικής επιφάνειας που σαρώνει ο ρότορας, στα υπεράκτια μοντέλα της εταιρίας Siemens-Gamesa.



Εικόνα 2.6: Η διάμετρος του ρότορα και η επίπεδη επιφάνεια που καλύπτει, στα μοντέλα υπεράκτιων ανεμογεννητριών της εταιρίας Siemens-Gamesa. [Πηγή: www.siemensgamesa.com].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΑΝΕΜΟΥ

3.1 Βέλτιστες Πρακτικές για την Ακριβή Μέτρηση της Ταχύτητας του Ανέμου

Η υιοθέτηση μιας μεθόδου υψηλής ποιότητας για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου έχει καθοριστική σημασία για τη μείωση της αβεβαιότητας στην προβλεπόμενη παραγωγή ενέργειας ενός προτεινόμενου έργου (αιολικού πάρκου). Ο στόχος είναι η σωστή συλλογή επαρκών ανεμολογικών δεδομένων, που θα επιτρέπουν την καλύτερη δυνατή εκτίμηση του αιολικού δυναμικού, το οποίο στη συνέχεια θα προεκταθεί σε μακροχρόνιες προβλέψεις, για μια υποψήφια περιοχή. Τίθεται λοιπόν το ερώτημα τι είδους και πόσοι μετεωρολογικοί ιστοί πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη σωστών μετρήσεων για την περίπτωση που επιθυμούμε να μελετήσουμε μία υποψήφια περιοχή για την τοποθέτηση ενός αιολικού πάρκου. Το ερώτημα αυτό θα εξεταστεί στις επόμενες παραγράφους [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

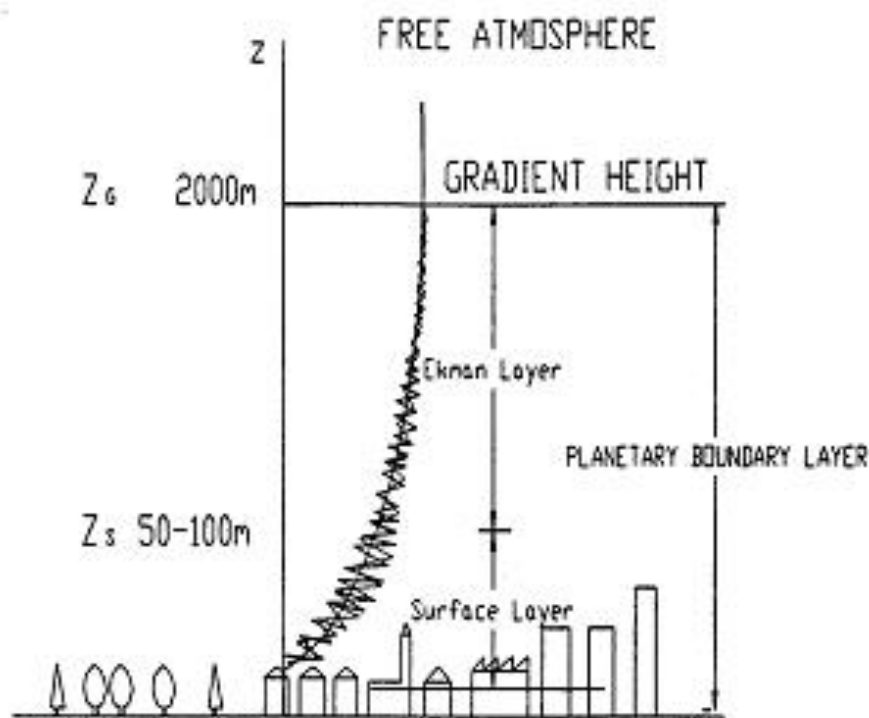
3.1.1 Αριθμός και ύψος των μετεωρολογικών ιστών.

Για περιπτώσεις μικρών αιολικών πάρκων, συχνά η τοποθέτηση ενός μετεωρολογικού ιστού είναι επαρκής για να παρέχει μια ακριβή αξιολόγηση του διαθέσιμου αιολικού δυναμικού στην εν λόγω τοποθεσία. Για τα μεσαία αιολικά πάρκα, που ξεπερνούν για παράδειγμα την εγκατεστημένη ισχύ των 20 MW, είναι πιθανό να απαιτούνται περισσότεροι από ένας μετεωρολογικοί ιστοί, για να προσφέρουν μια πιο σαφή εικόνα της ποιότητας και της έντασης του ανέμου στην εν λόγω τοποθεσία, ειδικά εάν το έδαφος έχει περίεργη μορφολογία. Για ακόμα μεγαλύτερες εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων και έργα εγκατεστημένης ισχύος άνω των 100 MW είναι σχεδόν αναπόφευκτος ο σχεδιασμός ενός δικτύου από σταθμούς καταγραφής ανεμολογικών δεδομένων, για μια εμπεριστατωμένη ανάλυση με οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Αυτό ακολουθείται γενικά όταν υπάρχουν αρκετές σε αριθμό ανεμογεννήτριες και λόγω της διάταξής τους απέχουν περισσότερο από ένα χιλιόμετρο από έναν μετεωρολογικό ιστό, σε έδαφος που είτε είναι πολύπλοκο, είτε υπάρχουν παρακείμενες δασικές εκτάσεις. Εκεί απαιτείται η συμβολή εξειδικευμένου τεχνικού προσωπικού, ώστε να προταθούν οι σωστές θέσεις για την τοποθέτηση των μετεωρολογικών ιστών. Για τις προδιαγραφές των ιστών και των μετρητικών οργάνων που θα επιλεγθούν, αξιολογούνται οι ιδιαιτερότητες και η μορφολογία κάθε συγκεκριμένης τοποθεσίας [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

Αξίζει να αναφερθεί ότι σε περιπτώσεις όπου υπάρχει σε γειτονική περιοχή κάποιο ήδη εγκατεστημένο αιολικό πάρκο, μπορεί να ληφθεί υπόψη η απόδοση αυτού για τον σχεδιασμό του υπό μελέτη αιολικού πάρκου, αντί ενός περίπλοκου και κοστοβόρου σχεδιασμού συλλογής νέων ανεμολογικών δεδομένων με μετεωρολογικούς ιστούς στην περιοχή ενδιαφέροντος. Με αυτόν τον απλό τρόπο έχουν τοποθετηθεί μέχρι τώρα πολλές ανεμογεννήτριες. Ωστόσο, πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στην επέκταση αυτής της προσέγγισης για πιο περίπλοκες γεωγραφικά περιοχές,

καθώς αυτή η προεκβολή των ανεμολογικών δεδομένων σε γειτονικές περιοχές δεν είναι πάντοτε ασφαλής [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

Όσον αφορά στο ύψος των μετεωρολογικών ιστών, είναι γνωστό ότι η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται μη-γραμμικά με το ύψος, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 3.1**. Προκειμένου λοιπόν να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσεων της ταχύτητας του ανέμου, είναι σαφή η σημασία να λαμβάνονται μετρήσεις όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο ύψος της πλήμνης της πτερωτής της ανεμογεννήτριας. Εάν αυτό δεν είναι εφικτό, τότε θα πρέπει με βάση τις μετρήσεις που διαθέτουμε να εκτιμηθεί η πιθανή συμπεριφορά του ανέμου στο ζητούμενο ύψος. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας μαθηματικά μοντέλα μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος (όπως θα περιγραφεί σε επόμενες παραγράφους), αλλά προφανώς η συγκεκριμένη διαδικασία δημιουργεί αβεβαιότητες. Οι εμπορικές ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (HAWTs) έχουν συνήθως ύψος πλήμνης στα 60 έως 120 m. Το κόστος των μετεωρολογικών ιστών προφανώς αυξάνεται με το ύψος. Οι πιο απλοί σταθμοί προσεγγίζουν το ύψος των 60 έως 80 m. Πέρα από τέτοια ύψη, απαιτούνται γερανοί για την εγκατάστασή τους, γεγονός που αυξάνει το κόστος. Συχνά οι ενδιαφερόμενοι για να διατηρήσουν χαμηλά το κόστος συμβιβάζονται με μετρήσεις σε ύψος όχι μικρότερο του 75% του ύψους της πλήμνης των ανεμογεννητριών, διασφαλίζοντας έτσι σε ένα υψηλό επίπεδο στην ποιότητα των μετρήσεων [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].



Εικόνα 3.1: Η μεταβολή της ταχύτητα του ανέμου με το ύψος, εντός του οριακού στρώματος [Πηγή: <https://www.wind-energy-the-facts.org>].

3.1.2 Προδιαγραφές του εξοπλισμού λήψης ανεμολογικών δεδομένων

Ένας τυπικός ιστός ανεμομετρίας διαθέτει έναν αριθμό ανεμόμετρων (συσκευές μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου) εγκατεστημένα σε διαφορετικά ύψη πάνω στον ιστό, καθώς και έναν ή δύο ανεμοδείκτες (συσκευές μέτρησης της κατεύθυνσης του ανέμου). Αυτά συνδέονται μέσω καλωδίων

με ένα καταγραφικό δεδομένων στη βάση του ιστού. Στις περισσότερες τοποθεσίες λήψης δεδομένων δεν είναι εύκολη η παροχή ηλεκτρικού ρεύματος, επομένως για τη λειτουργία του μετρητικού σταθμού γίνεται χρήση συσσωρευτή. Ο συσσωρευτής μπορεί να φορτίζεται μέσω κάποιου ηλιακού συλλέκτη ή ενός μικρού τύπου ανεμογεννήτριας. Η μέτρηση της θερμοκρασίας και της ατμοσφαιρικής πίεσης είναι επιθυμητή, αλλά συχνά δεν είναι απαραίτητη. Σε ψυχρά κλίματα, πρέπει να επιλέγεται κατάλληλο είδος μετρητικών οργάνων, προκειμένου οι μετρήσεις να μένουν ανεπηρέαστες από συνθήκες ψύχους και παγετού [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

Το τελευταίο διάστημα έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται και τεχνικές τηλεπισκόπησης για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου σε πιθανές περιοχές τοποθέτησης αιολικών πάρκων. Οι συσκευές τηλεπισκόπησης είναι ουσιαστικά επίγειες συσκευές, οι οποίες μπορούν να μετρήσουν την ταχύτητα του ανέμου σε μεγαλύτερα ύψη, χωρίς την ανάγκη συμβατικής εγκατάστασης ιστού. Υπάρχουν δύο βασικά είδη συσκευών [<https://www.wind-energy-the-facts.org>]:

- Sodar (SOund Detection And Ranging), το οποίο εκπέμπει και λαμβάνει ήχο και αντιλαμβάνεται την ταχύτητα του ανέμου σε διαφορετικά ύψη, χρησιμοποιώντας την αρχή Doppler Shift.
- Lidar (LIght Detection and Ranging), το οποίο χρησιμοποιεί επίσης την αρχή Doppler Shift με την διαφορά ότι αυτό εκπέμπει και δέχεται φως από ένα λέιζερ. Οι συσκευές Lidar έχουν εισέλθει στην αιολική αγορά τα τελευταία χρόνια και ελάχιστα κύρια εμπορικά μοντέλα είναι προς το παρόν διαθέσιμα. Οι δημοσιευμένες έρευνες δείχνουν ότι οι συσκευές είναι σε θέση να επιτύχουν εντυπωσιακά επίπεδα ακρίβειας και αναμένεται ότι η χρήση τους σε εφαρμογές αιολικής ενέργειας θα αυξηθεί σύντομα.

Το μεγάλο πλεονέκτημα των παραπάνω διατάξεων είναι ότι δεν χρειάζονται ιδιαίτερη εγκατάσταση ιστού. Ωστόσο και οι δύο τύποι συσκευών απαιτούν αρκετή ισχύ για τη λειτουργία τους, οπότε για απομακρυσμένες τοποθεσίες απαιτείται μια τοπική λύση τροφοδοσίας εκτός δικτύου.

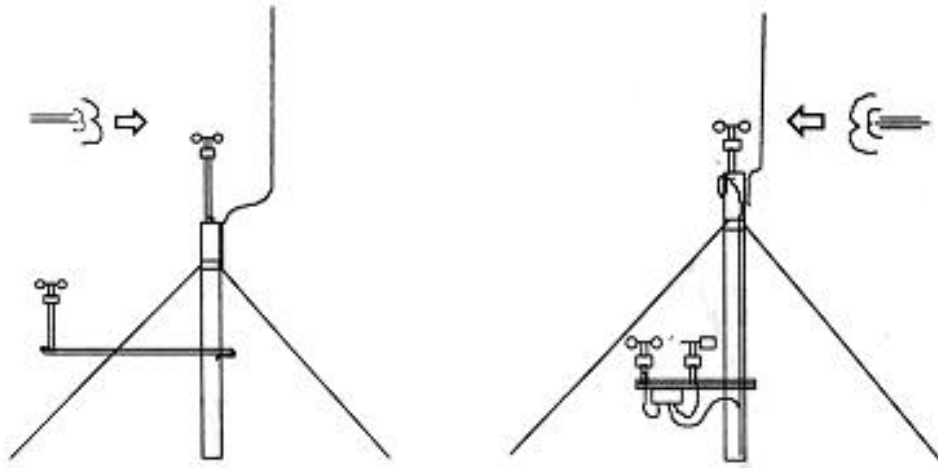
Η καταγραφή από τους αισθητήρες γίνεται κατά μέσο όρο ανά δέκα λεπτά και αφορά στα εξής [<https://www.wind-energy-the-facts.org>]:

- Μέση ταχύτητα ανέμου.
- Μέγιστη (3 δευτερολέπτων) ταχύτητα ριπής ανέμου.
- Τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου.
- Μέση κατεύθυνση ανέμου.
- Μέση θερμοκρασία.
- Τάση συσσωρευτή καταγραφέα.

Τα τελευταία χρόνια, έχει γίνει συνήθης πρακτική η απομακρυσμένη λήψη δεδομένων, είτε μέσω μόντεμ, είτε μέσω δορυφορικής σύνδεσης. Αυτή η προσέγγιση έχει καταστήσει πιο εύκολη τη διαχείριση μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων από μετρητικούς σταθμούς και σαφώς πολύ πιο αποτελεσματική από τη μη αυτόματη λήψη των μετρητικών δεδομένων. Οι απαιτούμενες τεχνικές προδιαγραφές των μετρητικών διατάξεων και των διατάξεων αποθήκευσης και αποστολής των

μετρητικών δεδομένων παρέχονται από διεθνείς οργανισμούς (International Electrotechnical Committee (IEC), International Energy Agency (IEA), MEASNET).

Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην διάταξη συναρμολόγησης των αισθητήρων πάνω στον μετεωρολογικό ιστό. Η διατάραξη από το πεδίο ροής ενός κοντινού αντικειμένου, μπορεί να επηρεάσει τις μετρήσεις ενός οργάνου μέτρησης. Έχει αποδειχθεί ότι εάν ο διαχωρισμός των ανεμόμετρων από τον μετεωρολογικό ιστό, τους βραχίονες και άλλους αισθητήρες δεν είναι επαρκής, τότε η ταχύτητα ανέμου που καταγράφεται από τον αισθητήρα σφάλει από την πραγματική τιμή (**Εικόνα 3.2**).



Εικόνα 3.2: Ορθή πρακτική (αριστερά) και λανθασμένη (δεξιά) όσον αφορά στην τοποθέτηση μετρητικών οργάνων πάνω στον ιστό ενός μετεωρολογικού σταθμού [Πηγή: <https://www.wind-energy-the-facts.org>].

Εκτός από τον καθορισμό και την εγκατάσταση των οργάνων μέτρησης, απαιτείται τακτική παρακολούθηση και έλεγχος της σωστής λειτουργίας τους. Αυστηρή γενικότερα πρέπει να είναι η τήρηση των προδιαγραφών βαθμονόμησης, εγκατάστασης και συντήρησης του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται. Έτσι μόνο θα διασφαλιστεί ότι επιτυγχάνονται υψηλά επίπεδα κάλυψης δεδομένων, επί των οποίων θα ληφθούν στη συνέχεια σημαντικές οικονομικές αποφάσεις (για την κατασκευή ή όχι του αιολικού πάρκου στην εν λόγω περιοχή ενδιαφέροντος).

Η απόλυτη ελάχιστη χρονικά καταγραφή δεδομένων θεωρείται το ένα έτος, έτσι ώστε κάθε εποχική μεταβολή να μπορεί να καταγραφεί σωστά. Όμως, όπως φάνηκε και στο 1^ο Κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, επιθυμητή είναι η χρονικά διάρκεια των 3 ετών.

3.2 Αναλυτικές μέθοδοι πρόβλεψης του μακροχρόνιου αιολικού δυναμικού σε μία περιοχή

Από όσα αναλύθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους του παρόντος Κεφαλαίου 3 αλλά και του Κεφαλαίου 1, γίνεται σαφές ότι το βασικό στοιχείο στην αξιολόγηση της παραγόμενης ενέργειας, για ένα προτεινόμενο αιολικό πάρκο, είναι η πρόβλεψη του μακροπρόθεσμου αιολικού δυναμικού στις τοποθεσίες όπου πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Αυτό που πρωτίστως απαιτείται είναι η κατανομή της ταχύτητας και το ροδόγραμμα του ανέμου (που όμως έχουν ληφθεί από μακροχρόνιες μετρήσεις). Επιπλέον επιθυμητές μετρήσεις είναι η μακροχρόνια μεταβολή της πυκνότητας του αέρα και η ένταση της τύρβης (turbulence intensity). Πρέπει να σημειωθεί ότι η ένταση της τύρβης του ανέμου είναι πολύ σημαντική για τον προσδιορισμό της φόρτισης μιας ανεμογεννήτριας, και ως εκ τούτου για τον υπολογισμό του προσδόκιμου της ζωής της [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

3.2.1 Γενικά

Κατά την αξιολόγηση μιας πιθανής τοποθεσίας εγκατάστασης αιολικού πάρκου ή άκομη και σε περιπτώσεις που για κάποιο σκοπό απαιτείται έρευνα της διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου μιας τοποθεσίας, χρειάζεται να ληφθεί ένα ιστορικό με δεδομένα ανέμου από έναν σχετικά ψηλό μετεωρολογικό ιστό. Εάν δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για τη συγκεκριμένη τοποθεσία, χρησιμοποιείται συνήθως η μέθοδος Wind Atlas. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιεί τεχνικές μοντελοποίησης για να αποτυπώσει μακροπρόθεσμα ανεμολογικά δεδομένα στην τοποθεσία ενδιαφέροντος. Η μέθοδος δείχνει να είναι αρκετά ακριβής σε πολλές περιπτώσεις, αλλά δεν μπορεί να υποκαταστήσει τις επιτόπιες μετρήσεις για πιο επίσημη αξιολόγηση της αιολικής ενέργειας. Είναι επίσης δυνατό να γίνουν προβλέψεις για την ταχύτητα του ανέμου σε μία τοποθεσία χρησιμοποιώντας μια αριθμητική μεθοδολογία (Numerical Wind Atlas Methodology), με βάση μια πηγή δεδομένων, όπως τα σύνολα δεδομένων «reanalysis» Numerical Weather Model data sets. Και πάλι, τέτοιες αναλύσεις χρησιμοποιούνται γενικά για την αξιολόγηση της σκοπιμότητας κατασκευής αιολικού πάρκου σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

Υπάρχουν ουσιαστικά δύο μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη του μακροπρόθεσμου αιολικού δυναμικού σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία όπου υπάρχουν διαθέσιμες επιτόπιες μετρήσεις. Η πρώτη μέθοδος συσχετίζεται επιτόπια ανεμολογικά δεδομένα με ανεμολογικά δεδομένα που καταγράφονται σε μακροπρόθεσμο σταθμό αναφοράς. Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί μόνο επιτόπια ανεμολογικά δεδομένα. Εάν δεν υπάρχει ήδη ένα επαρκές σύνολο μακροχρόνιων ανεμολογικών δεδομένων για την τοποθεσία ενδιαφέροντος, είναι επιθυμητό να γίνεται χρήση της πρώτης μεθόδου για την πρόβλεψη του μακροπρόθεσμου αιολικού δυναμικού στην εν λόγω περιοχή. Συνήθως, με τη χρήση της πρώτης μεθόδου, ένα αξιόπιστο αποτέλεσμα μπορεί να επιτευχθεί με διαθέσιμα μετρητικά δεδομένα μόλις ενός έτους. Έτσι, είναι συνήθης πρακτική να βρίσκεται μια κατάλληλη πηγή μακροχρόνιων ανεμολογικών δεδομένων για τοποθεσία κοντά σε αυτή που σχεδιάζεται η κατασκευή του αιολικού πάρκου. Αυτό επιτρέπει τη διεξαγωγή ανάλυσης και συσχέτισης και μειώνει την αβεβαιότητα, σε σχέση με αυτήν που προκύπτει από την αποκλειστική χρήση των μετρητικών δεδομένων της τοποθεσίας ενδιαφέροντος. Ωστόσο, προτού χρησιμοποιηθεί ένα σύνολο μακροχρόνιων δεδομένων από εγγύς μετεωρολογικό σταθμό για να γίνει συσχέτιση με τα διαθέσιμα βραχυχρόνια στην περιοχή

ενδιαφέροντος, είναι ζωτικής σημασίας να ελέγχονται σχολαστικά τα διαθέσιμα ανεμολογικά δεδομένα για την εγγυρότητά τους[<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

Η ιδανική κατάσταση θα ήταν να διαθέταμε μακροχρόνια ανεμολογικά δεδομένα (π.χ. για 10 έτη), μετρημένα στο ύψος της πλήμνης της ανεμογεννήτριας. Αυτό, αν και επιθυμητό, σπάνια είναι επιτεύξιμο. Οπότε είτε χρησιμοποιούμε τις (περιορισμένες χρονικά) επιτόπιες μετρήσεις με χρήση ιστού, είτε προσπαθούμε να χρησιμοποιήσουμε επιπλέον διαθέσιμα μακροχρόνια ανεμολογικά δεδομένα (ώστε να βελτιώσουμε της αξιοπιστία των διαθέσιμων μετρήσεων).

Η διαδικασία της συσχέτισης των ανεμολογικών δεδομένων μεταξύ των δύο διαφορετικών τοποθεσιών πραγματοποιείται ως εξής[<https://www.wind-energy-the-facts.org>]:

- Τα (βραχυχρόνια) ανεμολογικά δεδομένα στην τοποθεσία ενδιαφέροντος λαμβάνονται με υψηλής ποιότητας και σωστά βαθμονομημένο εξοπλισμό.
- Στη συνέχεια αναλύονται μακροχρόνια ανεμολογικά δεδομένα, που είναι διαθέσιμα από μετεωρολογικό σταθμό σε κοντινή σχετικά τοποθεσία (λαμβάνοντας υπόψη την ομοιότητα στη μορφολογία του εδάφους και την εγγύτητα των τοποθεσιών).
- Εάν είναι δυνατόν να αποδειχθεί ότι υπάρχει ικανοποιητική συσχέτιση μεταξύ των δύο σετ ανεμολογικών δεδομένων, τότε χρησιμοποιούμε την συγκεκριμένη συνάρτηση συσχέτισης (που έχει προκύψει από την ανάλυση) ώστε να αναδημιουργήσουμε μακροχρόνια ανεμολογικά δεδομένα στην τοποθεσία ενδιαφέροντος, από τα διαθέσιμα βραχυχρόνια.

Εάν βρεθεί καλή συσχέτιση μεταξύ των δύο σετ δεδομένων, η παραπάνω τεχνική είναι αξιόπιστη, διαφορετικά μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα.

Οι απαραίτητες προϋποθέσεις ώστε ένα σύνολο διαθέσιμων μακροχρόνιων ανεμολογικών δεδομένων εκτός της τοποθεσίας ενδιαφέροντος να μπορεί να θεωρηθεί ως δεδομένα αναφοράς (και αναγωγής), είναι οι ακόλουθες [<https://www.wind-energy-the-facts.org>]:

- Το σύνολο δεδομένων αναφοράς περιλαμβάνει δεδομένα που αλληλεπικαλύπτονται χρονικά με τα δεδομένα που καταγράφονται στην επιθυμητή τοποθεσία κατασκευής του αιολικού πάρκου.
- Τα ανεμολογικά δεδομένα πρέπει να έχουν καταγραφεί χρησιμοποιώντας ένα συνεπές σύστημα τόσο για τα βραχυχρόνια όσο και για τα μακροχρόνια ανεμολογικά δεδομένα. Αυτό πρέπει να περιλαμβάνει ιδιαίτερη προσοχή όχι μόνο για τη θέση και το ύψος του κάθε ιστού και τη συνέπεια του αντίστοιχου εξοπλισμού που χρησιμοποιείται, αλλά και πιθανές αλλαγές στην έκθεση του κάθε ιστού σε γειτονικές επιδράσεις. Για παράδειγμα, η κατασκευή ενός νέου κτηρίου σε ένα αεροδρόμιο ή η ανέγερση ενός αιολικού πάρκου κοντά σε έναν υπάρχοντα ιστό θα καταστρέψει τα δεδομένα. Οι απόλυτες τιμές που καταγράφονται στον σταθμό αναφοράς δεν είναι σημαντικές, αλλά οποιεσδήποτε αλλαγές σε αυτόν(είτε σε ακολουθούμενη διεργασία είτε σε γειτονικό περιβάλλον) θα τον καταστήσουν άχρηστο ως τοποθεσία αναφοράς. Αυτή η έρευνα είναι επομένως πολύ σημαντική και συνήθως πραγματοποιείται με μια φυσική επίσκεψη στην τοποθεσία λήψης των μετρήσεων αναφοράς, μαζί με μια συνέντευξη με το προσωπικό του.
- Η έκθεση στον άνεμο του σταθμού αναφοράς πρέπει να είναι καλή. Είναι σπάνιο για δεδομένα που καταγράφονται σε κέντρα πόλεων (ανάμεσα σε ψηλά κτήρια) ή όταν η μέση ταχύτητα ανέμου στο σταθμό αναφοράς είναι μικρότερη από τη μισή από αυτή στην

τοποθεσία ενδιαφέροντος, να μπορούν να αποδειχθούν χρήσιμα και αξιόπιστα ως δεδομένα αναφοράς.

- Τα δεδομένα αναφοράς θα πρέπει να εμφανίζουν καλή συσχέτιση με αυτά που καταγράφονται στην τοποθεσία ενδιαφέροντος.

Όπου έχουν υπάρξει αλλαγές σε μια μακροπρόθεσμη πηγή αναφοράς ή όπου δεν μπορεί να αποδειχθεί αξιόπιστη συσχέτιση, είναι σημαντικό να απορριφθεί η συγκεκριμένη πηγή μακροχρόνιων δεδομένων. Εάν δεν μπορεί να βρεθεί κατάλληλος μετεωρολογικός σταθμός αναφοράς, τότε η μακροχρόνια πρόβλεψη του αιολικού δυναμικού μπορεί να προέρχεται μόνο από τα δεδομένα που καταγράφονται στην ίδια την περιοχή ενδιαφέροντος. Είναι πιθανό όμως ότι στην περίπτωση αυτή θα απαιτηθούν μεγαλύτερα σύνολα δεδομένων (δύο ή περισσότερων ετών) για την επίτευξη παρόμοιων επιπέδων αβεβαιότητας με εκείνα που θα είχαν ληφθεί αν υπήρχε ένα υψηλής ποιότητας σύνολο δεδομένων μακροχρόνιας αναφοράς από γειτονική περιοχή.

Η εμπειρία από την ανάλυση έργων αιολικής ενέργειας σε ολόκληρη την Ευρώπη έδειξε ότι η πυκνότητα των δημόσιων πηγών υψηλής ποιότητας δεδομένων αιολικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη στη βόρεια Ευρώπη από ό, τι στη νότια Ευρώπη. Αυτή η παρατήρηση, σε συνδυασμό με το γενικά πιο περίπλοκο έδαφος σε μεγάλο μέρος της νότιας Ευρώπης, οδηγεί συχνά σε αναλύσεις στη νότια Ευρώπη που βασίζονται μόνο στα δεδομένα που καταγράφηκαν στο χώρο του αιολικού πάρκου ή σε άλλους κοντινούς χώρους αιολικών πάρκων. Αντίθετα, για τις αναλύσεις στη Βόρεια Ευρώπη, είναι συνηθέστερος ο συσχετισμός των δεδομένων τοποθεσίας με τα δεδομένα που καταγράφονται σε εθνικούς μετεωρολογικούς σταθμούς. Είναι σαφές ότι αυτή η παρατήρηση είναι μια γενίκευση και υπάρχουν πολλές εξαιρέσεις από τα παραπάνω. Η δημιουργία μιας καλής σειράς μακροχρόνιων ιστών αναφοράς, ειδικά για τη χρήση αιολικής ενέργειας σε περιοχές της Ευρώπης που είναι πιθανό να αναπτυχθούν έργα αιολικής ενέργειας, θα ήταν εξαιρετικά πολύτιμο πλεονέκτημα. Ένα τέτοιο δίκτυο σε επίπεδο ΕΕ θα ήταν εξαιρετικά επωφελές [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

3.2.2 Μέθοδοι συσχέτισης

Η διαδικασία σύγκρισης των ταχυτήτων ανέμου της τοποθεσίας ενδιαφέροντος με τις ταχύτητες ανέμου στο σταθμό αναφοράς και η χρήση της σύγκρισης για την εκτίμηση της μακροπρόθεσμης ταχύτητας ανέμου στην τοποθεσία ονομάζεται Μέτρηση-Συσχέτιση-Πρόβλεψη (Measure Correlate Predict - MCP). Είναι δύσκολο να επιτευχθεί ακριβής καθοδήγηση σχετικά με το πόσο κακή μπορεί να είναι η ποιότητα μιας συσχέτισης προτού ο σταθμός αναφοράς δείξει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί αξιόπιστα σε μια ανάλυση. Ωστόσο, κατά γενικό κανόνα, όπου ο συντελεστής Pearson (R^2) μιάς μηνιαίας συσχέτισης ταχύτητας ανέμου είναι μικρότερος από 0,8, υπάρχει σημαντική αβεβαιότητα στη χρήση μακροπρόθεσμων δεδομένων από το σταθμό αναφοράς προκειμένου να συναχθούν μακροπρόθεσμες συνθήκες ανέμου για το σημείο ενδιαφέροντος [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία MCP, υπάρχει μια εκτίμηση της μακροπρόθεσμης ταχύτητας ανέμου στην τοποθεσία. Αυτό το στάδιο είναι πολύ σημαντικό, δεδομένου ότι έχει πλέον επιτευχθεί η θέση στην οποία έχουμε γνώση της μακροπρόθεσμης συμπεριφοράς της ταχύτητας του ανέμου σε ένα μόνο σημείο (ή περισσότερα σημεία εάν υπάρχουν πολλοί ιστοί) στην περιοχή. Αυτή η εκτίμηση θα περιέχει τόσο τη μέση μακροπρόθεσμη αναμενόμενη τιμή της ταχύτητας του ανέμου,

όσο και την αβεβαιότητα που σχετίζεται με αυτήν. Μέχρι το σημείο αυτό, ωστόσο, δεν γνωρίζουμε τίποτα για την κατανομή της ταχύτητας του ανέμου σε ολόκληρη την περιοχή που μας ενδιαφέρει και ούτε έχουμε ασχοληθεί με τον τρόπο με τον οποίο οι τιμές ταχύτητας ανέμου μπορούν να μετατραπούν σε ενέργεια [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

3.2.3 Πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας ενός αιολικού πάρκου

Για να προβλεφθεί η παραγωγή ενέργειας του αιολικού πάρκου (αυτό που κυρίως μας ενδιαφέρει), είναι απαραίτητο να ακολουθήσουμε τα εξής βήματα [<https://www.wind-energy-the-facts.org>]:

- Πρόβλεψη της διακύμανσης της μακροπρόθεσμης ταχύτητας ανέμου στη ζητούμενη τοποθεσία και στο ύψος πλήμνης των ανεμογεννητριών, με βάση τις μακροπρόθεσμες ταχύτητες ανέμου στις θέσεις του ανεμολογικού ιστού.
- Πρόβλεψη των απωλειών λόγω ομόρρου, που προκύπτουν ως αποτέλεσμα της λειτουργίας μιάς ανεμογεννήτριας πίσω από άλλες (στη διεύθυνση του ανέμου).
- Υπολογισμός (ή εκτίμηση) των υπόλοιπων απωλειών.

Απαιτούμενες πληροφορίες για την ανάλυση

Εκτός από τα δεδομένα ανέμου που περιγράφηκαν παραπάνω, οι πληροφορίες που θα αξιοποιηθούν σε αυτήν τη διαδικασία είναι συνήθως οι εξής [<https://www.wind-energy-the-facts.org>]:

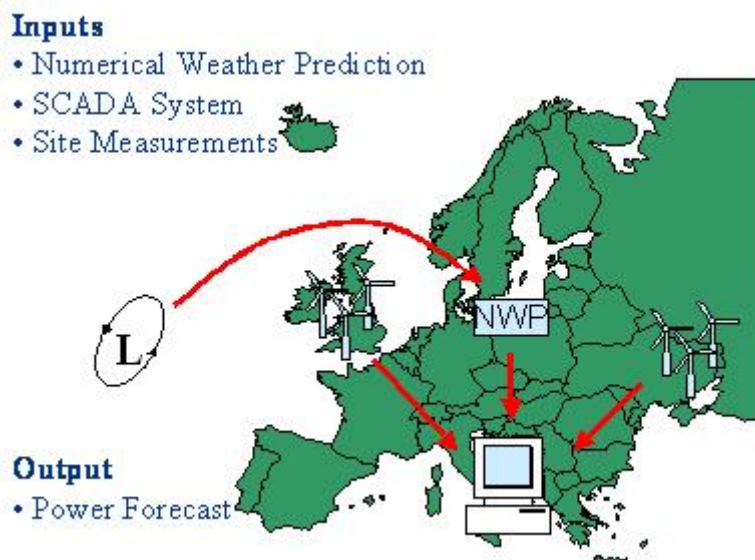
- Διάταξη (χωροθέτηση) αιολικού πάρκου και ύψος πύργου κάθε ανεμογεννήτριας.
- Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών, συμπεριλαμβανομένης της καμπύλης ισχύος (η καμπύλη που απεικονίζει την παραγόμενη ισχύ ως συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου) και της καμπύλης αντίστασης (η ισοδύναμη καμπύλη της δύναμης που ασκείται από τον άνεμο στην κορυφή του πύργου ως συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου).
- Προβλεπόμενη μακροχρόνια πυκνότητα αέρα και ένταση τύρβης (turbulence intensity).
- Η τοπογραφία της ζητούμενης και της γύρω περιοχής
- Προσδιορισμός της κάλυψης της επιφάνειας του εδάφους στη ζητούμενη και στη γύρω περιοχή.

Μεθοδολογίες πρόβλεψης παραγωγής ενέργειας

Συνήθως, η πρόβλεψη της διακύμανσης της ταχύτητας του ανέμου ανάλογα με το ύψος, η διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου στην περιοχή που εξετάζουμε και η αλληλεπίδραση τυρβώδους ροής μεταξύ ανεμογεννητριών, υπολογίζονται σε ειδικά λογισμικά ηλεκτρονικών υπολογιστών. Αυτά έχουν αναπτυχθεί ώστε να παρέχουν ακριβείς προβλέψεις του ανέμου, για την εκμετάλλευση της παραγόμενης ενέργειας. Η χρήση τέτοιων εργαλείων επιτρέπει την εύκολη και γρήγορη δοκιμή διαφορετικών διατάξεων ανεμογεννητριών στο χώρο, διαφορετικών τύπων ανεμογεννητριών και διαφορετικών υψών πλήμνης. Τέτοια προγράμματα είναι γνωστά ως Εργαλεία Σχεδιασμού Αιολικών Πάρκων - Wind Farm Design Tools (WFDT) ([Εικόνα 3.3](#)) [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

Στο πλαίσιο ενός λογισμικού WFDT, οι υπολογισμοί της ροής ανέμου στο χώρο πραγματοποιούνται συνήθως, χρησιμοποιώντας το μοντέλο WasP, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στον συγκεκριμένο κλάδο το τελευταίο χρονικό διάστημα. Υπάρχουν επίσης και άλλα εμπορικά μοντέλα, παρόμοια με το WASP. Τα αντίστοιχα μοντέλα πρόβλεψης της ροής, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάπτυξη εμπορικών αιολικών πάρκων, πρέπει να εκτελούνται γρήγορα και να είναι αξιόπιστα και συνεπή. Προς το παρόν, οι βιομηχανίες γενικά επιλέγουν απλά αλλά αποτελεσματικά εργαλεία όπως το WASP. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, αυξάνεται η χρήση των λογισμικών Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής - Computational Fluid Dynamics (CFD), αν και τα εργαλεία CFD χρησιμοποιούνται παράλληλα και χωρίς να αντικαθιστούν τα απλά εργαλεία για τη διερεύνηση συγκεκριμένων φαινομένων ροής σε πιο πολύπλοκες τοποθεσίες. Τα εργαλεία CFD πρέπει να χρησιμοποιούνται με ιδιαίτερη προσοχή, καθώς τα αποτελέσματα είναι ευαίσθητα στις υποθέσεις της εν λόγω μοντελοποίησης. Οι κώδικες CFD είναι επίσης περισσότερο δύσχρηστοι για υπολογισμούς και πολύ περισσότερο απαιτητικοί σε υπολογιστικούς πόρους και εμπειρία. Η τυπική χρήση εργαλείων CFD είναι, πρώτον, στο να δώσει μια καλύτερη εκτίμηση της επιτάχυνσης του ανέμου στην τοποθεσία ενδιαφέροντος, και δεύτερον, να εντοπίσει επικίνδυνα σημεία, δηλαδή περιοχές όπου οι συνθήκες ανέμου είναι ιδιαίτερα δύσκολες για τις ανεμογεννήτριες. Συγκεκριμένα, τέτοια εργαλεία αρχίζουν να χρησιμοποιούνται για να βοηθήσουν στην λεπτομερή και με ακρίβεια τοποθέτηση των ανεμογεννητριών σε πιο περίπλοκες περιοχές εδάφους [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

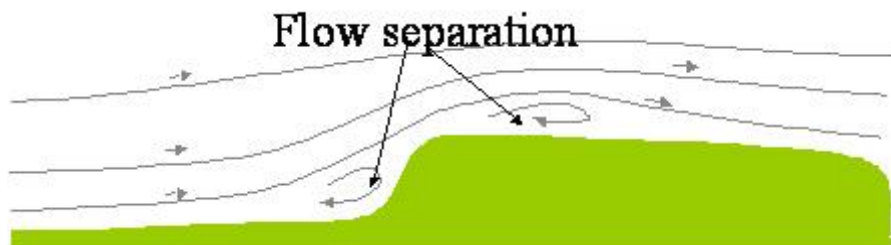
Επομένως, η πρόκληση είναι να μπορεί να δωθεί ένας τοπογραφικός χάρτης και το μακροπρόθεσμο ροδόγραμμα ανέμου σε ένα γνωστό σημείο στον χάρτη και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της μακροπρόθεσμης ταχύτητας ανέμου σε όλα τα σημεία του χάρτη, όπου υπάρχει πρόθεση να τοποθετηθούν ανεμογεννήτριες. Ένα τυπικό σύνολο τοπογραφικής εισόδου και εξόδου περιγράμματος ανέμου, φαίνεται στην [Εικόνα 3.4](#) για μια λοφώδη περιοχή [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].



Εικόνα 3.3: Είσοδος: τοπογραφικά στοιχεία (άνω) Έξοδος: δημιουργία δεδομένων ταχύτητας ανέμου (κάτω)
[Πηγή: <https://www.wind-energy-the-facts.org>].

Το μοντέλο WASP έχει περιορισμούς κάτω από συγκεκριμένες τοπογραφικές συνθήκες και συνθήκες ροής. Έχει σχεδιαστεί για προσκολλημένη ροή ανέμου και έτσι για κλίσεις πιο απότομες

από περίπου 20° όπου η ροή θα αποκολληθεί, το μοντέλο είναι έξω από τα όρια ισχύος του. Έτσι, πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή και εμπειρία, καθώς σε μια απότομη αλλαγή στην τοπογραφία δεν μπορεί να υποστηρίξει και να αποδώσει αποκόλληση της ροής του ανέμου. Σε μια τέτοια περίπτωση το μοντέλο WAsP θα ακολουθήσει το έδαφος, ενώ ο πραγματικός άνεμος θα συμπεριφέρεται όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.4**. Επομένως, σε πολύπλοκο έδαφος, απαιτείται η χειροκίνητη ερμηνεία των αποτελεσμάτων υπολογισμού [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].



Εικόνα 3.4: Παράδειγμα αποκόλλησης της ροής πάνω από ένα λόφο [Πηγή:<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

Πέρα όμως από την επιστημονική περιοχή της αιολικής ενέργειας, υπάρχει εξέλιξη στα αριθμητικά μοντέλα Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής και από άλλες πτυχές της μηχανολογίας, ειδικά στην προσομοίωση πολύπλοκων φαινομένων ροής (όπως στην αεροδιαστημική και στις στροβιλομηχανές). Οι εξελίξεις αυτές περνούν σταδιακά και την περιοχή της προσομοίωσης των αιολικών πάρκων. Υπάρχει όμως ακόμη πολύς δρόμος για να θεωρηθούν αυτά τα μοντέλα είτε αξιόπιστα, είτε ικανά να αντικαταστήσουν τις συμβατικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται έως τώρα. Η ακρίβεια της εκτίμησης της ενεργειακής παραγωγής ενός αιολικού πάρκου καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το τοπογραφικό μοντέλο ανέμου και την ακρίβειά του. Υπάρχουν πλέον σύνολα αριθμητικών δεδομένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επικύρωση νέων κωδίκων. Ο ακριβής όμως υπολογισμός της ροής σε ανώμαλο έδαφος είναι ιδιαίτερα δύσκολος. Προς το παρόν, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιείται ένα μείγμα προσομοιώσεων και ανθρώπινης γνώσης και εμπειρίας. Για τέτοιες περιοχές δεν υπάρχει άλλη εναλλακτική λύση από μια ολοκληρωμένη διαδικασία πρόσκτησης μετρητικών δεδομένων, τα οποία στην συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τοπική μοντελοποίηση ροής με χρήση μεθόδων Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

Μόλις υπολογιστούν οι τοπικές τοπογραφικές επιδράσεις στη ροή, είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί πώς οι μεμονωμένες ανεμογεννήτριες επηρεάζουν η μία την άλλη. Εάν μια ανεμογεννήτρια λειτουργεί κατάντη μιας άλλης, τότε η πρώτη θα εκμεταλλεύεται λιγότερο αέρα από ό,τι εάν ήταν εκτεθειμένη στην ελεύθερη ροή. Για ορισμένους τύπους ανεμογεννητριών και σχεδιασμού αιολικού πάρκου αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να είναι σημαντικό, της τάξης του 15% σε χαμένη ενέργεια, και ως εκ τούτου πρέπει να προσδιορίζεται προσεκτικά. Τα μοντέλα που εκτιμούν αυτήν την απώλεια είναι γνωστά ως «μοντέλα ομόρρου – wake models». Διαφορετικές παραλλαγές των μοντέλων αυτών χρησιμοποιούνται από τα διάφορα εμπορικά λογισμικά WFDT. Αυτά τα εργαλεία έχουν πλέον επικυρωθεί για μια ποικιλία διαφορετικών τύπων διατάξεων αιολικών πάρκων. Ωστόσο, είναι γνωστό ότι δεν λειτουργούν καλά για πολύ πυκνές διατάξεις ανεμογεννητριών. Επίσης, με την εμφάνιση δεδομένων από μεγάλα υπεράκτια αιολικά πάρκα, είναι προφανές ότι απαιτούνται ορισμένες προσαρμογές στα συμβατικά μοντέλα ομόρρου, για πολύ μεγάλα αιολικά πάρκα.

Είναι επίσης σημαντικό να ληφθεί υπ' όψιν ότι, καθώς αυξάνεται η απόσταση της ανεμογεννήτριας από τον μετεωρολογικό ιστό, αυξάνεται επίσης η αβεβαιότητα στην πρόβλεψη. Αυτή η αύξηση της αβεβαιότητας είναι συνήθως πιο άμεση σε σύνθετο έδαφος, παρά σε ομαλό. Η μείωση της ακρίβειας με την αύξηση της απόστασης από τον ιστό, κατά τη χρήση μοντέλων όπως το WAsP, συνδέεται με την επιλογή του κατάλληλου αριθμού μετεωρολογικών ιστών για μια τοποθεσία αιολικού πάρκου. Τα υπολογιστικά εργαλεία WFDT επιτρέπουν επίσης να ληφθούν υπόψη περιβαλλοντικοί περιορισμοί σε τμήματα της περιοχής ενδιαφέροντος, τα οποία ενδέχεται να μην επιτρέπεται να χρησιμοποιούνται, επί παραδείγματι για λόγους σπάνιας χλωρίδας ή πανίδας, περιορισμών θορύβου, οπτικής έκθεσης, ασταθούς εδάφους ή διαφόρων περιορισμών ιδιοκτησίας γης [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

Η ικανότητα των υπολογιστικών εργαλείων WFDT να παρέχουν ένα ολοκληρωμένο μοντέλο του αιολικού πάρκου επιτρέπει επίσης να χρησιμοποιούνται για την αυτοματοποιημένη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του συγκεκριμένου πάρκου. Το λογισμικό βελτιστοποίησης μετακινεί αυτόματα τις ανεμογεννήτριες, ώστε να παρέχει τον καλύτερο δυνατό συμβιβασμό μεταξύ της συγκέντρωσης των ανεμογεννητριών στις περιοχές μέγιστης ταχύτητας ανέμου (όπου όμως μεγιστοποιούνται οι απώλειες ομόρρου) και της εξάπλωσης των ανεμογεννητριών σε όλη την διατιθέμενη περιοχή του πάρκου, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες ομόρρου. Αυτή η αυτοματοποιημένη διαδικασία βελτιστοποίησης λαμβάνει υπ' όψιν ταυτόχρονα και την τήρηση των περιβαλλοντικών και των ιδιοκτησιακών περιορισμών της περιοχής ενδιαφέροντος [<https://www.wind-energy-the-facts.org>].

3.3 Μεθοδολογίες για εύρεση της ταχύτητας του ανέμου σε μεγαλύτερα ύψη

Ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η ταχύτητα του ανέμου καθ' ύψος (από την επιφάνεια του εδάφους, ονομάζεται προφίλ ταχύτητας ανέμου. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να γνωρίζουμε καποια αξιόπιστα προφίλ ταχύτητας ανέμου, που να μας δίνουν τη δυνατότητα προσεγγιστικού υπολογισμού της ταχύτητας του ανέμου σε μεγάλα ύψη, εκεί που η μέτρηση καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη και κοστοβόρα. Μέσω αυτών των τυποποιημένων προφίλ ταχύτητας ανέμου θα μπορούμε να προσεγγίζουμε όσο το δυνατόν ακριβέστερα την πραγματική τιμή της ταχύτητας του ανέμου, στο αντίστοιχο ύψος της ανεμογεννητριας, λαμβάνοντας υπ' όψιν στοιχεία και μετρήσεις από πολύ μικρότερα υψόμετρα, εκεί που οι μετρήσεις είναι πραγματοποιήσιμες με μικρότερο κόστος και μικρότερη πολυπλοκότητα.

Μεθοδολογίες που παρουσιάζουν ενδιαφέρον για την προσέγγιση της ταχύτητας του ανέμου στα 80 m, διαθέτοντας δεδομένα ανέμου από τα 10 m, περιγράφονται στη συνέχεια.

Η πρώτη από αυτές είναι η γνωστή **εκθετική προσέγγιση**, που δίνεται από τη σχέση:

$$V(z) = V_R \left(\frac{z}{z_R} \right)^a$$

όπου $V(z)$ είναι η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος z , V_R είναι η ταχύτητα αναφοράς στο υψόμετρο z_R όπου έχουμε τη μέτρηση και a (θέτουμε 1/7) ο συντελεστής τριβής.

Η δεύτερη προσέγγιση είναι η **λογαριθμική προσέγγιση**, που δίνεται από τη σχέση:

$$V(z) = V_R \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_R}{z_0}\right)}$$

όπου επιπρόσθετα το z_0 (θέτουμε $0,01\text{ m}$) είναι το μήκος τραχύτητας. Ο λογαριθμικός νόμος θεωρητικά ισχύει μόνο για ουδέτερες ατμοσφαιρικές συνθήκες (όπου οι κάθετες κινήσεις δεν δυσχεραίνονται, ούτε υποστηρίζονται από την ατμόσφαιρα). Η λογαριθμική προσέγγιση δεν έχει κάποια θεωρητική βάση, αλλά συχνά παρέχει εύλογη προσέγγιση στα κατακόρυφα προφίλ ανέμου [Arga, 1988].

Το κύριο πλεονέκτημα και των δύο παραπάνω σχέσεων είναι η απλότητά τους, καθώς απαιτείται μόνο μία σταθερή παράμετρος. Ωστόσο δεν μπορούν να ληφθούν παραλλαγές για τις διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος, χρησιμοποιώντας μια μόνο σταθερή παράμετρο, με αποτέλεσμα να παραγεται συχνά σημαντική απόκλιση από την πραγματική τιμή της ταχύτητας του ανέμου.

Πολλές είναι οι περιπτώσεις που αυτές οι δύο μέθοδοι μας δίνουν λανθασμένες προβλέψεις για την ταχύτητα του ανέμου, ή ακόμα και μηδενισμό αυτής, λόγω του ότι η ταχύτητα αναφοράς (V_R) αποτελεί πολλαπλασιαστικό παράγοντα στις παραπάνω σχέσεις. Δεδομένων αυτών των περιορισμών προτάθηκε μια νέα μεθοδολογία [Archer & Jacobson, 2003], αυτή των ελάχιστων τετραγώνων, η οποία περιλαμβάνει τα βήματα που περιγράφονται στη συνέχεια.

1. Για κάθε σταθμό μέτρησης μεγάλου ύψους (sounding station – με χρήση sonic anemometer) υπολογίζονται τέσσερις παράμετροι για κάθε ώρα, την κάθε μέρα (τυπικά στις 12:00 και 24:00). Από τις τέσσερις παραμέτρους, υπολογίζεται η «καλύτερη» παράμετρος προσαρμογής, ως αυτή που παρέχει το χαμηλότερο υπόλοιπο και αποθηκεύεται.
2. Για κάθε επιφανειακό σταθμό μέτρησης επιλέγονται οι πέντε κοντινότεροι σταθμοί μέτρησης μεγάλου ύψους. Στη συνέχεια, η V_R από τον επιφανειακό σταθμό και η «καλύτερη» παράμετρος από κάθε σταθμό μέτρησης μεγάλου ύψους χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ταχύτητας $V(80)$ σε κάθε ένα από τους πέντε σταθμούς μέτρησης μεγάλου ύψους.
3. Τέλος, η $V(80)$ στον επιφανειακό σταθμό μέτρησης υπολογίζεται ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των πέντε νέων $V(80)$ από τους σταθμούς μέτρησης μεγάλου ύψους, όπου η στάθμιση είναι το αντίστροφο τετράγωνο της απόστασης μεταξύ του επιφανειακού σταθμού και κάθε σταθμού μέτρησης μεγάλου ύψους.

Οι τέσσερις παράμετροι για κάθε ώρα διαθέσιμων δεδομένων (συνήθως δύο φορές την ημέρα) σε κάθε σταθμό μέτρησης μεγάλου ύψους καθορίζονται ως εξής. Η σχέση υπολογισμού για το υπόλοιπο R των τετραγώνων του σφάλματος στην ταχύτητα του ανέμου ορίζεται ως

$$R = \sum_{i=1}^N [V_i - V(z_i)]^2$$

όπου N είναι ένας επιλεγμένος αριθμός σημείων στο κάτω μέρος μιας μέτρησης sounding ($N = 3$ συνήθως), V_i είναι η ταχύτητα του ανέμου που παρατηρείται σε κατακόρυφο σημείο i στον σταθμό μέτρησης μεγάλου ύψους (με το πρώτο κατακόρυφο σημείο να είναι στα 10 m , δηλαδή, $z_i = z_R = 10\text{ m}$) και το $V(z_i)$ είναι η ταχύτητα ανέμου που υπολογίζεται με μία από τις πολλές πιθανές

σχέσεις (π.χ. λογαριθμικός ή εκθετικός νόμος). Συνθέτοντας την μερική παράγωγο του R , θέτοντας τις παραμέτρους των αντίστοιχων σχέσεων (a και z_0 , αντίστοιχα) ίσες με μηδέν και επιλύοντας, προκύπτουν δύο παράμετροι ελαχίστων τετραγώνων (LS), όπως στη συνέχεια:

$$\alpha^{LS} = \frac{\sum_{i=1}^N \ln\left(\frac{V_i}{V_R}\right) \ln\left(\frac{z_i}{z_R}\right)}{\sum_{i=1}^N \ln\left(\frac{z_i}{z_R}\right)^2}$$

$$\ln(z_0^{LS}) = \frac{V_R \left\{ \sum_{i=1}^N [\ln(z_i)]^2 - \ln(z_R) \sum_{i=1}^N \ln(z_i) \right\} - \ln(z_R) \sum_{i=1}^N \left(V_i \ln\left(\frac{z_i}{z_R}\right) \right)}{\left\{ V_R \sum_{i=1}^N \ln(z_i) - \sum_{i=1}^N \left[V_i \ln\left(\frac{z_i}{z_R}\right) \right] - N V_R \ln(z_R) \right\}}.$$

Περισσότερες λεπτομέρειες για την παραπάνω μεθοδολογία και την εφαρμογή της δίδονται στην εργασία των [Archer & Jacobson, 2003].

Για την βελτίωση της προσέγγισης των πραγματικών προφίλ ανέμου προτάθηκε ένας λογαριθμικός νόμος με 2 παραμέτρους [Archer & Jacobson, 2003]:

$$V_i = A + B \cdot \ln(z_i)$$

όπου

$$B = \frac{N \sum_{i=1}^N [V_i \ln(z_i)] - \sum_{i=1}^N V_i \sum_{i=1}^N \ln(z_i)}{N \sum_{i=1}^N [\ln(z_i)^2] - \left(\sum_{i=1}^N \ln(z_i) \right)^2} \quad A = \frac{\sum_{i=1}^N V_i - B \sum_{i=1}^N \ln(z_i)}{N}.$$

Σημειώνεται ότι η καμπύλη προσαρμογής που προκύπτει από την εξίσωση δεν είναι υποχρεωμένη να περνά από την V_R . Εάν η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται με το ύψος για το μικρότερο αριθμό σημείων N , τότε τόσο οι εκθετικές, όσο και οι λογαριθμικές καμπύλες δείχνουν λάθος κοιλότητα, λόγω του γεγονότος ότι είτε ο συντελεστής τριβής θα γίνει αρνητικός, είτε το μήκος τραχύτητας θα γίνει πολύ μεγάλο. Σε αυτήν την περίπτωση και η καμπύλη με $1/7$ συντελεστή τριβής και η καμπύλη με 0,01 μήκος τραχύτητας υπερεκτιμούν ουσιαστικά την $V(80)$. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η προεκβολή της $V(80)$ με γραμμική παλινδρόμηση

$$V_i = C + D \cdot z_i$$

όπου οι συντελεστές C και D δίδονται από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$D = \frac{N \sum_{i=1}^N (V_i z_i) - \sum_{i=1}^N (V_i) \sum_{i=1}^N (z_i)}{N \sum_{i=1}^N (z_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^N (z_i) \right)^2}$$

$$C = V_R - D \cdot z_R$$

Εδώ η γραμμή παρεμβολής αναγκάζεται να περάσει μέσω της V_R .

3.4 Εφαρμογή σε ανεμολογικά δεδομένα από την Ιεράπετρα Κρήτης

Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε ανεμολογικά δεδομένα για την περιοχή της Ιεράπετρας Κρήτης, τα οποία παραχωρήθηκαν από το ΚΑΠΕ (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας). Τα ανεμολογικά δεδομένα αφορούν σε μετρήσεις που ελήφθησαν σε ύψη 10 m και 30 m, (ταχύτητα ανέμου και διεύθυνση ανέμου, μέσες ωριαίες τιμές) από την 30-3-1993 έως την 26-8-1994. Το μετρητικό σύστημα είχε τοποθετηθεί στη θέση με συντεταγμένες: $X = 662942$, $Y = 3874562$, $H = 65$ m. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η απόκτηση δωρεάν λεπτομερών ανεμολογικών δεδομένων είναι ιδιαίτερα δύσκολη υπόθεση.

Για τα συγκεκριμένα ανεμολογικά δεδομένα και για κάθε μέτρηση υπολογίστηκε η ταχύτητα του ανέμου στα 30 m ύψος από την ταχύτητα στα 10 m ύψος, εφαρμόζοντας το εκθετικό και το λογαριθμικό προφίλ ταχύτητας, με $\alpha = 1/7$ και $z_0 = 0,01$ m αντίστοιχα.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE – Mean Squared Error) για τους δύο υπολογισμούς και για το σύνολο των $N = 11.467$ διαθέσιμων μετρήσεων, ως

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [V_i - V(z_i)]^2$$

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα για την περίπτωση της εκθετικής κατανομής υπολογίστηκε ίσο με:

$$MSE_{\varepsilon} = 0.2506$$

Αντίστοιχα, το μέσο τετραγωνικό σφάλμα για την περίπτωση της λογαριθμικής κατανομής υπολογίστηκε ίσο με:

$$MSE_{\lambda} = 0.2043$$

Όπως φαίνεται, η λογαριθμική κατανομή έδωσε μικρότερο μέσο τετραγωνικό σφάλμα σε σχέση με την εκθετική κατανομή.

Επιπλέον, για τις δύο κατανομές υπολογίστηκε το μέγιστο τετραγωνικό σφάλμα, ως

$$MaxSE = \max_{i=1,N} [V_i - V(z_i)]^2$$

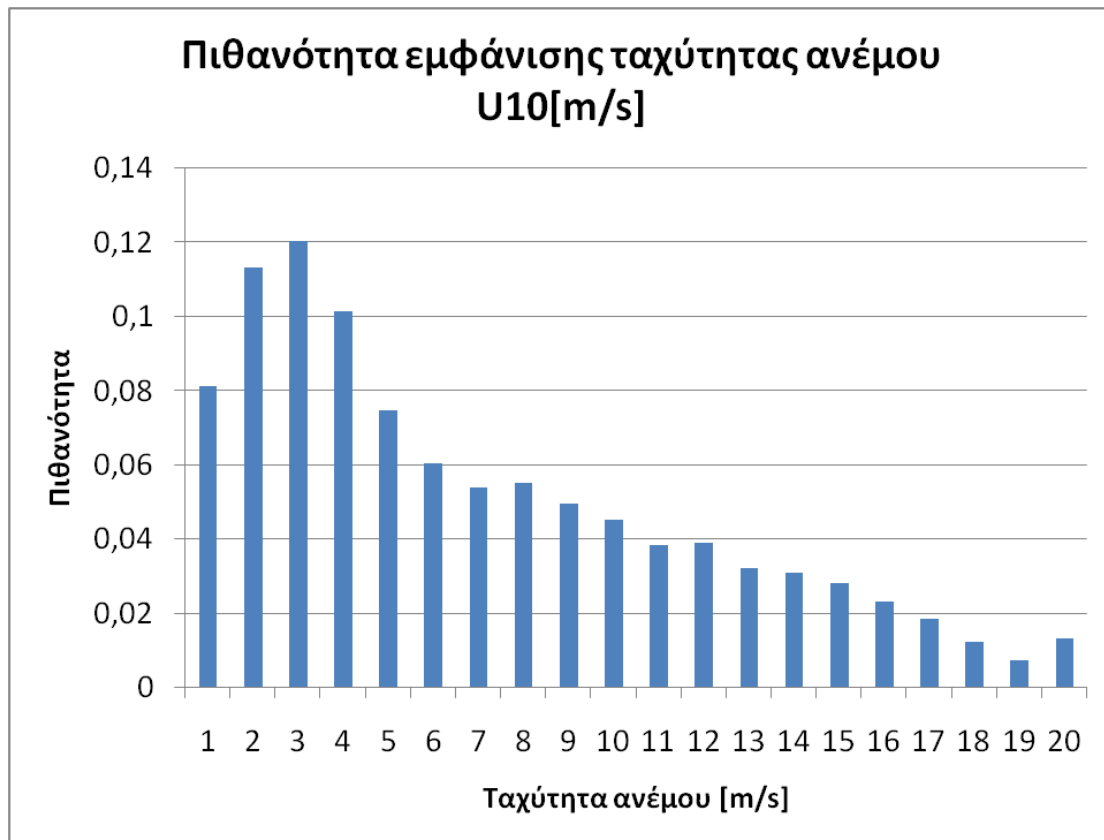
Το μέγιστο τετραγωνικό σφάλμα για την περίπτωση της εκθετικής κατανομής υπολογίστηκε ίσο με:

$$MaxSE_{\varepsilon} = 7.3237$$

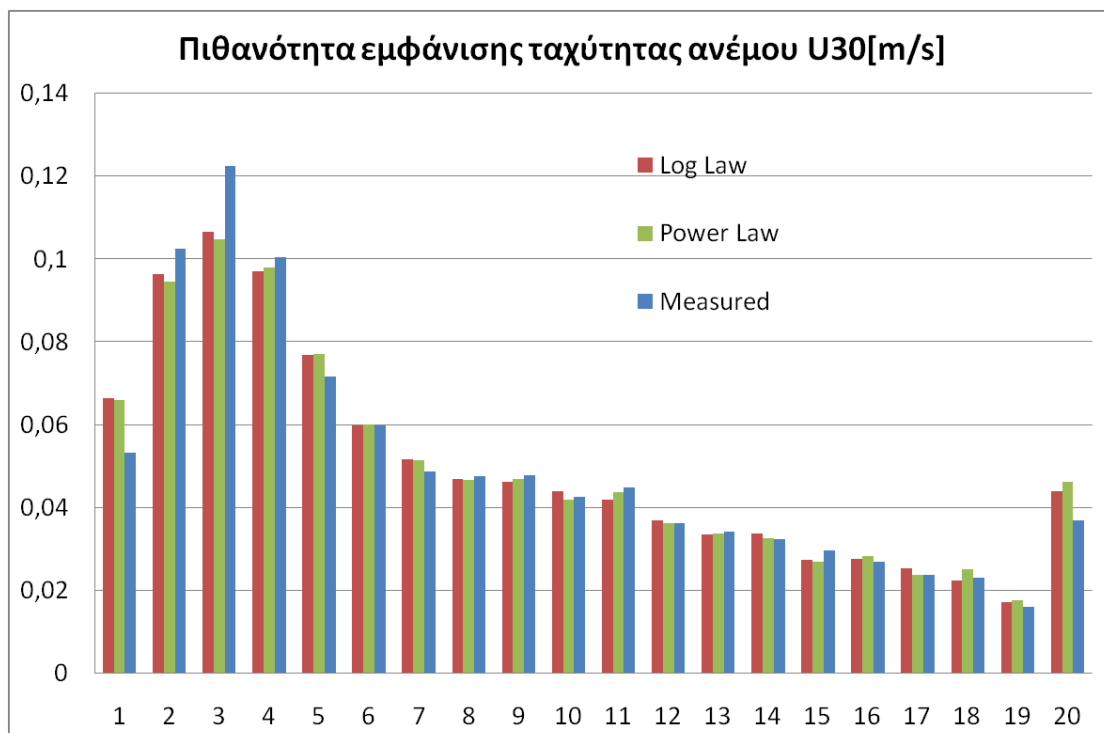
Αντίστοιχα, το μέγιστο τετραγωνικό σφάλμα για την περίπτωση της λογαριθμικής κατανομής υπολογίστηκε ίσο με:

$$MaxSE_{\lambda} = 5.956$$

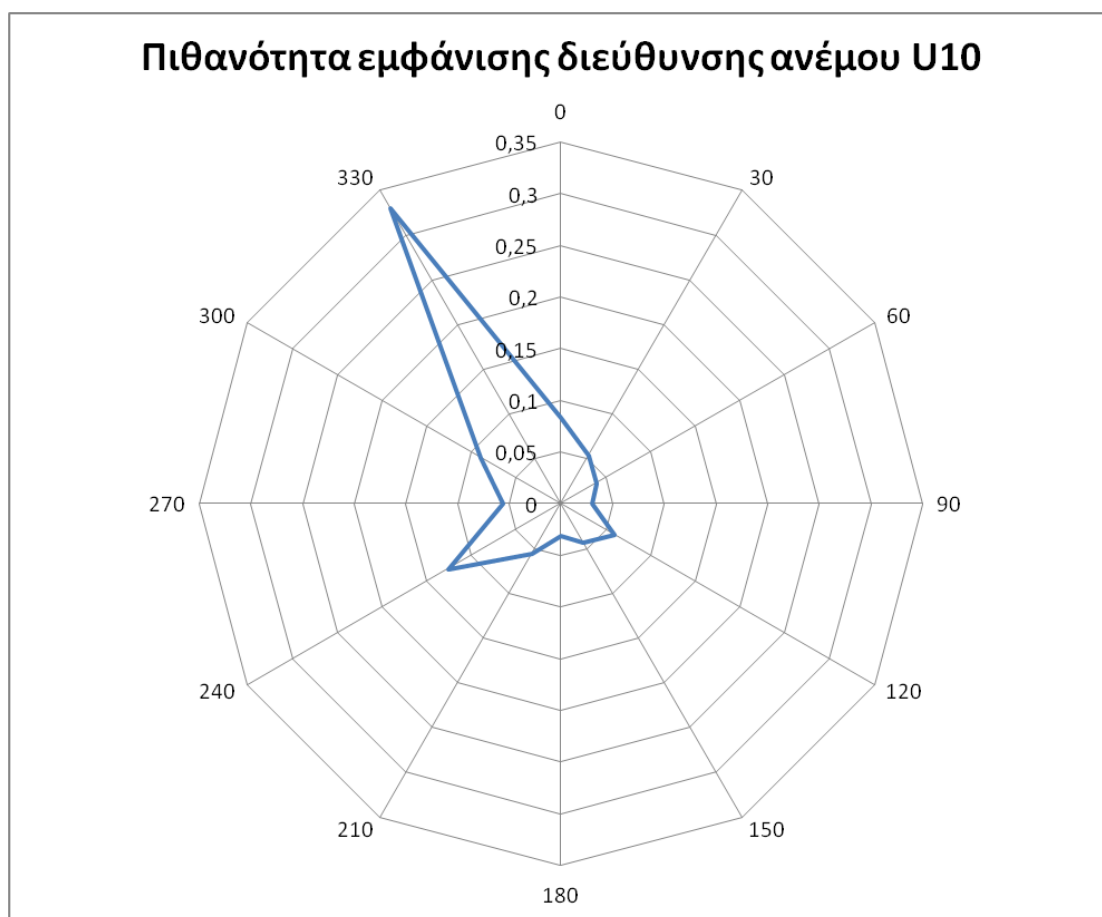
Συνεπώς, παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα.



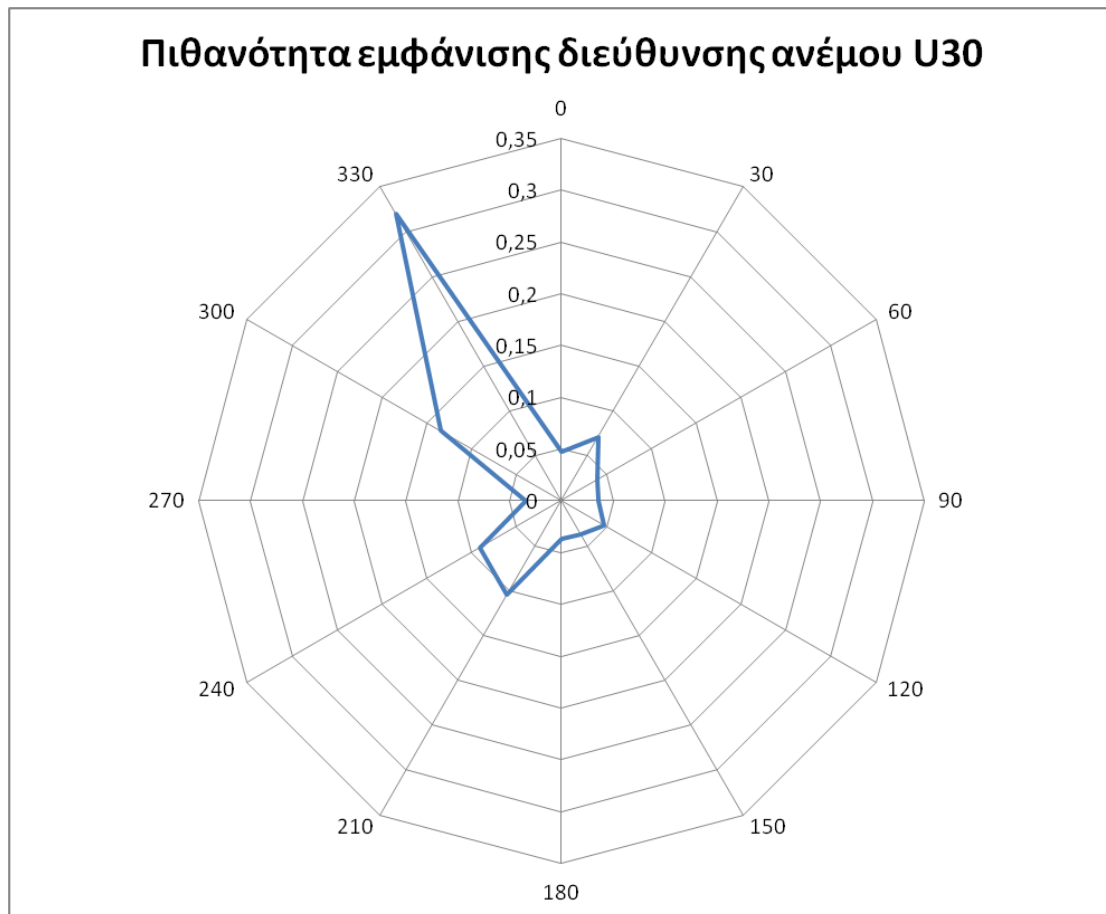
Εικόνα 3.5: Κατανομή ταχυτήτων από τα διαθέσιμα ανεμολογικά δεδομένα στην Ιεράπετρα Κρήτης [10 m].



Εικόνα 3.6: Κατανομή ταχυτήτων από τα διαθέσιμα ανεμολογικά δεδομένα στην Ιεράπετρα Κρήτης (σύγκριση μετρήσεων με προβλέψεις) [30 m].

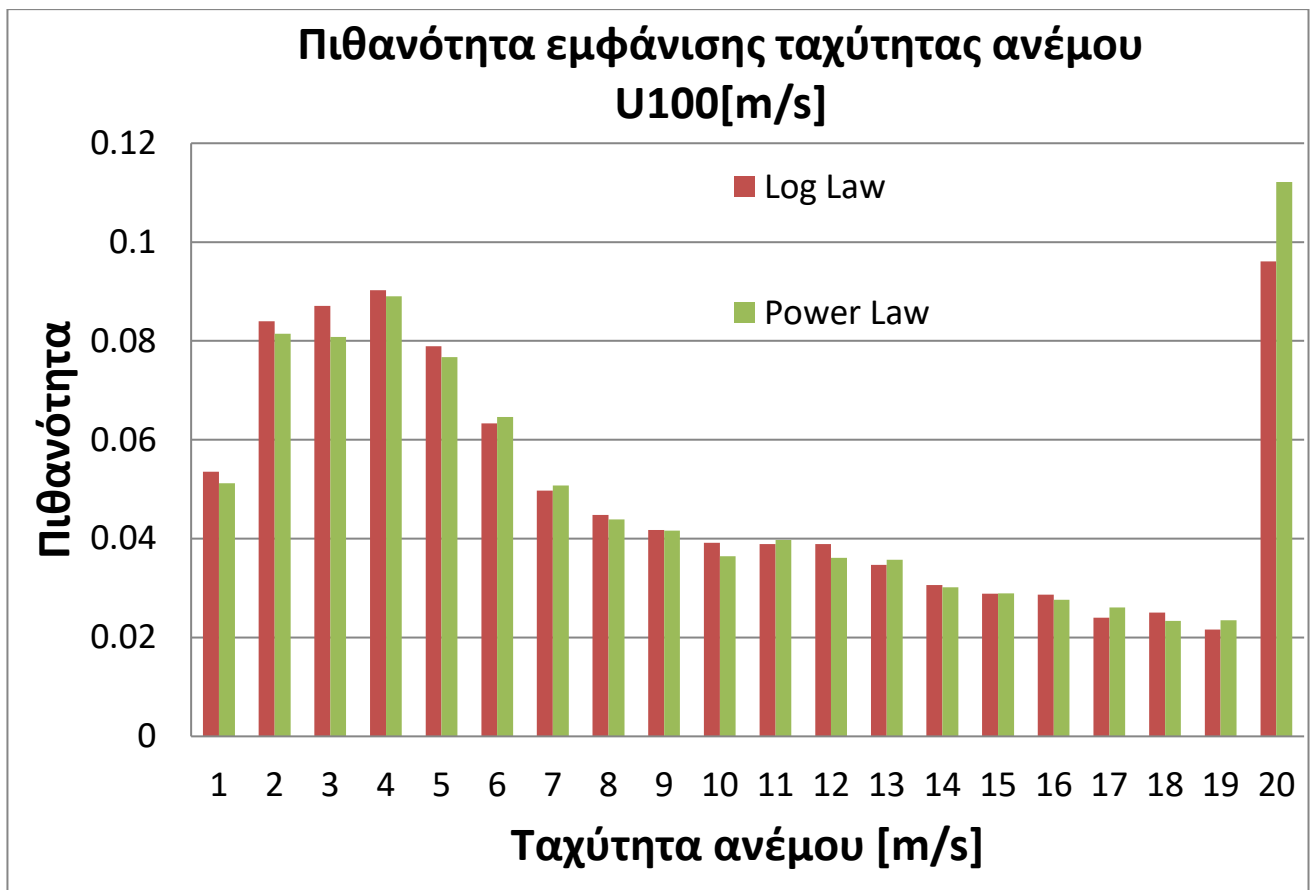


Εικόνα 3.7: Ροδόγραμμα διεύθυνσης ανέμου από τα διαθέσιμα ανεμολογικά δεδομένα στην Ιεράπετρα Κρήτης [10 m].



Εικόνα 3.8: Ροδόγραμμα διεύθυνσης ανέμου από τα διαθέσιμα ανεμολογικά δεδομένα στην Ιεράπετρα Κρήτης [30 m].

Εφαρμόζοντας τον εκθετικό και λογαριθμικό νόμο στις μετρήσεις ταχυτήτων που υπάρχουν για την Ιεράπετρα στα 10 m υψόμετρο, υπολογίστηκε προσεγγιστικά το προφίλ ταχυτήτων που συναντώνται στα 100 m υψόμετρο. Η πιθανότητα εμφάνισης κάποιων ταχυτήτων ανέμου, με χρήση καθενός από τους δύο νόμους, παρουσιάζεται στην [Εικόνα 3.9](#). Όπως είναι φανερό, οι δύο νόμοι έδωσαν πολύ παρόμοια αποτελέσματα στην κατανομή των ταχυτήτων.

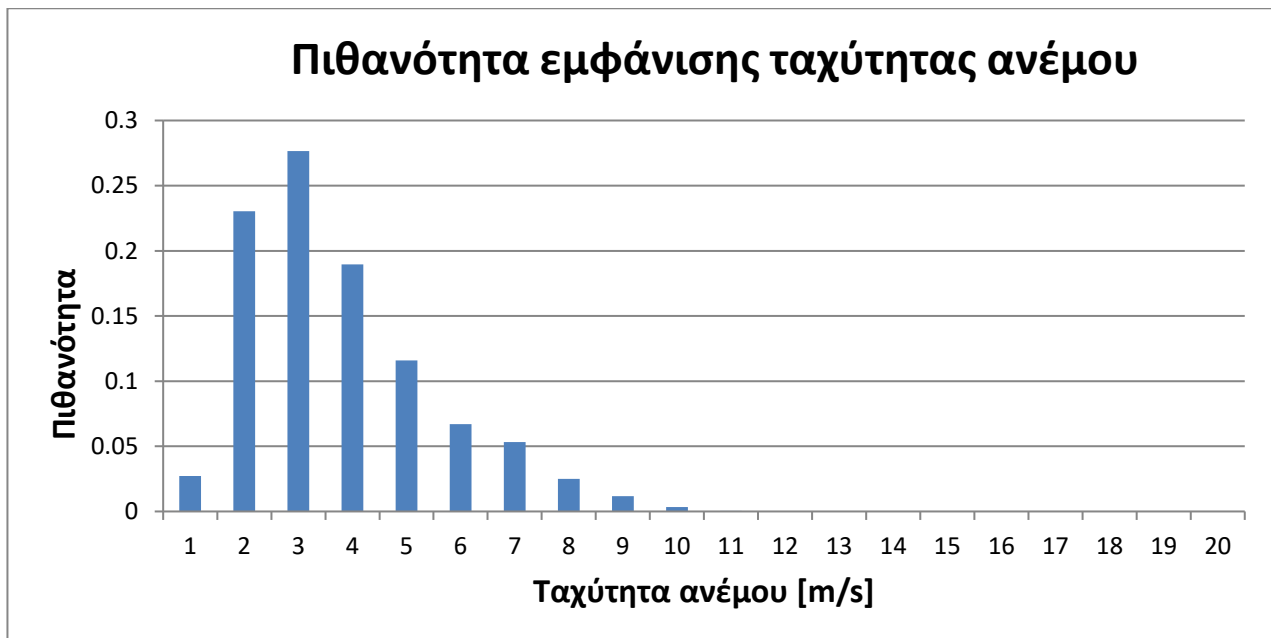


Εικόνα 3.9: Κατανομή ταχυτήτων στην Ιεράπετρα Κρήτης (προβλέψεις) [100 m].

Στη συνέχεια παρουσιάζονται σε διαγράμματα οι πιθανότητες εμφάνισης ταχύτητας ανέμου, για οκτώ διαφορετικές περιοχές τις Κρήτης. Οι πίνακες προκύπτουν από επεξεργασία ανεμολογικών δεδομένων πέντε ετών (2015 έως 2020), που συλλέγονται από μετεωρολογικούς σταθμούς και είναι προσβάσιμα στο κοιν [http://meteosearch.meteo.gr/]. Αφορούν δηλαδή σε μετρήσεις σε πολύ μικρό ύψος από την επιφάνεια του εδάφους. Οπότε μόνο ενδεικτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για άντληση σχετικής πληροφορίας. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας έγινε ανάλυση των αντίστοιχων ανεμολογικών δεδομένων (μεγάλου όγκου) και υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες κατανομές.

Λέντας

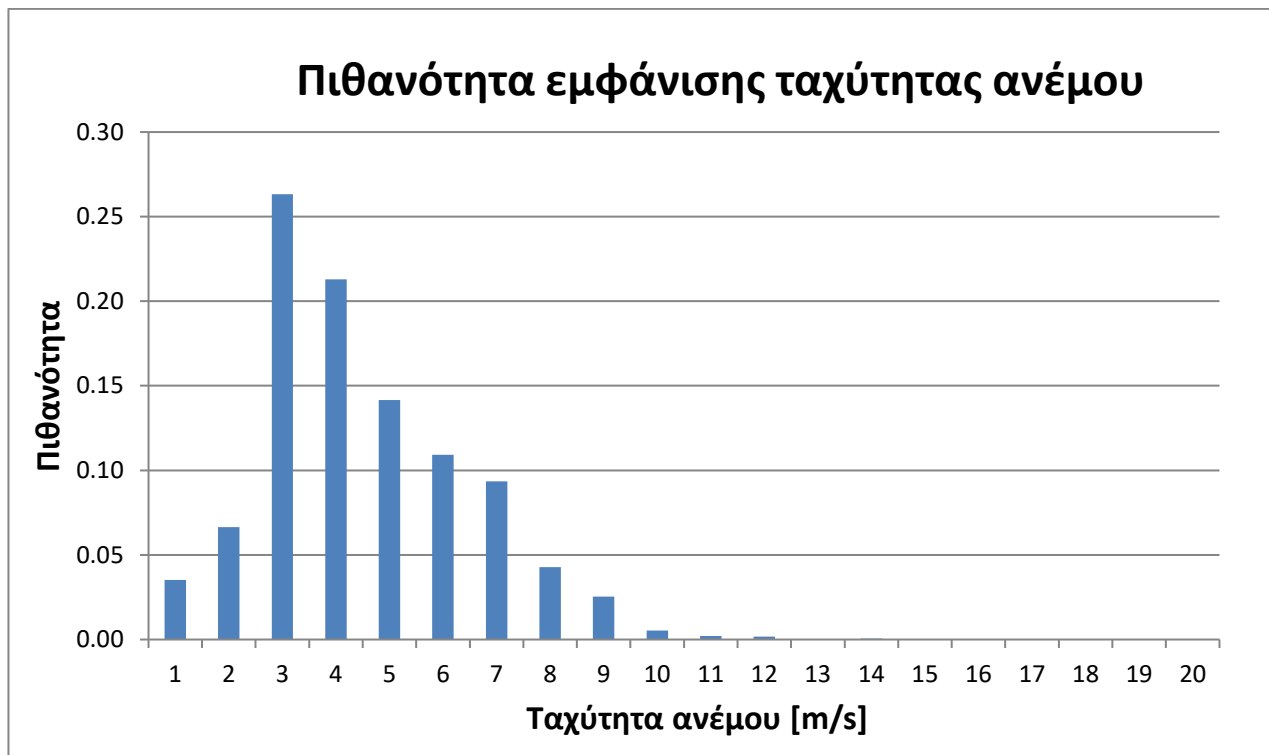
Πληροφορίες σταθμού: Υψόμετρο 15 m. Θέση: Εντός οικισμού. Βρίσκεται σε οροφή κτηρίου. Ύψος αισθητήρων θερμ./υγρ.: 2 m. Ύψος ανεμομέτρου: 2.5 m.
(Δεδομένα παρέχονται απο τον μήνα Δεκέμβριο του 2011 και μετα).



Ιεράπετρα

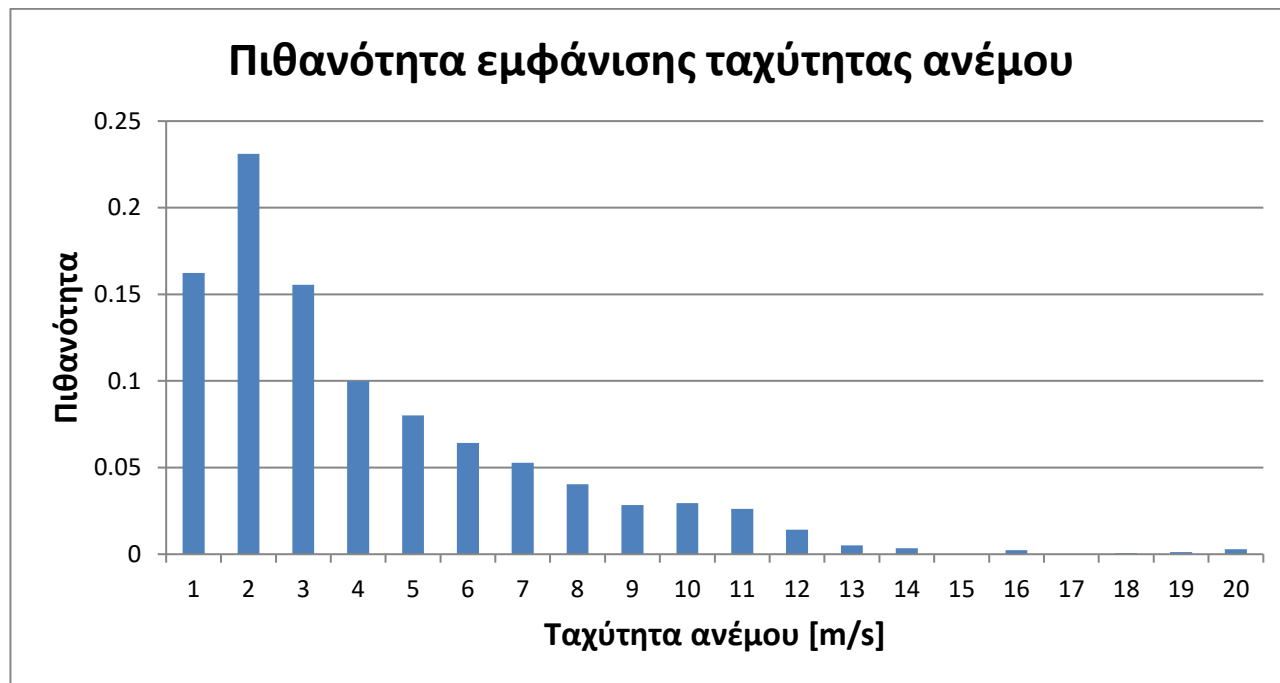
Πληροφορίες σταθμού: Υψόμετρο 5 m. Θέση: Κτήριο Μητρόπολης. Μέχρι τις 05/03/2015 βρισκόταν στο Τουριστικό Περίπτερο Ιεράπετρας. Βρίσκεται σε οροφή κτηρίου. Ύψος αισθητήρων θερμ./υγρ.: 2 m. Ύψος ανεμομέτρου: 2.5 m.

(Δεδομένα παρέχονται από τον μήνα Μάρτιο του 2008 και μετά).



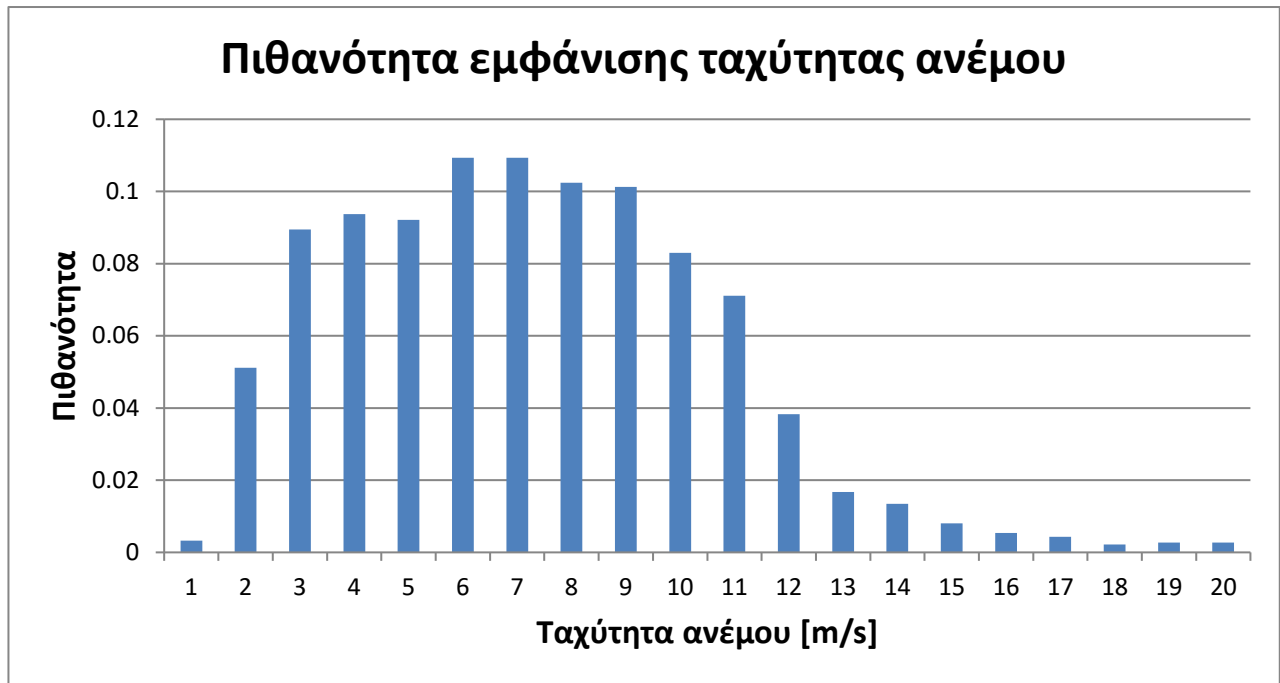
Πλακιάς

Πληροφορίες σταθμού: Υψόμετρο 5 m. Θέση: Εντός οικισμού-ΚΕΠ. Βρίσκεται σε ταράτσα. Ύψος αισθητήρων θερμ./υγρ.: 2 m. Ύψος ανεμομέτρου: 3 m. Μέχρι 20/03/2016 βρισκόταν στα Διαμερίσματα Μέδουσα (εντός οικισμού, σε ταράτσα, με ύψη αισθητήρων 2m/3m). (Δεδομένα παρέχονται από τον μήνα Αύγουστο του 2012 και μετά).



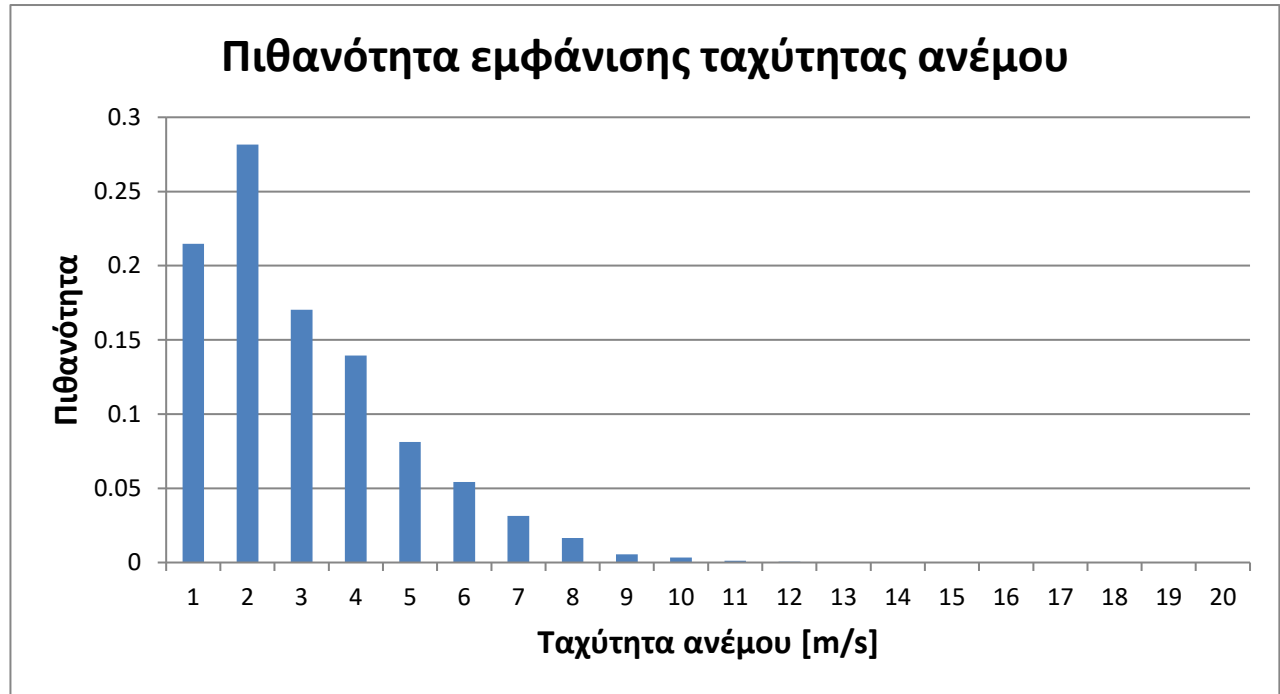
Φινοκαλιά

Πληροφορίες σταθμού: Υψόμετρο 250 m, Θέση : Χώρος Πανεπιστημίου Κρήτης. Βρίσκεται στο έδαφος. Ύψος αισθητήρων θερμ./υγρ.: 2 m. Ύψος ανεμομέτρου: 5 m.
(Δεδομένα παρέχονται απο τον μήνα Οκτώβριο του 2014 και μετά).



Ασχύφου

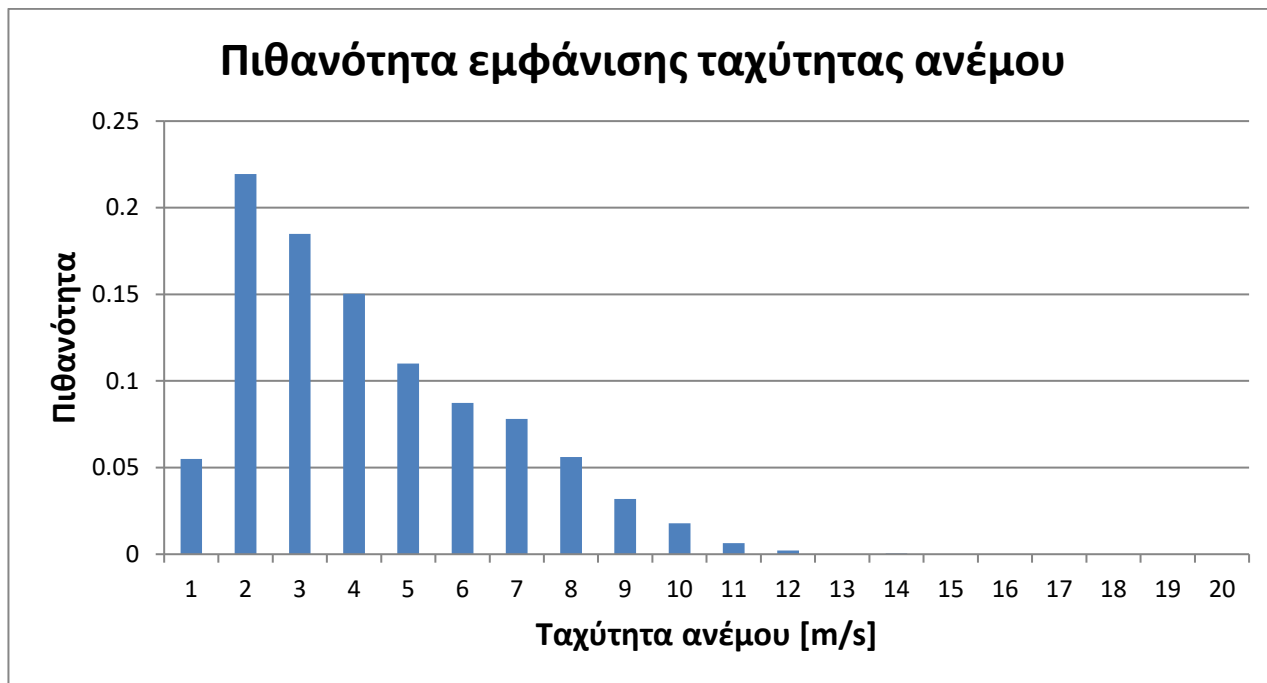
Πληροφορίες σταθμού: Υψόμετρο 715 m. Θέση: Κέντρο Επίπλου Σφακίων. Βρίσκεται σε οροφή κτηρίου. Ύψος αισθητήρων θερμ./υγρ.: 2 m. Ύψος ανεμομέτρου: 3 m.
(Δεδομένα παρέχονται απο τον μήνα Φεβρουάριο του 2014 και μετά).



Φουρφουράς

Πληροφορίες σταθμού: Υψόμετρο 471 m. Θέση : Εντός οικισμού. Βρίσκεται σε οροφή κτηρίου. Ύψος αισθητήρων θερμ./υγρ.: 2 m. Ύψος ανεμομέτρου: 2.5 m. Ο σταθμός διαθέτει αισθητήρες ηλιακής ακτινοβολίας.

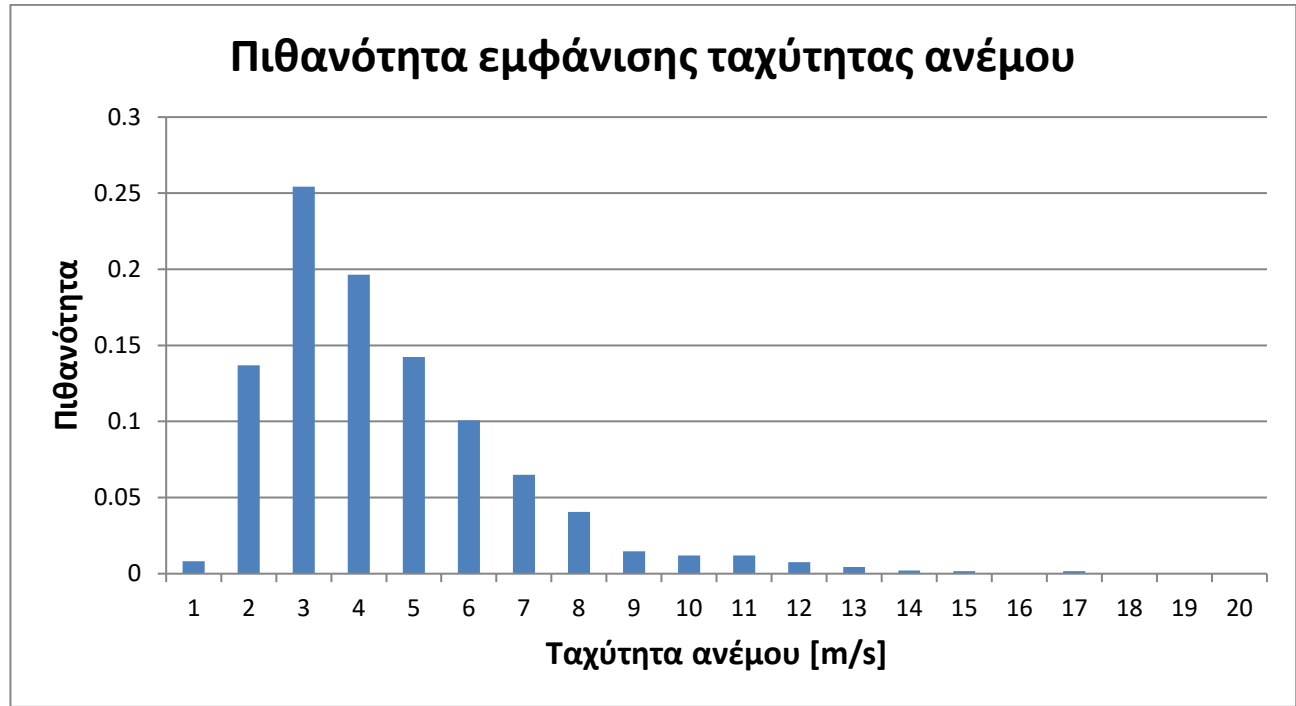
(Δεδομένα παρέχονται απο τον μήνα Φεβρουάριο του 2010 και μετά).



Λιμάνι Ηρακλείου

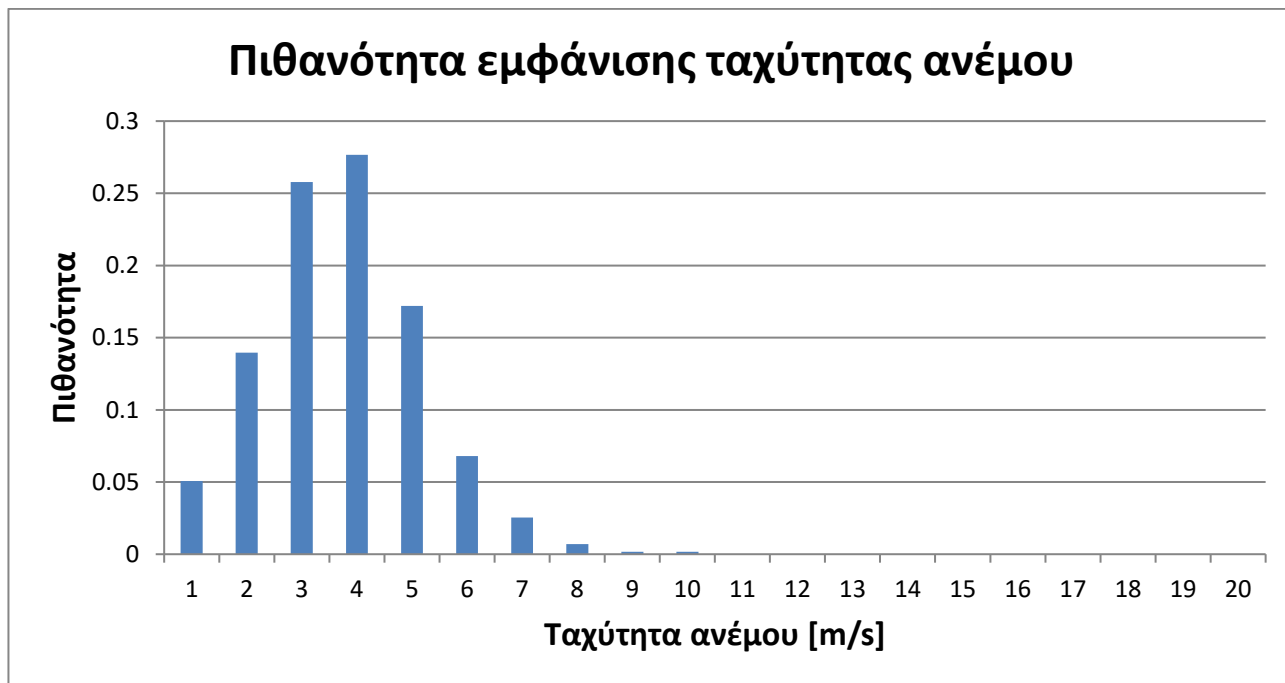
Πληροφορίες σταθμού: Υψόμετρο 10 m. Θέση : Παλαιό Λιμάνι ηρακλείου - Μουσείο Φυσικής Ιστορίας Κρήτης. Βρίσκεται σε οροφή κτηρίου. Ύψος αισθητήρων θερμ./υγρ.: 4 m. Ύψος ανεμομέτρου: 4 m. Μοντέλο: PRO2.

(Δεδομένα παρέχονται απο τον μήνα Μάιο του 2007 και μετά).



Παλαιόχωρα

Πληροφορίες σταθμού: Υψόμετρο 3 m, Θέση: Δημαρχείο Παλαιόχωρας. Βρίσκεται σε οροφή κτηρίου. Ύψος αισθητήρων θερμ./υγρ.: 2 m. Ύψος ανεμομέτρου: 2 m. Στις 25/08/2012 μεταφέρθηκε στην οροφή κοντινού κτηρίου, σε ίδιο υψόμετρο. Ύψος αισθητήρων θερμ./υγρ: 2 m. Ύψος ανεμομέτρου: 5 m. (Δεδομένα παρέχονται απο τον μήνα Οκτώβριο του 2006 και μετά).



Εικόνα 3.10: Χάρτης από εφαρμογή που απεικονίζει τοποθεσίες με εγκατεστημένες ανεμογεννήτριες στην Κρήτη
[Πηγή: geoportal.apdkritis.gov.gr].

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματοποιήθηκε κατ' αρχήν μία Βιβλιογραφική Έρευνα που αφορά στα είδη των χρησιμοποιούμενων ανεμογεννητριών και στους παράγοντες που επιδρούν στο διαθέσιμο αιολικό δυναμικό μιας γεωγραφικής περιοχής. Εξετάστηκαν στη συνέχεια θέματα που σχετίζονται με την ανάπτυξη και την τοποθέτηση ενός αιολικού πάρκου, καθώς και τη διαχείριση και αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μία έρευνα της υπάρχουσας αγοράς ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα και παρουσιάστηκαν τα κυριότερα μοντέλα (με τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους) για δύο από της κυρίαρχες παγκοσμίως Ευρωπαϊκές εταιρίες κατασκευής ανεμογεννητριών, την Vestas και την Siemens-Gamesa.

Επιπλέον, έγινε μία βιβλιογραφική έρευνα που αφορά στις βέλτιστες πρακτικές που πρέπει να ακολουθηθούν για την μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου και την επεξεργασία των ανεμολογικών δεδομένων για την αξιολόγηση ενός πιθανού αιολικού πάρκου. Η συγκεκριμένη έρευνα βασίστηκε κυρίως στα αποτελέσματα του Ερευνητικού Προγράμματος Wind Energy - The Facts (WindFacts), ενός Ευρωπαϊκού Ερευνητικού Προγράμματος που έλαβε χώρα μεταξύ 2007 και 2009 [<https://www.wind-energy-the-facts.org/>].

Επιπλέον, έγινε επεξεργασία διαθέσιμων ανεμολογικών δεδομένων από την περιοχή της Ιεράπετρας Κρήτης, όπου αξιολογήθηκε η δυνατότητα του εκθετικού και του λογαριθμικού νόμου να κάνουν ακριβή πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου σε μεγαλύτερα ύψη και να παρέχουν ακριβείς κατανομές ταχυτήτων. Και οι δύο νόμοι αποδείχθηκαν ότι παρέχουν παρόμοια αποτελέσματα, ειδικά όταν εφαρμόστηκαν για υπολογισμό κατανομών ταχυτήτων σε ύψος 100 m από την επιφάνεια του εδάφους.

Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν διαθέσιμα δεδομένα μετρήσεων από μετεωρολογικούς σταθμούς σε διάφορες τοποθεσίες ανά την Κρήτη, με βάση τις οποίες υπολογίστηκαν κατανομές ταχυτήτων ανέμου. Αν και οι συγκεκριμένες μετρήσεις αφορούν σε μικρή απόσταση από το έδαφος, ανέδειξαν με πολύ χαρακτηριστικό τρόπο την μεγάλη διαφοροποίηση των κατανομών μεταξύ των διαφορετικών θέσεων μέτρησης. Η διαφοροποίηση αυτή εξαρτάται και από τα ανεμολογικά δεδομένα της αντίστοιχης περιοχής, αλλά και από το σημείο τοποθέτησης του σταθμού μέτρησης (μέσα ή έξω από τον αστικό ιστό, πάνω σε κτήριο, κ.λπ.). Ακριβώς λόγω της αλληλεπίδρασης των μετρήσεων αυτών με γειτονικά εμπόδια, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι δεδομένες μετρήσεις για εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων περιοχών. Όμως αποτέλεσαν καλά παραδείγματα για την εξάσκηση στην επεξεργασία των αντίστοιχων μετρητικών δεδομένων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- C.L. Archer & M.Z. Jacobson (2003), "Spatial and temporal distributions of U.S. winds and wind power at 80 m derived from measurements", *Journal of Geophysical Research*, 108(D9), p. 4289. doi:10.1029/2002JD002076.
- P. Arya (1988), *Introduction to Micrometeorology*, Academic Press.
- G. Caralis, Y. Perivolaris, K. Rados, A. Zervos (2008), "On the effect of spatial dispersion of windpower plants on the wind energy capacity credit in Greece", *Environmental Research Letters*, 3, 015003.
- T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi (2001), *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, Ltd.
- A. Hemami (2012), *Wind Turbine Technology*, Cengage Learning Ed., ISBN-13: 978-1-4354-8646-1.
- A. Δαγκαλίδης (2011), Κλαδική Μελέτη 13, «Αιολικά Πάρκα», Τράπεζα Πειραιώς, Μονάδα Οικονομικής Ανάλυσης και Αγορών.
- A. Τσαβαρή (2018), *Διερεύνηση του αιολικού δυναμικού των Δωδεκανήσων για εφαρμογές Αιολικών Πάρκων*, Πτυχιακή Εργασία, ΠΑ.Δ.Α., Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών.
- Γ. Μπαγιάτης (2015), *Βελτιστοποίηση ανεμογεννητριών κάθετου άξονα τύπου H-Darrieus (H-Darrieus VAWT)*, Διπλωματική Εργασία, Α.Π.Θ., Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών.
- I. Mustakerov and D. Borissova (2011), "Wind Park Layout Design Using Combinatorial Optimization", Chapter 17, in I.H. Al-Bahadly (Ed.) *Wind Turbines*, IntechOpen Book Series.
- S. Recoskie, E. Lanteigne, W. Gueaieb (2017), "A High-Fidelity Energy Efficient Path Planner for Unmanned Airships", *Robotics*, 6, 28, 2017. doi: 10.3390/robotics6040028.
- Γ. Τερζάκης (2018), *Βέλτιστος Σχεδιασμός Συνιστωσών Ανεμογεννητριών*, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Μ. Μικέδης (2011) *Δυνατότητες Αύξησης της Απορρόφησης Αιολικής Παραγωγής στο Διασυνδεδεμένο Ηλεκτρικό Δίκτυο της Ελλάδας με ανάπτυξη μονάδων Αντλιοσταμείωσης*, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών.