



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΝΟΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ

Διπλωματική Εργασία

Λύτρα Ιφιγένεια

Επιβλέπων: Σταμούλης Γεώργιος

Βόλος 2021



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΕΝΟΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ

Διπλωματική Εργασία

Λύτρα Ιφιγένεια

Επιβλέπων: Σταμούλης Γεώργιος

Βόλος έτος

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων Σταμούλης Γεώργιος

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανι-
κών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος Βόκας Γεώργιος

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Δυτικής
Αττικής

Μέλος Ευμορφόπουλος Νέστορας

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανι-
κών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ημερομηνία έγκρισης: dd-mm-yyyy

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ ή ΣΧΟΛΙΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, στο τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών κατά το έτος 2021.

Η πραγματοποίηση και η ολοκλήρωση αυτής της πτυχιακής εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την υποστήριξη του καθηγητή μου, Κος Γεώργιος Σταμούλης στον οποίο εκφράζω τις ευχαριστίες και την ευγνωμοσύνη μου για όλη τη βοήθεια που μου προσέφερε και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε.

Επίσης οφείλω ένα βαθύ ευχαριστώ στον Κύριο Γεώργιο Βόκα για την βοήθεια του, τις συμβουλές του και την άριστη συνεργασία που είχαμε στα πλαίσια εκπόνησης αυτής εργασίας καθώς και τον πολύτιμο χρόνο που μου διέθεσε ώστε να μου παρέχει σημαντικές εξηγήσεις πάνω στο αντικείμενο αλλά και για την προθυμία του για βοήθεια.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω στην εταιρεία Nostira A.E. και ιδιαιτέρως την Κα Γεωργία Γλήνου και τον Κο Σπύρο Κορομάντζο για την καθοριστική βοήθεια τους τον χρόνο που μου αφιέρωσαν καθώς και για την παραχώρηση δεδομένων και την εκπαίδευση που μου παρείχαν για την πραγματοποίηση του πρακτικού μέρους της εργασίας.

Τέλος ευχαριστώ τους γονείς μου, οι οποίοι ανέκαθεν υπήρξαν στήριγμα ανεκτίμητης αξίας για εμένα.

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

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

Η Δηλούσα

α

Ημερομηνία

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την αιολική ενέργεια, τα πολλαπλά οφέλη της και τους τρόπους με τους οποίους αυτή αξιοποιείται τόσο στην Ελλάδα όσο και το εξωτερικό από το παρελθόν μέχρι σήμερα. Παρουσιάζεται ο όρος αιολικά πάρκα, διακρίνονται και αναλύονται οι κατηγορίες τους (χερσαία, παράκτια και υπεράκτια) καθώς και ο τρόπος λειτουργίας και συντήρησης τους. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στις γεννήτριες που αξιοποιούν την κινητική ενέργεια του ανέμου, τις ανεμογεννήτριες. Συγκεκριμένα αναφέρονται οι κατηγορίες τους, η βασική δομή τους, η αρχή λειτουργίας τους και η διάκριση τους ανάλογα με το μέγεθος τους. Αξιοσημείωτη είναι επίσης, η ανάλυση του αιολικού δυναμικού μίας περιοχής καθώς και η επιλογή της κατάλληλης θέσης για εγκατάσταση ανεμογεννητριών. Στη συνέχεια αναλύονται τα στάδια της ενεργειακής μελέτης που πραγματοποιούνται σε μία περιοχή δηλαδή ο τρόπος με τον οποίο γίνονται οι μετρήσεις, η αξιολόγηση και παρέκταση των δεδομένων και η εξαγωγή αποτελεσμάτων σχετικά με την αξιολόγηση της τοποθεσίας και την ενεργειακή απόδοση. Τέλος, αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο το λογισμικό windographer αναλύει και εξάγει αποτελέσματα των δεδομένων ανέμου (ταχύτητα , διεύθυνση στη θέση του ιστού κ.λπ.) και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση με τη χρήση του λογισμικού WasP για εξαγωγή ποιοτικών συμπερασμάτων και πλήρης τεχνική μελέτη υλοποίησης ενός πραγματικού αιολικού έργου με πραγματικά δεδομένα.

ABSTRACT

The present dissertation has as its object the wind energy, its multiple benefits and the ways in which it is utilized both in Greece and abroad from the past until today. The term wind farms is presented, their categories (terrestrial, coastal and offshore) are distinguished and analyzed as well as the way they operate and are maintained. Special emphasis is given to the generators that utilize the kinetic energy of the wind, the wind turbines. Specifically, their categories, their basic structure, their principle of operation and their distinction according to their size are mentioned. Also noteworthy is the analysis of the wind potential of an area as well as the selection of the appropriate location for the installation of wind turbines. Then the stages of the energy study which took place in an area are analyzed, the way that the measurements are made, the evaluation and extrapolation of the data and the extraction of results related to the evaluation of the site and the energy efficiency. Finally, the way in which the windographer software analyzes and extracts wind data results (speed, web address, etc.) is analyzed and then modeling was performed using WasP software to draw quality conclusions and complete technical study. implementation of a real wind project with real data.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ ή ΣΧΟΛΙΑ	vii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	xi
ABSTRACT.....	xii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	xiii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	5
ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	5
2.1 Εισαγωγή.....	5
2.2 Αιολική ενέργεια	6
2.3 Ιστορική αναδρομή	8
2.4 Πλεονεκτήματα αιολικής ενέργειας.....	10
2.5 Μειονεκτήματα της αιολικής ενέργειας.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	12
ΑΙΟΛΙΚΗ ΑΓΟΡΑ.....	12
3.1 Συμμετοχή της αιολικής ενέργειας στην ελληνική αγορά ενέργειας	12
3.1.1 Ρυθμιστική αρχή ενέργειας (ΡΑΕ)	16
3.2 Η στατιστική της αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη.....	19
3.3 Η στατιστική της αιολικής ενέργειας παγκοσμίως	23
3.4 Τεχνικές λύσεις με στόχο την ανάπτυξη της αιολικής αγοράς	26
3.4.1 Υβριδισμός.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	32
ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ	32
4.1 Χερσαία αιολικά πάρκα	32

4.2 Παράκτια αιολικά πάρκα	33
4.3 Υπεράκτια αιολικά πάρκα.....	34
4.4 Λειτουργία και συντήρηση αιολικών πάρκων	35
4.5 Διακοπή λειτουργίας αιολικού πάρκου	35
4.6 Εφαρμογές εντός και εκτός δικτύου.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	37
ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ.....	37
5.1 Αιολικό δυναμικό	37
5.1.1 Ανάλυση του αιολικού δυναμικού μια περιοχής.....	38
5.1.2 Κατανομή ταχύτητας του ανέμου (Κατανομή Weibull).....	39
5.2 MEASNET	41
5.3 Εισαγωγή Δεδομένων	42
5.4 Αξιολόγηση και παρέκταση των δεδομένων.....	45
5.5 Αποτελέσματα αξιολόγησης τοποθεσίας και ενεργειακής απόδοσης	49
5.5.1 Αποτελέσματα αξιολόγησης τοποθεσίας.....	49
5.5.2 Αξιολόγηση ενεργειακής απόδοσης	50
5.5.3 Είδη απωλειών.....	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	54
ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ.....	54
6.1 Ανεμογεννήτριες (Α/Γ)	54
6.2 Κατηγορίες ανεμογεννητριών	55
6.3 Βασική δομή ανεμογεννητριών	56
6.4 Αρχή λειτουργίας ανεμογεννήτριας.....	61
6.5 Θεμελίωση, τοποθέτηση και στήριξη ανεμογεννητριών.....	62
6.6 Επιλογή κατάλληλης περιοχής.....	62
6.7 Μέγεθος ανεμογεννητριών.....	64

6.7.1 Ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος.....	64
6.8 Χαρακτηριστικά μεγέθη για ανεμογεννήτριες.....	71
6.9 Ηλεκτρική μηχανή ανεμογεννήτριας	74
6.9.1 σύγχρονες γεννήτριες.....	76
6.9.2 Ασύγχρονες επαγωγικές γεννήτριες	77
6.10. Υλικά για ανεμογεννήτριες	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.....	83
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΛΙΒΑΔΑΚΙ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ WasP	83
7.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	83
7.3 Μετρήσεις ανέμου	86
7.3.1 ιστός KLA4002	86
7.4 Μακροπρόθεσμη ανάλυση	97
7.4.2 Μακροπρόθεσμη προσαρμογή.....	98
7.5 Προσομοίωσης ροής ανέμου	98
7.5.1 Ιεραρχία επιφάνειας εργασίας του WasP (Workspace hierarchy of WasP)	99
7.6 Δεδομένα πλέγματος σε χωρική προβολή (recourse grid)	104
7.7 Απόδοση ενέργειας.....	104
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	121
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	123

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ενέργεια είναι η ικανότητα ενός σώματος να παράγει έργο. Είναι η κινητήριος δύναμη στις ανθρώπινες δραστηριότητες, στην οικονομία και στην τεχνολογία. Ανάλογα με τον τρόπο που έχει αποκτηθεί μπορούμε να διαχωρίσουμε τις διάφορες μορφές ενέργειας (κινητική, χημική, ηλεκτρική, δυναμική, πυρηνική, ηλιακή, αιολική, κλπ.).

Οι πηγές ενέργειας χωρίζονται σε μη ανανεώσιμες και ανανεώσιμες. Οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προέρχονται από ορυκτά καύσιμα που διακρίνονται σε στερεά, υγρά και αέρια. Ωστόσο δύο σημαντικά προβλήματα συνδέονται με την κατανάλωση ενέργειας που είναι βασισμένοι σε συμβατικά καύσιμα. Πρώτον, οι επιβλαβείς επιπτώσεις που επιφέρουν στο περιβάλλον καθώς είναι γεγονός ότι με την εκπομπή ρυπογόνων ουσιών ο πλανήτης καταστρέφεται με ανησυχητικό ρυθμό και δεύτερον η επάρκεια και η διαθεσιμότητά τους.

Όσον αφορά τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι οι μορφές ενέργειας που προέρχονται από φυσικές διαδικασίες (νερό, άνεμος, ήλιος, γεωθερμία). Πρόκειται για μορφές ενέργειας καθόλου επιβλαβείς προς το περιβάλλον καθώς έχουν μηδενικά απόβλητα και δεν αποδεσμεύουν ρύπους. Με τον όρο ανανεώσιμες εννοείται ότι δεν πρόκειται να εξαντληθούν ποτέ. Οι ήπιες ή ανανεώσιμες πηγές ενεργείας διακρίνονται σε αιολική, ηλιακή, γεωθερμική, βιομάζα, ενέργεια από τη θάλασσα, υδραυλική και ωσμωτική ενέργεια.

Η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας γινόταν με αργούς ρυθμούς καθώς υπήρχαν αμφιβολίες και δυσπιστία από τις κυβερνήσεις αλλά και από επιχειρήσεις. Παρόλα αυτά, πλέον υπάρχει τεράστια πρόοδος σχετικά με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας διότι πολλές χώρες του κόσμου έχουν συνειδητοποιήσει την άμεση ανάγκη για καθαρή παραγωγή ενέργειας χωρίς εκπομπή ρύπων. Έτσι προσπαθούν να χρησιμοποιούν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όσο περισσότερο γίνεται αφού είναι γεγονός ότι παγκοσμίως υπάρχει τεράστια ενεργειακή ζήτηση.

Σε αυτήν την εργασία γίνεται εκτενής ανάλυση και κατανόηση της ενέργειας που προκαλείται από την εκμετάλλευση του ανέμου. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται αιολική, ανήκει στις ανανεώσιμες και χαρακτηρίζεται ήπια μορφή ενέργειας. Οι ταχύτητες του ανέμου διαφέρουν με το ανάγλυφο μίας περιοχής και ποικίλλουν ανάλογα με την εποχή τον μήνα και την ημέρα. Η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 4 μ/σ για να κριθεί μία περιοχή κατάλληλη για αξιοποίηση αιολικής ενέργειας.

Ο ήλιος εκπέμπει 174.423.000.000.000 κιλοβατώρες ενέργειας ανά ώρα στη γη. Η αιολική ενέργεια δημιουργείται εμμέσως από την ηλιακή ακτινοβολία αφού προκαλείται μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μία περιοχή στην άλλη (δημιουργία ανέμων) λόγω της ανομοιόμορφης θέρμανσης της επιφάνειας της γης. Μόνο 1-2% της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην γη μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια. Με βάση τη σημερινή τεχνολογία εκμετάλλευσης της κινητικής ενέργειας των ανέμων, η αιολική ενέργεια είναι τόση που θα μπορούσε θεωρητικά να καλύψει περισσότερο από δύο φορές τις ανάγκες της ανθρωπότητας σε ηλεκτρική ενέργεια.

Στην Ελλάδα η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού συμβάλλει στην συνεχή αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και ταυτοχρόνως, στην εξοικονόμηση συμβατικών καυσίμων. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω είναι ο περιορισμός της ρύπανσης του περιβάλλοντος από ρυπογόνες ουσίες και η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα.

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια εισαγωγή στην αιολική ενέργεια και στα οφέλη που παρουσιάζει. Ακολουθεί ιστορική αναδρομή της αιολικής ενέργειας και αναλύονται οι τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της .

Στο κεφάλαιο 3 αποτυπώνονται τα στατιστικά της αιολικής ενέργειας στην Ελληνική, Ευρωπαϊκή και παγκόσμια αγορά ενέργειας από το παρελθόν μέχρι και σήμερα Επιπλέον αναφέρονται τεχνικές λύσεις με στόχο την ανάπτυξη της αιολικής αγοράς. Ειδικότερα αναλύονται ο υβριδισμός και το υδρογόνο που θεωρείται ότι θα παίξουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην αποθήκευση της αιολικής ενέργειας στα επόμενα χρόνια.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αιολικά πάρκα ή σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ΑΣΠ ΗΕ). Διακρίνονται και αναλύονται οι εξής κατηγορίες : χερσαία αιολικά

πάρκα, παράκτια και υπεράκτια αιολικά πάρκα. Επίσης αναφέρεται τι συμβαίνει στα αιολικά πάρκα όταν αυτά φτάσουν στα πέρασ της ζωής τους (διακοπή λειτουργίας) καθώς και οι τρόποι χρησιμοποίησης ανεμογεννητριών σε εφαρμογές εντός και εκτός δικτύου.

Στο κεφάλαιο 5 αναλύονται τα στάδια που πραγματοποιούνται σε μία τοποθεσία σύμφωνα με το ινστιτούτο μετρήσεων MEASNET. Αρχικά πραγματοποιούνται μετρήσεις σε διάστημα ενός έτους και εξάγονται δεδομένα ανέμου (ταχύτητα, διεύθυνση κ.α.) από τους ιστούς μετρήσεις. Στην συνέχεια γίνεται αξιολόγηση και παρέκταση αυτών των δεδομένων έτσι ώστε να είναι ικανά να καλύπτουν μεγαλύτερες περιόδους (συνήθως 30 έτη). Με βάση τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει γίνεται αξιολόγηση της τοποθεσίας και της ενεργειακής απόδοσης (ακαθάριστη και καθαρή) και γίνεται αναφορά στους τύπους και στο ρόλο των απωλειών σε μια αιολική εγκατάσταση. Για την αξιολόγηση των παραπάνω έχουν αναπτυχθεί προγράμματα ικανά να δημιουργούν ανεμολογικούς χάρτες και να υπολογίζουν όλες τις απαραίτητες πληροφορίες και όλα τα δεδομένα τα οποία προαπαιτούνται έτσι ώστε να κριθεί μία περιοχή κατάλληλη για να εγκατασταθούν ανεμογεννήτριες.

Στο κεφάλαιο 6 αναλύονται οι αιολικές μηχανές που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Αυτές οι μηχανές ονομάζονται ανεμογεννήτριες. Στη συνέχεια γίνεται ο διαχωρισμός των ανεμογεννητριών σε κατακόρυφου και οριζόντιου άξονα ανάλογα αν περιστρέφονται πάνω σε κατακόρυφο ή οριζόντιο άξονα αντίστοιχα καθώς και ανάλυση της αρχής λειτουργίας τους. Αναλύονται τα μέρη από τα οποία αποτελείται μία ανεμογεννήτρια. Επίσης γίνεται διάκριση των ανεμογεννητριών σε μικρής, μέσης και μεγάλης ισχύος. Αναλύεται ο όρος αιολικό δυναμικό και αναφέρονται οι προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται ώστε να κριθεί μια περιοχή κατάλληλη για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών. Στη συνέχεια αναλύεται η ηλεκτρική μηχανή της ανεμογεννήτριας και διακρίνονται οι τύποι των μηχανών (σύγχρονες και ασύγχρονες). Τέλος παρατίθενται τα συνηθέστερα υλικά κατασκευής πύργου και πτερυγίων ανεμογεννητριών.

Στο κεφάλαιο 7 από το πρόγραμμα windographer χρησιμοποιούνται δεδομένα μετρήσεων των ιστών τα οποία το πρόγραμμα wasp χρησιμοποιεί για να γίνει ανάλυση του πεδίου ροής (μοντελοποίηση ροής), για να πραγματοποιηθούν ενεργειακοί υπολογισμοί και για να εξαχθούν αποτελέσματα και να γίνει πλήρης τεχνική μελέτη για

το αιολικό πάρκο Λιβαδάκι στη Φωκίδα. Γίνεται παρουσίαση και ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη χρήση των προγραμμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

2.1 Εισαγωγή

Για την αντιμετώπιση των κλιματικών αλλαγών είναι επιτακτική και αναγκαία η αύξηση της εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η χρήση του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει επεκταθεί γρήγορα τα τελευταία χρόνια λόγω των τεχνολογικών βελτιώσεων. Πάνω από 15.000 δισεκατομμύρια κιλοβατώρες παράγονται παγκόσμια ετησίως. Παρόλα αυτά μόνο ένα μικρό μέρος του του αιολικού πόρου αξιοποιείται. Η αιολική ενέργεια είναι καθαρή και ανανεώσιμη. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της δεν φέρει ως αποτέλεσμα οποιαδήποτε μορφή εκπομπών ρύπων ως προς το περιβάλλον. Με βάση υπολογισμούς που έχουν πραγματοποιηθεί στο 25% της συνολικής επιφάνειας της γης επικρατούν σε ύψος 10 μέτρων άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας άνω των 5,1 m/s. Το συγκεκριμένο ποσοστό επομένως αντιστοιχεί σε περιοχές που διαθέτουν εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό και οδηγούν και στο συμπέρασμα ότι έναντι άλλων μορφών ενέργειας η αιολική έχει μία δυναμική θέση.

Για την Ελλάδα η οποία διαθέτει εξαιρετικά πλούσιο αιολικό δυναμικό η ενέργεια του ανέμου μπορεί να αποτελέσει βασικό μοχλό ανάπτυξης. Η εκμετάλλευση αιολικής ενέργειας συμβάλει στη αύξηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, αφού οι ανάγκες για κατανάλωση της αυξάνονται ραγδαία και σε περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Ανασταλτικοί παράγοντες στην εγκατάσταση αιολικών πάρκων αποτελούν η χρονοβόρα αδειοδοτική διαδικασία, γραφειοκρατικών διαδικασιών καθώς και τυχόν δυσκολίες απορρόφησης ισχύος από το δίκτυο (προβλήματα διασύνδεσης). Απαραίτητες κρίνονται οι ενισχύσεις όσον αφορά τον κλάδο παραγωγής ηλεκτρισμού από αιολικά πάρκα με στόχο όπως προαναφέρθηκε τον περιορισμό των εκπομπών ρυπογόνων αερίων στο περιβάλλον.

Η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού πραγματοποιείται με μηχανές που ονομάζονται ανεμογεννήτριες.

2.2 Αιολική ενέργεια

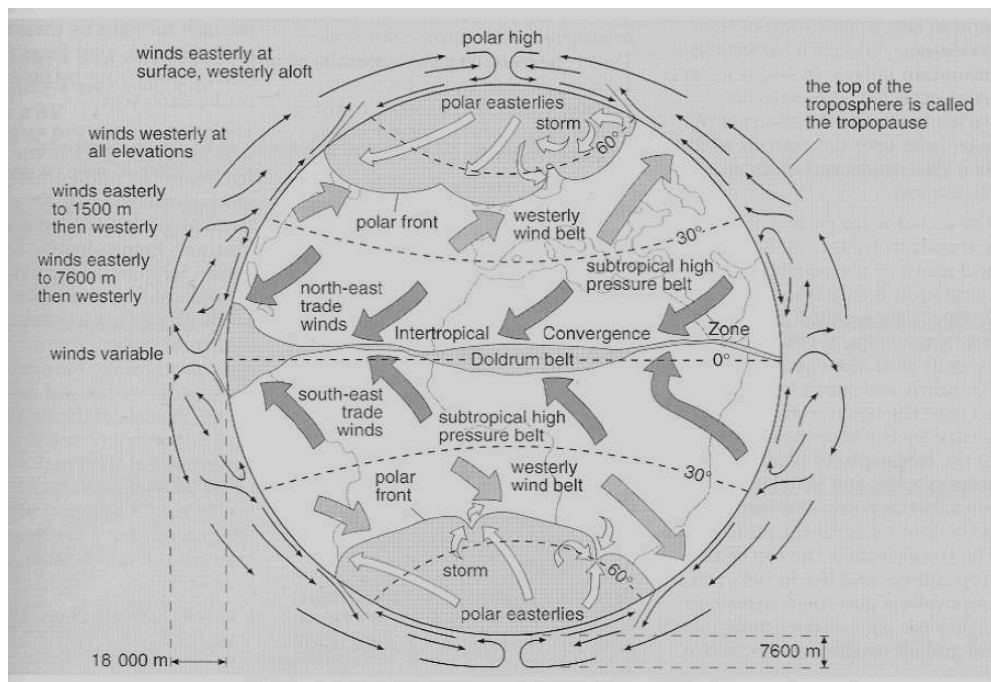
Η ενέργεια που προέρχεται από την μετακίνηση αέριων μαζών της ατμόσφαιρας ονομάζεται αιολική ενέργεια. Οι διαφορετικές τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης από περιοχή σε περιοχή, που οφείλονται στη διαφορετική θέρμανση του ήλιου σε κάθε περιοχή, προκαλούν την μετακίνηση μαζών αέρα. Η αιολική ενέργεια αξιοποιείται κυρίως σε περιοχές όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι αρκετά υψηλή. Ωστόσο ο άνεμος είναι μια ενέργεια που δεν ελέγχεται και μεταβάλλεται χρονικά σε όλες τις παραμέτρους. Επομένως απαιτείται η κατασκευή αποδοτικών και οικονομικών μηχανών.

Η ηλιακή ακτινοβολία καθώς και η περιστροφική κίνηση της γης είναι οι δύο αίτιες στις οποίες οφείλεται η ύπαρξη του ανέμου στην ατμόσφαιρα. Όπως προαναφέρθηκε, λόγω της ανομοιομόρφης θέρμανσης της επιφάνειας της γης προκαλούνται διαφορές στην ατμοσφαιρική πίεση. Η θερμοκρασία της ατμόσφαιρας κοντά στον ισημερινό είναι υψηλότερη (οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν κάθετα) από ότι στους πόλους(οι ακτίνες του ήλιου προσπίπτουν οριζόντια) ενώ χαμηλότερη στον ισημερινό και υψηλότερη στους πόλους είναι η ατμοσφαιρική πίεση. Τα λιγότερο ζεστά στρώματα αέρα στην επιφάνεια της γης κινούνται από τους πόλους προς τον ισημερινό ενώ τα ανερχόμενα ζεστά από τον ισημερινό προς τους πόλους.

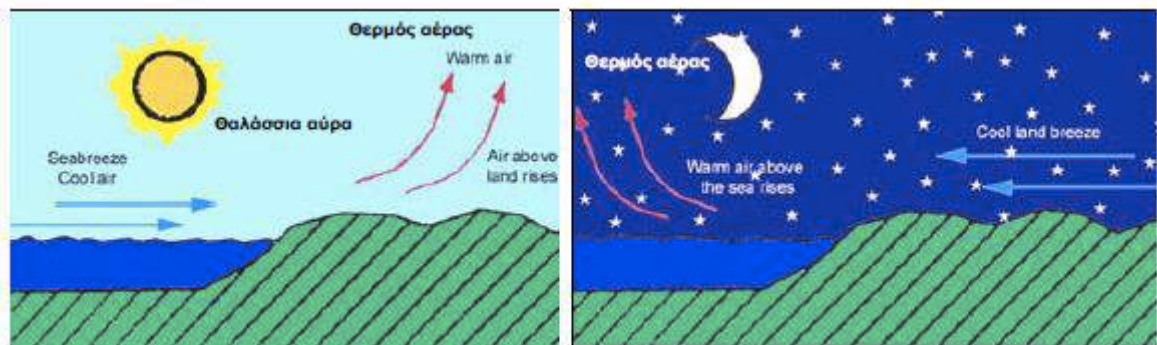
Λόγω της περιστροφικής κίνησης της γης, οι δυνάμεις αδράνειας μετατοπίζουν τις μάζες αέρα στην επιφάνεια της γης προς τα δυτικά ενώ τις πιο θερμές στα ανατολικά. Επομένως η ατμοσφαιρική κυκλοφορία αποτελεί συνδυασμό της περιστροφικής κίνησης της γης και της ηλιακής ακτινοβολίας.

Η κατεύθυνση του ανέμου, κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι από τη θάλασσα προς τη στεριά, ενώ κατά τη διάρκεια της νύκτας αντιστρέφεται. Αυτό οφείλεται στις διαφορετικές τιμές θερμοχωρητικότητας. Συγκεκριμένα η ξηρά έχει μικρότερη θερμοχωρητικότητα από ότι η θάλασσα.

Στην εικόνα 1.1 αποτυπώνεται σε απλοποιημένη μορφή η κυκλοφορία των ανέμων ενώ στην εικόνα 1.2 ο σχηματισμός ανέμων από τη θέρμανση και ψύξη της ξηράς και της θάλασσας κατά τη διάρκεια της ημέρας και της νύκτας.



Εικόνα1.1: Απλοποιημένη αναπαράσταση της κυκλοφορίας των ανέμων (Boyle, 1996)
(πηγή :αξιολόγηση παραμέτρων απόδοσης αιολικού πάρκου, Μακρίδης Ιωάννης,2013)



Εικόνα 1.2 : Σχηματισμός ανέμων από τυπική θέρμανση της ξηράς και της θάλασσας
(πηγή :αξιολόγηση παραμέτρων απόδοσης αιολικού πάρκου, Μακρίδης Ιωάννης,2013)

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας είναι ένα συνεχώς αναπτυσσόμενος τεχνολογικός κλάδος ο οποίος είναι άμεσα συνδεδεμένος και με άλλους τομείς επιστήμης (π.χ. μηχανολογία), με στόχο την καλύτερη απόδοση των ανεμογεννητριών, τη συντήρησή τους αλλά και την ανακύκλωση των υλικών που χρησιμοποιούνται μετά το πέρας της ζωής τους.

2.3 Ιστορική αναδρομή

Η χρήση των πηγών ενέργειας είναι άμεσα συνδεδεμένη με την εξελικτική πορεία του ανθρώπινου πολιτισμού αφού ο άνθρωπος από την αρχή της ιστορίας του επιδίωξε την κατανόηση και την επινόηση τρόπων εκμετάλλευσης των φυσικών πηγών ενέργειας.

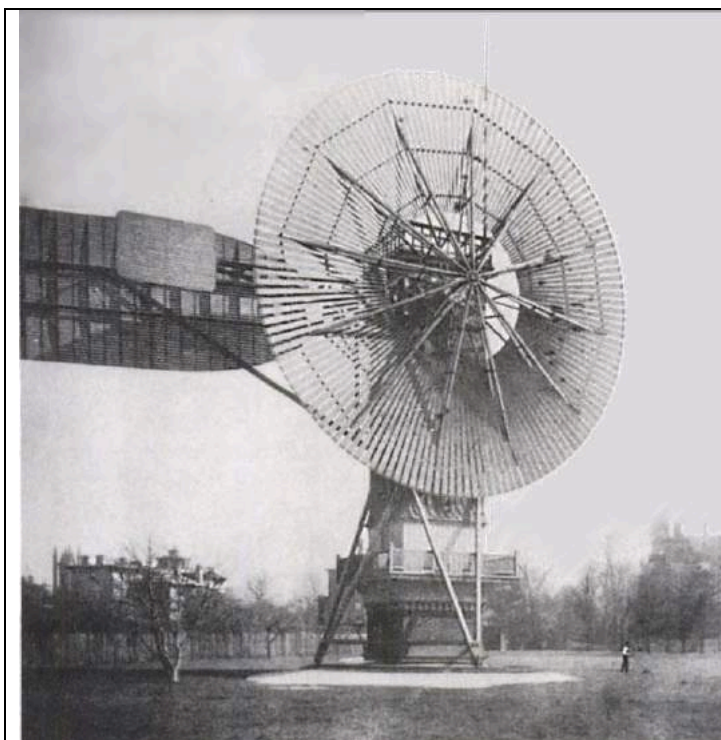
Η αιολική ενέργεια άρχισε να χρησιμοποιείται στη ναυσιπλοΐα περίπου 6.000 χρόνια πριν, η οποία οδήγησε στην ανάπτυξη του εμπορίου και των μετακινήσεων. Κατά τον Όμηρο ο εγκλωβισμός των ανέμων παρουσιάζει αυτή την ανάγκη διάθεσης των ανέμων. Τα πρώτα καταγεγραμμένα παραδείγματα αιολικής ενέργειας είναι ο τροχός του Έρβα της Αλεξάνδρειας, η πρώτη χρήση τροχού που κινείται από τον αέρα. (10 μ.Χ. – 70 μ.Χ.) αλλά τα πρώτα ανεμοκίνητα μηχανήματα (σταθμοί παραγωγής ηλεκτρισμού) κατασκευάστηκαν από τον 7^ο αιώνα στην Περσία (τώρα Ιράν Πακιστάν). Ειδικά οι πέρσες χρησιμοποιούσαν ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα. Τον 7^ο αιώνα μ.Χ. στην Κίνα και στη Μεσοποταμία κατασκευάζονται οι πρώτοι ανεμόμυλοι. Στόχος τους η διευκόλυνση της άντλησης νερού και του αλέσματος των δημητριακών. Στην Ελλάδα η χρήση ανεμόμυλων καθιερώθηκε τη Βυζαντινή περίοδο χρησιμοποιούνταν κυρίως στην ανατολική Κρήτη και παρέμεινε εκτεταμένη μέχρι τον 20^ο αιώνα.

Ο Codex του King Hammurabi (βασιλείς 1792 - 1750 π.Χ.) ανέφερε ήδη ανεμόμυλους για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας. Παράλληλα οι Ρωμαίοι τον 1^ο αιώνα π.Χ. χρησιμοποίησαν πρώτοι την δύναμη του νερού για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας.

Η ανακάλυψη των ατμοστρόβιλων κατά τη διάρκεια του 17^{ου} αιώνα άρχισε να αντικαθιστά τους ανεμόμυλων. Ωστόσο στο Σικάγο συνέχιζαν να κατασκευάζονται πολυτερούγιοι ανεμόμυλοι.

Το 1887 από τον καθηγητή James Blyth στη Δανία κατασκευάστηκε ο πρώτος ανεμόμυλος που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στον κήπο του εξοχικού σπιτιού του Blyth στο MarykirH τοποθετήθηκε η ύψους 10 μέτρων ανεμογεννήτρια και χρησιμοποιήθηκε για τη φόρτιση των συσσωρευτών που ανέπτυξε ο Γάλλος Camille Alphonse Faure με στόχο την τροφοδοσία του φωτισμού στο εξοχικό του. Το πρώτο σπίτι στον κόσμο που τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια από αιολική ενέργεια.

Το χειμώνα του 1887-1888, στο Κλίβελαντ του Οχάιο ο Charles Brush σχεδίασε και κατασκεύασε ένα μεγαλύτερο και βαρύτερο μηχάνημα το οποίο κατασκευάστηκε από την εταιρεία μηχανικής του και λειτούργησε από το 1886 έως το 1900. Ο πρώτος ανεμόμυλος Brush είχε διάμετρο πτερωτής 17 μέτρα και τοποθετήθηκε σε πύργο 18 μέτρων, ζύγιζε 3,6 τόνους και τροφοδοτήθηκε από γεννήτρια των 12 κιλοβάτ. Η Δανία ξεκίνησε πρώτη την ανάπτυξη ανεμόμυλων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Το 1940 στο Βέρμοντ των ΗΠΑ κατασκευάστηκε δοκιμαστικά μια ανεμογεννήτρια με δύο πτερύγια. Το 1991 κοντά στο Βίντεμπι της Δανίας κυκλοφόρησε το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο, μια εγκατάσταση των 5 μεγαβάτ. Μέχρι τον 20^ο αιώνα υπήρχαν μόνο 2.500 ανεμόμυλοι στη Δανία με ισχύ 30 μεγαβάτ. Μέχρι το 2002 είχαν τεθεί σε λειτουργία 10 υπεράκτια πάρκα παγκοσμίως με ισχύ παραγωγής 250 μεγαβάτ, τοποθετημένα στη βόρεια Ευρώπη.



Σχήμα1 : πρώτη ηλεκτρική
ανεμογεννήτρια *First Electric
Generated Wind Turbine* (πηγή
: WIND TURBINE DESIGN AND
ANALYSIS Yunus Emre ÖZTÜRK
Oğuz KILIÇ, Undergraduate
Thesis Mechanical Engineering
Department June, 2020)

Η παγκόσμια αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης που προκλήθηκε από την τεράστια τεχνολογική και βιομηχανική ανάπτυξη του 19^{ου} και 20^{ου} αιώνα καθώς και η εμφάνιση οικολογικών προβλημάτων, λόγω της υπερκατάναυσης συμβατικών καυσίμων, προκάλεσε ανασφάλεια σχετικά με την επάρκεια κοιτασμάτων των ορυκτών καυσίμων μελλοντικά.

Έτσι από τον 20^ο αιώνα οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν καθιερωθεί στην παγκόσμια ενεργειακή παραγωγή.

2.4 Πλεονεκτήματα αιολικής ενέργειας

Είναι ευρέως γνωστό ότι η αιολική ενέργεια προσφέρει δυνατότητες για ένα βιώσιμο (πράσινο) μέλλον ενώ υποκαθιστά την ανάγκη παραγωγής ορυκτών καυσίμων. Είναι μία καθαρή και μη ρυπογόνος πηγή καυσίμων αφού δεν εκπέμπει τοξικές ουσίες σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα. Επιπλέον είναι απεριόριστη και δωρεάν (όσο ο ήλιος λάμπει θα υπάρχει και ο άνεμος). Επίσης η αξιοποίηση της οδηγεί στην άμβλυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου, το οποίο σε μεγάλο βαθμό θεωρείται υπεύθυνο για την υπερβολική αύξηση της θερμοκρασίας, καθώς η συνεισφορά της στον περιορισμό των εκπομπών ρύπων είναι μεγάλη.

Είναι οικονομικά αποδοτική. Παρόλο που το κόστος εγκατάστασης είναι υψηλό, αν και τις τελευταίες δεκαετίες μειώθηκε σημαντικά, από τη στιγμή που ολοκληρωθεί η εγκατάσταση του αιολικού πάρκου το λειτουργικό κόστος μειώνεται σημαντικά. Απαραίτητη είναι μόνο η συντήρηση των ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου και των μετεωρολογικών ιστών για να πραγματοποιούνται μετεωρολογικές μετρήσεις. Εξίσου σημαντικό πλεονέκτημα της αιολικής ενέργειας είναι η ασφάλεια που παρέχει στις επενδύσεις αφού επιλέγοντας επένδυση σε ένα αιολικό έργο, η αβεβαιότητα σχετικά με τη τιμή πώλησης μετριάζεται.

Οι ανεμογεννήτριες δεν καταλαμβάνουν πολύ χώρο και είναι ικανές να μοιραστούν ακόμα και εκτάσεις με τομείς όπως η γεωργία και η κτηνοτροφία, γεγονός που καθιστά την αιολική ενέργεια αποδοτική ως προς το χώρο. Η εγκατάσταση ανεμογεννητριών σε μία περιοχή δεν εμποδίζει την παράλληλη καλλιέργεια της γης στο χώρο αυτό. Η αιολική ενέργεια ενισχύει την ενεργειακή ανεξαρτησία. Αυτή η ενεργειακή αυτονομία μειώνει τις ενεργειακές απώλειες που υπάρχουν στα μεγάλα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Οι σύγχρονες μηχανές πλέον, μέσω της εξέλιξης των υλικών κατασκευής, της εγκατάστασης αισθητήρων περιορισμού παράγουν ελάχιστο ήχο (για μία ανεμογεννήτρια 40 μέτρων περίπου 50 ντεσιμπέλ).

Η αιολική ενέργεια συνεισφέρει στην αναζωογόνηση κοινωνικά αλλά και οικονομικά υποβαθμισμένων περιοχών. Επιπλέον, η εκμετάλλευση αιολικής ενέργειας συμβάλλει στη

δημιουργία νέων θέσεων εργασίας, μείωση του λογαριασμού ρεύματος και τοπικά έργα ανάπτυξης και υποδομών. Δεν μειώνει με κανένα τρόπο την αξία της γης και δεν επιφέρει αρνητικά αποτελέσματα στον τουρισμό. Τέλος, είναι προφανές ότι οι ανεμογεννήτριες δε βλάπτουν αισθητικά το περιβάλλον.

2.5 Μειονεκτήματα της αιολικής ενέργειας

Ωστόσο εκτός από τον μεγάλο αριθμό πλεονεκτημάτων η αιολική ενέργεια όπως και κάθε τρόπος παραγωγής ενέργειας δεν στερείται μειονεκτημάτων. Ένα σημαντικό μειονέκτημα της αιολικής ενέργειας είναι ότι για την απόσβεση του κόστους κατασκευής του αιολικού πάρκου (ανεμογεννήτριες, δίκτυο αγωγών) απαιτείται μεγάλο διάστημα λειτουργίας. Επίσης η ροή του ανέμου είναι ανεξέλεγκτη και απρόβλεπτη επομένως η παραγωγή ενέργειας φέρει αβεβαιότητα. Παρόλα αυτά αναπτύσσονται συνεχώς διατάξεις αποθήκευσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ. μπαταρίες).

Επιπλέον, σπανίως, παρατηρούνται ατυχήματα από βλάβη ή πτώση κάποιου πτερύγιου, ή εκτόξευση πάγου που συσσωρεύεται στους βραχίονες. Ωστόσο τεχνικές (π.χ. αισθητήρες παρακολούθησης) με τρόπο την αποτροπή τέτοιου είδους ατυχημάτων αναπτύσσονται συνεχώς.

Επιπλέον, η εγκατάσταση αιολικών πάρκων όπως κάθε παρέμβαση στο περιβάλλον επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις στη πανίδα της εκάστοτε περιοχής. Συγκεκριμένα, μεγάλο πλήθος πουλιών και νυχτερίδων χάνουν τη ζωή τους από τη περιστροφική κίνηση των πτερυγίων των ανεμογεννητριών. Αξίζει να αναφερθεί, όμως ότι ο αριθμός των πουλιών που χάνουν τη ζωή τους από τα αποτελέσματα που επιφέρουν τα ορυκτά καύσιμα είναι κατά πολύ μεγαλύτερος.

Συχνά επισημαίνεται η περίπτωση του θορύβου των ανεμογεννητριών και οι επιπτώσεις του. Ο θόρυβος που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες είναι δύο ειδών, ο θόρυβος που κάνουν τα πτερύγια κατά την περιστροφή τους και ένα βόμβο λόγω της γεννήτριας. Ωστόσο, η στάθμη του θορύβου είναι σε μέγεθος ανθρώπινης συζήτησης και η επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι μηδενική.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

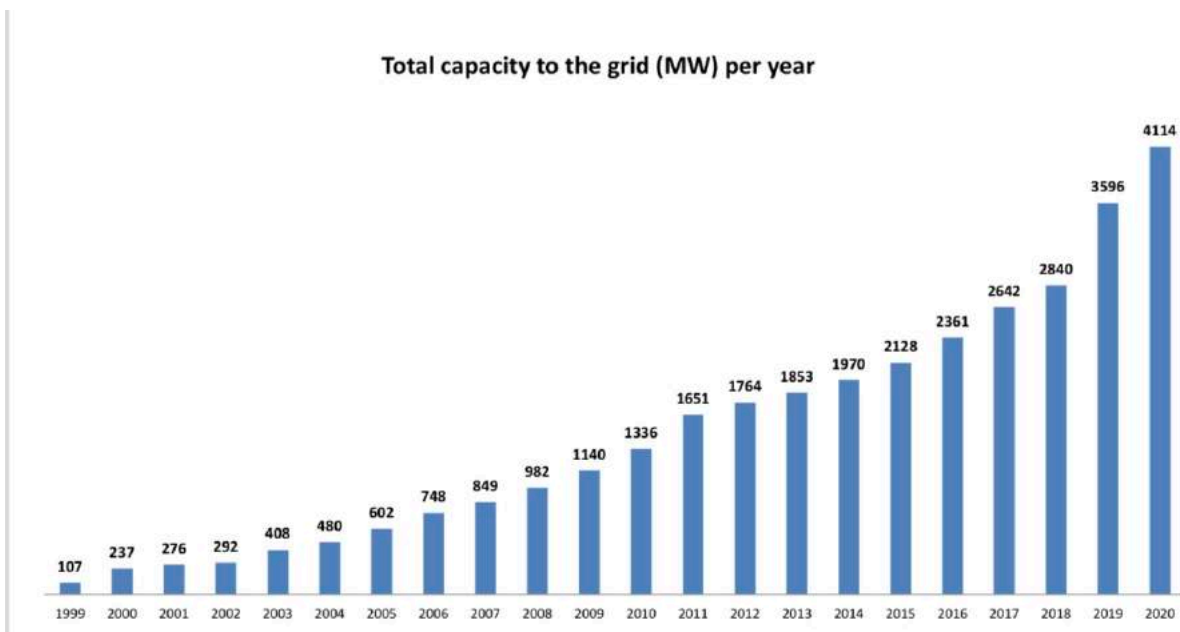
ΑΙΟΛΙΚΗ ΑΓΟΡΑ

3.1 Συμμετοχή της αιολικής ενέργειας στην ελληνική αγορά ενέργειας

Λόγω του πλήθους των νησιών και ακτών και επομένως λόγω των υψηλών σε ταχύτητα ανέμων που συναντώνται, η Ελλάδα είναι μία χώρα ευνοημένη ως προς την εκμετάλλευση αιολικής ενέργειας. Οι πιο ευνοημένες για την εκμετάλλευση αιολικού δυναμικού περιοχές στην Ελλάδα είναι κυρίως στα νησιά του Αιγαίου (στα κεντρικά νησιά μέση ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη από 7-12m/s) και Ιονίου πελάγους καθώς και στη Κρήτη και Πελοπόννησο. Όμως η ανεπάρκεια διασύνδεσης με το εθνικό δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί τροχοπέδη.

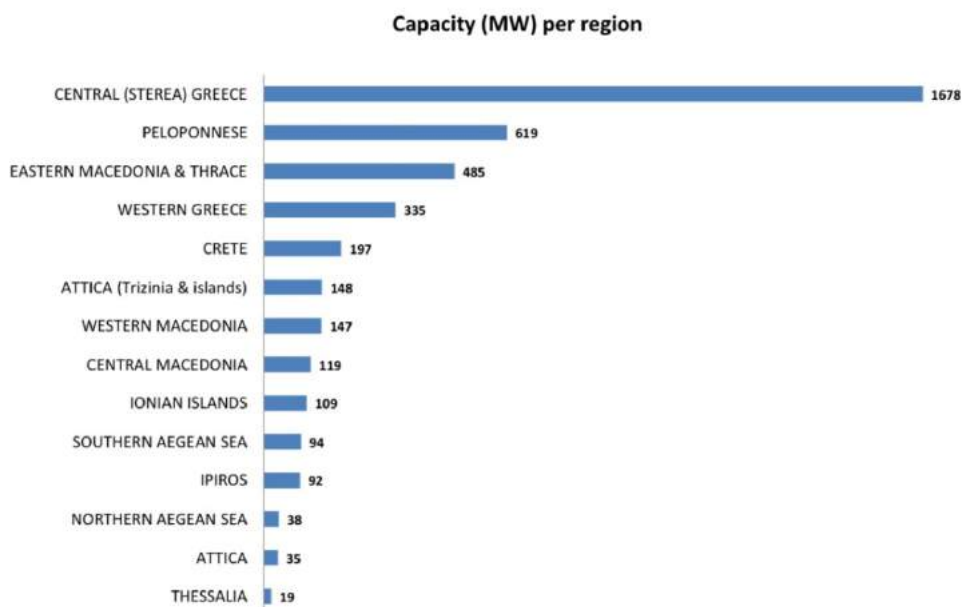
Το 1982, εγκαταστάθηκε στην Κύθνο το πρώτο αιολικό πάρκο στην Ελλάδα όπου έχουν τοποθετηθεί πέντε ανεμογεννήτριες των 20 κιλοβάτ, οι οποίες, λειτουργούν σε συνδυασμό με 100 κιλοβάτ από φωτοβολταικά. Μέχρι το 2008 οι ετήσιες εγκαταστάσεις ήταν μικρότερες των 120 μεγαβάτ και η εγκατεστημένη ισχύς ήταν 890 μεγαβάτ, στοιχεία που τοποθέτησαν την Ελλάδα στη δέκατη θέση σε Ευρωπαϊκό επίπεδο. Το 2019 ήταν ένα έτος ρεκόρ για την Ελλάδα αφού στο τέλος βρίσκονταν σε λειτουργία 3.576,5 μεγαβάτ (συνδέθηκαν στο δίκτυο νέα 727,5 μεγαβάτ). Εντός του 2019 τα νέα αιολικά πάρκα που τέθηκαν σε λειτουργία ήταν περίπου τετραπλάσια σε σχέση με το μέσο όρο της προηγούμενης δεκαετίας, ανά έτος. Το 2020 ακολουθεί ως το δεύτερο καλύτερο έτος. Κατά το 2020, η αιολική ισχύς έφτασε τα 4.114 μεγαβάτ καθώς μέσα στο έτος τέθηκαν σε λειτουργία 200 ανεμογεννήτριες ισχύος 517.5 μεγαβάτ (συνολικά) .

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στην Ελλάδα σε Μεγαβάτ από το 1999 μέχρι το 2020 και στο σχήμα 3.2 και 3.3 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανά περιφέρεια της Ελλάδος.

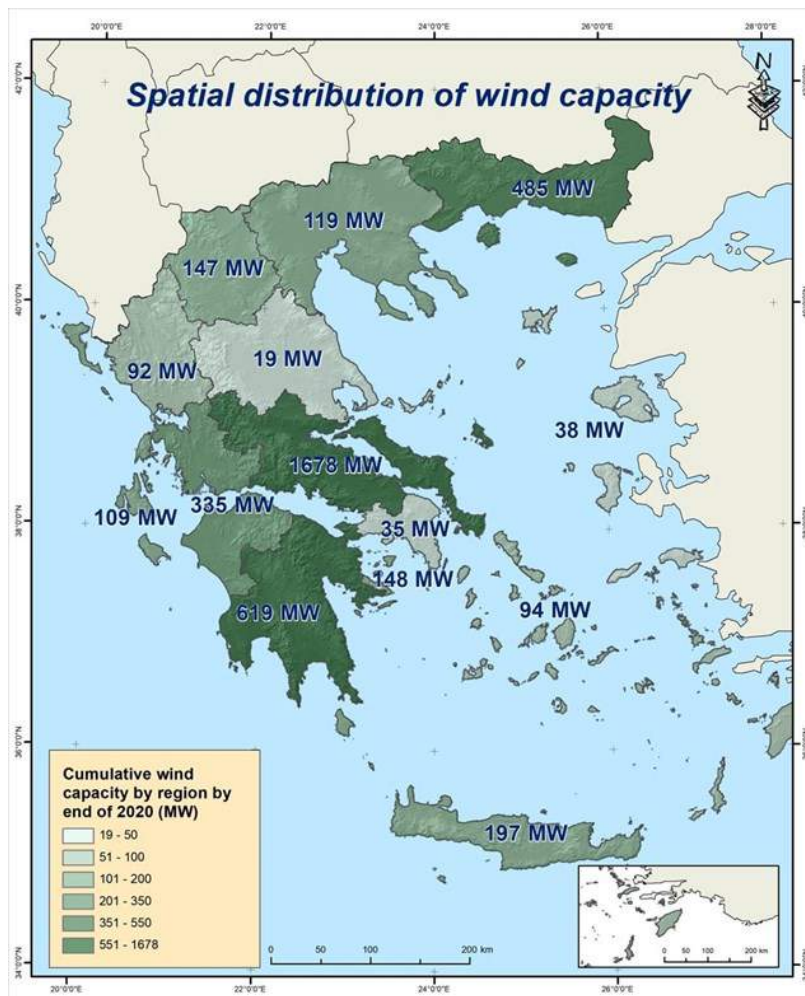


Σχήμα 3.1 : Συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανά χρόνο (πηγή : www.eletaen.gr).

Στη Στερεά Ελλάδα είναι εγκατεστημένο το 41% των ισχύος της χώρας που ανέρχεται στα 1678 μεγαβάτ, ακολουθεί η Πελοπόννησος όπου είναι εγκατεστημένο το 15% της ισχύος (619 μεγαβάτ) και στην συνέχεια η ανατολική Μακεδονία και Θράκη με εγκατεστημένα 485 μεγαβάτ. Στο παρακάτω ιστόγραμμα παρουσιάζονται το μέγεθος των εγκατεστημένων μεγαβάτ στην Ελλάδα ανά περιφέρεια .



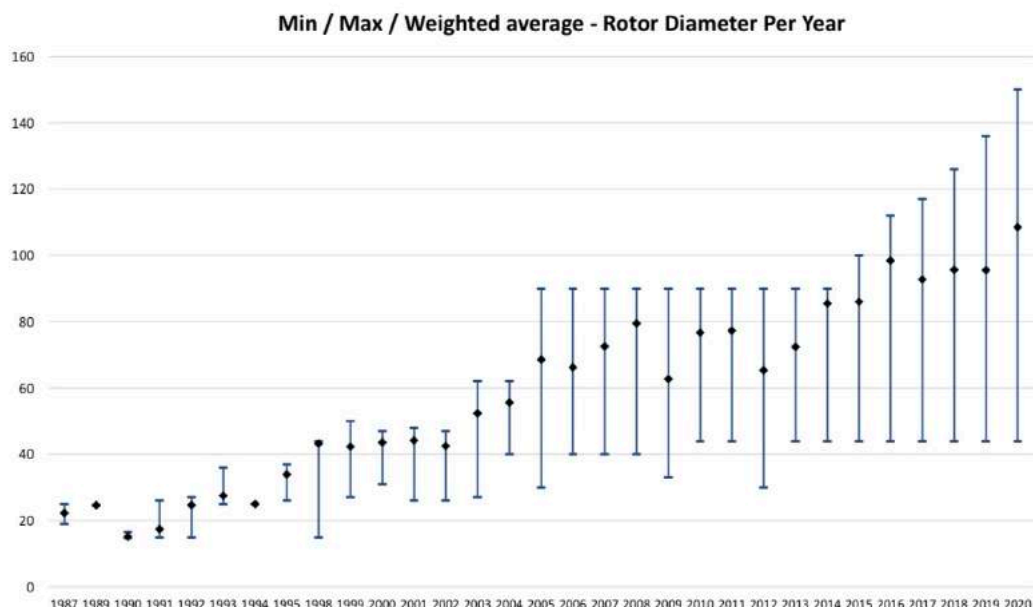
Σχήμα 3.2 : Συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανά περιφέρεια (πηγή : www.eletaen.gr)



Εικόνα 3.1 : Συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανά περιφέρεια (πηγή : www.eletaen.gr)

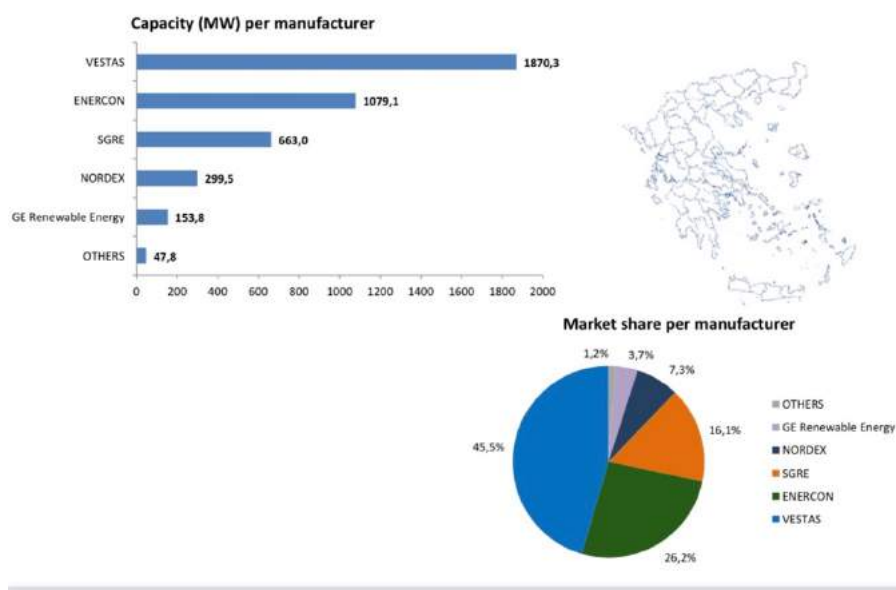
Όσον αφορά τη διάμετρο των περυγίων του ρότορα, το 1987 κυμαίνονταν από 20-25 μέτρα ενώ το 2020 η διάμετρος των περυγίων του ρότορα κυμαίνονταν από 40 μέχρι και 150 μέτρα. Ορόσημο για το 2020 αποτέλεσε λοιπόν και η εγκατάσταση των πιο μεγάλων περυγίων που έχουν εγκατασταθεί στην Ελλάδα, 4 ανεμογεννήτριες Vestas V-150/4.0MW στη Βοιωτία.

Στο παρακάτω σχήμα παρατηρείται η μέση αύξηση των περυγίων του ρότορα των ανεμογεννητριών κάθε χρόνο από το 1987 μέχρι το 2020.



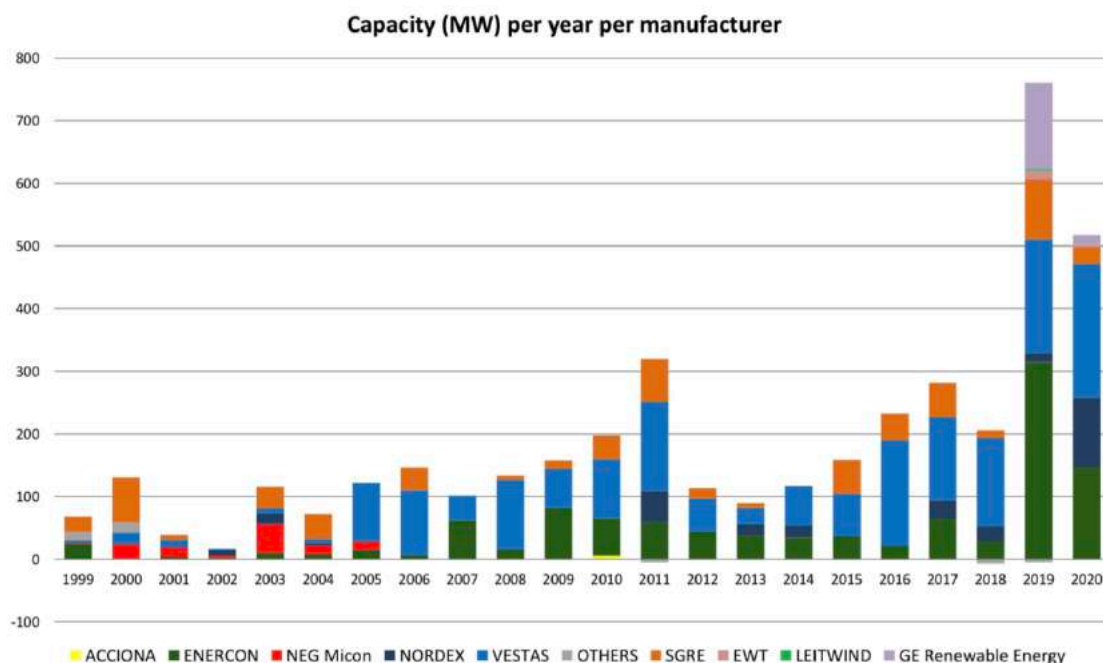
Σχήμα 3.3 : Ελάχιστη, μέγιστη και μέση διάμετρος ρότορα ανά χρόνο. (πηγή : www.eletaen.gr)

Όσον αφορά τους κατασκευαστές ανεμογεννητριών που επιλέγονται στην Ελλάδα, η Vestas έχει προμηθεύσει το 45,5% (1870,3 μεγαβάτ) της αιολικής ισχύος που αποδίδεται στο δίκτυο, η Enercon το 26.2% (1079,1 μεγαβάτ) και η Siemens Gamesa το 16,1% (663 μεγαβάτ). Ακολουθούν η Nordex και η GE renewable energy. (σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.4 : Ισχύς ανά κατασκευαστή (πηγή : www.eletaen.gr)

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται από 1999 μέχρι το 2020 το ποσοστό εγκαταστημένης ισχύς ανά κατασκευαστή. Το 1999 επικρατέστερες ήταν η Siemens Gamesa και Enecron ενώ από το 2019 μεγάλο μέρος της εγκατεστημένης ισχύς, εκτός από την Enecron ανήκει στη Vestas, στην Siemens Gamesa και στην GE Renewable Energy.



Σχήμα 3.5: Εγκατεστημένη ισχύς ανά κατασκευαστή ανά χρόνο (πηγή : www.eletaen.gr)

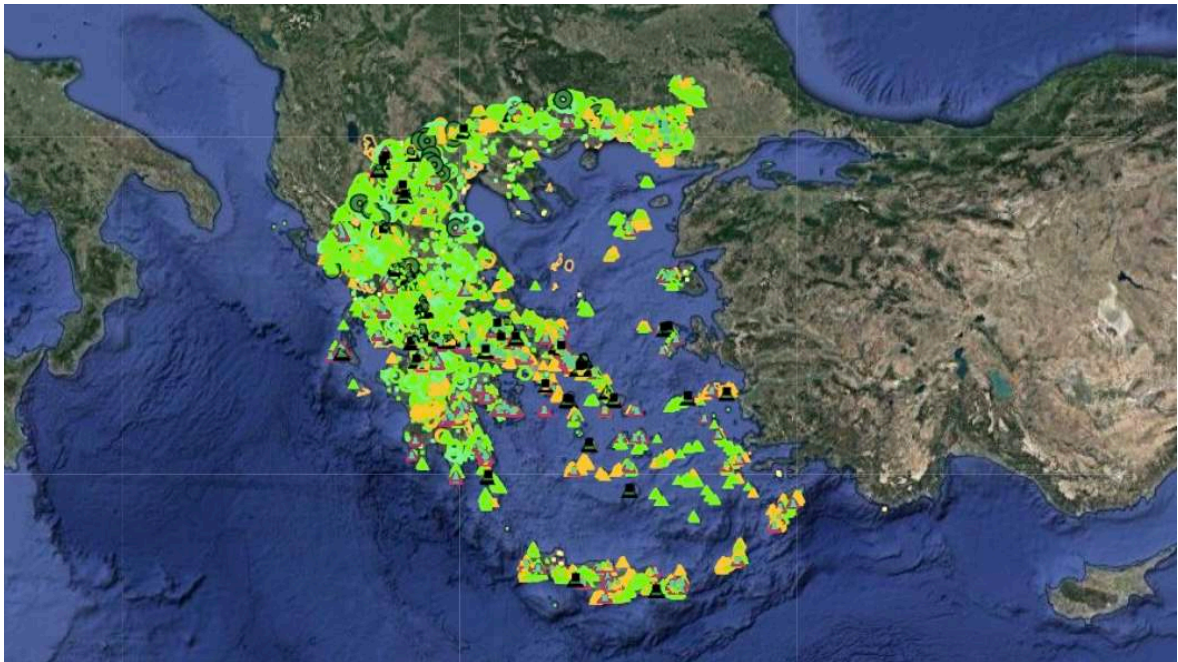
3.1.1 Ρυθμιστική αρχή ενέργειας (ΡΑΕ)

Η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) είναι ανεξάρτητη ρυθμιστική αρχή. Συστήθηκε με το [ν.2773/1999](#), στο πλαίσιο εναρμόνισης με τις οδηγίες [2003/54/EK](#) και [2003/55/EK](#) για τον ηλεκτρισμό και το φυσικό αέριο. Κύρια αρμοδιότητά της είναι η παρακολούθηση της εγχώριας αγοράς ενέργειας (βαθμό και αποτελεσματικότητα) σε όλους τους τομείς της και η λήψη μέτρων για την πραγματοποίηση του στόχου της απελευθέρωσης των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου.

Η Ρυθμιστική αρχή ενέργειας χορηγεί άδειες παραγωγής, τροποποίησης και ανάκλησης, παρακολουθεί την αγορά ενέργειας και την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού της Ελλάδος, λαμβάνει ρυθμιστικά μέτρα για την σωστή λειτουργία των ενεργειακών αγορών και άλλα.

Η Ρυθμιστική αρχή ενέργειας στην ιστοσελίδα της παρέχει πρόσβαση στα σύνολα γεωχωρικών δεδομένων που διαθέτει. Προσφέρει υπηρεσία απεικόνισης, υπηρεσία τηλεφόρτωσης και υπηρεσία εξεύρεσης. Παρέχει γεωπληροφοριακό χάρτη στον οποίο αναγράφονται όλα τα έργα σχετικά με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που είναι σε αξιολόγηση, σε άδεια λειτουργίας, σε άδεια παραγωγής, σε άδεια εγκατάστασης καθώς και τις μονάδες αποθήκευσης και τις προστατευόμενες περιοχές.

Παρακάτω αποτυπώνεται ο γεωπληροφοριακός χάρτης της ΡΑΕ για όλα τα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ελλάδα.

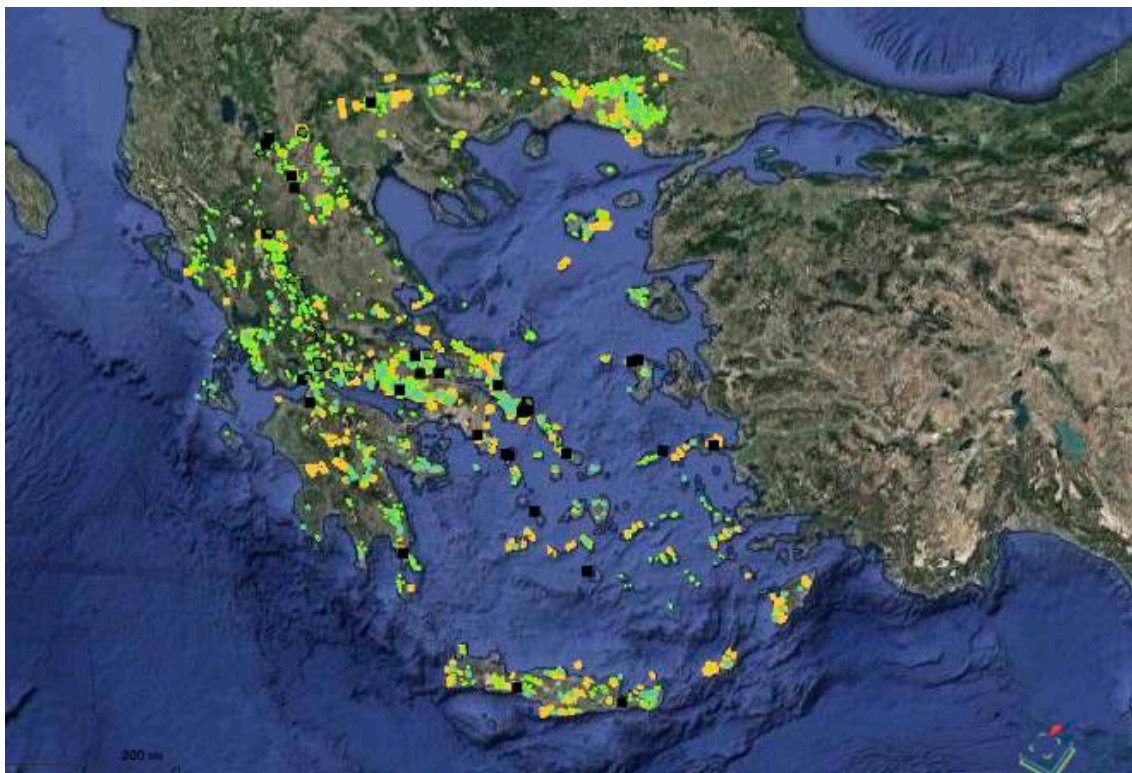


Εικόνα 3.2 : Γεωπληροφοριακός χάρτης ΡΑΕ (πηγή : www.rae.gr)

Θεματικό Επίπεδο	Σταθμοί Βιομάζας – Άδεια Εγκατάστασης
Υπόμνημα	Σταθμοί Βιομάζας – Άδεια Λειτουργίας
Αιολικοί Σταθμοί - Άδεια Εγκατάστασης	Σταθμοί Βιομάζας – Άδεια Παραγωγής
Αιολικοί Σταθμοί - Άδεια Λειτουργίας	Σταθμοί Βιομάζας - Σε Αξιολόγηση
Αιολικοί Σταθμοί - Άδεια Παραγωγής	Υβριδικοί Σταθμοί - Άδεια Παραγωγής
Αιολικοί Σταθμοί - Σε Αξιολόγηση	Υβριδικοί Σταθμοί - Σε Αξιολόγηση
Α/Γ Αιολ. και Υβριδ. Σταθμών - Άδεια Εγκατάστασης	Φ/Β Σταθμοί - Άδεια Εγκατάστασης
Α/Γ Αιολ. και Υβρ. Σταθμών - Άδεια Λειτουργίας	Φ/Β Σταθμοί - Άδεια Λειτουργίας
Α/Γ Αιολ. και Υβριδ. Σταθμών - Άδεια Παραγωγής	Φ/Β Σταθμοί - Άδεια Παραγωγής
Α/Γ Αιολ. και Υβριδ. Σταθμών - Σε Αξιολόγηση	Φ/Β Σταθμοί - Σε Αξιολόγηση
Γεωθερμικοί Σταθμοί - Σε Αξιολόγηση	Φ/Β Σταθμοί (Απόφ. Εξ.) - Σε Αξιολόγηση
Ηλιοθερμικοί Σταθμοί - Άδεια Εγκατάστασης	ΣΗΘΥΑ - Άδεια Παραγωγής
Ηλιοθερμικοί Σταθμοί - Άδεια Παραγωγής	ΣΗΘΥΑ - Αίτηση σε Αξιολόγηση
Ηλιοθερμικοί Σταθμοί - Σε Αξιολόγηση	Μονάδες Αποθήκευσης
Υ/Η Σταθμοί (Ομάδ.) - Άδεια Εγκατάστασης	Προστατευόμενες Περιοχές
Υ/Η Σταθμοί (Ομάδ.) - Άδεια Λειτουργίας	
Υ/Η Σταθμοί (Ομάδ.) - Άδεια Παραγωγής	
Google Γεωκωδικοποίηση	
Επιλεγμένα	
Γενικές Ρυθμίσεις	

Εικόνα 3.3 , 3.4: Θεματικά επίπεδα του Γεωπληροφοριακού χάρτη ΡΑΕ (πηγή : www.rae.gr)

Παρακάτω αποτυπώνεται ο γεωπληροφοριακός χάρτης της ΡΑΕ για όλες τα αιολικά έργα στην Ελλάδα.



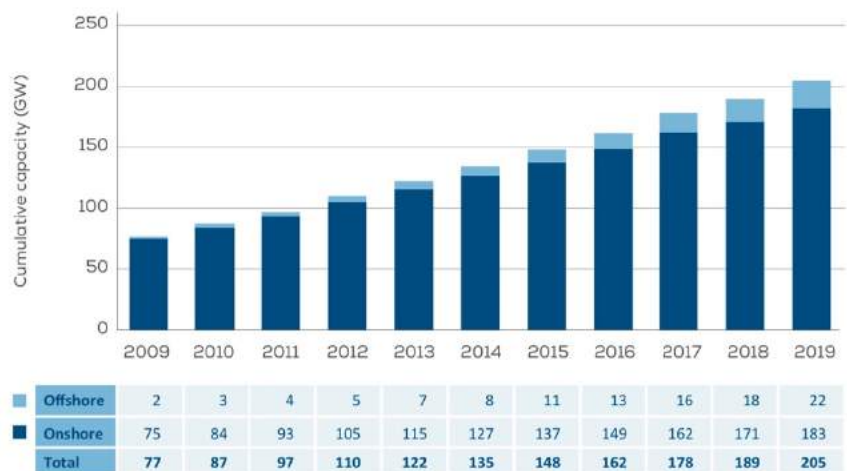
Εικόνα 3.5 : Γεωπληροφοριακός χάρτης ΡΑΕ αιολικών έργων (πηγή : www.rae.gr)



Εικόνα 3.6 : Υπόμνημα γεωπληροφοριακού χάρτη ΡΑΕ αιολικών έργων (πηγή : www.rae.gr)

Συγκεκριμένα με κίτρινο χρώμα αποτυπώνονται όλες οι καινούργιες αιτήσεις που τίθενται προς αξιολόγηση, με σιέλ χρώμα, οι εγκατεστημένοι αιολικοί σταθμοί με άδεια λειτουργίας, με πράσινο χρώμα, οι εγκατεστημένοι αιολικοί σταθμοί με άδεια παραγωγής και με μαύρο χρώμα, οι αιολικοί σταθμοί με άδεια εγκατάστασης .

3.2 Η στατιστική της αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη



Source: WindEurope

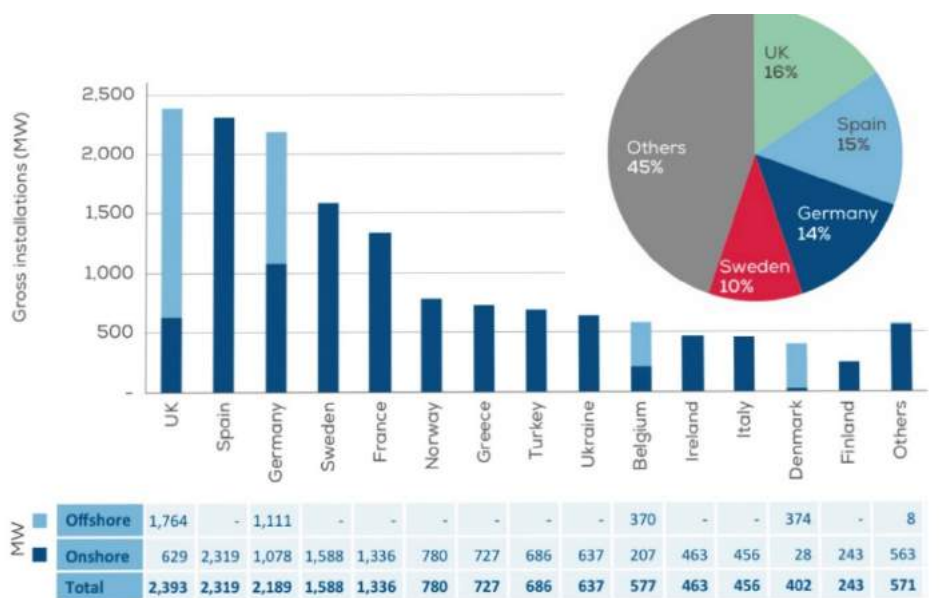
Σχήμα 3.6 : Συνολική εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρώπη σε γιγαβάτ ,2009-2019 (πηγή : [windEurope-Annual-Statistics-2019.pdf](#))

Η ενεργειακή πολιτική της ευρωπαϊκής ένωσης έχει ως κύριο στόχο την προώθηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έτσι ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι που σχετίζονται με την αλλαγή του κλίματος. Ο στόχος της ευρωπαϊκής ένωσης είναι η Ευρώπη να γίνει μέχρι το 2050 η πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρος στο κόσμο. Όραμα της να συγκρατηθεί η

θερμοκρασία του πλανήτη και να περιοριστεί η παγκόσμια αύξηση θερμοκρασίας κατά 1,5 βαθμούς κελσίου, μία οικονομία με μηδενικό ισοζύγιο εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αξιοσημείωτες επενδύσεις στον τομέα της αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη. Το 2015 οι συνολικές εγκαταστάσεις ήταν μόλις 142 γιγαβάτ. Το 2017 η αιολική ενέργεια σημείωσε κορύφωση αφού εγκαταστάθηκαν 16.854 μεγαβάτ νέων αιολικών πάρκων.

Η Ευρώπη (μετά το πέρας του 2019) διαθέτει 205 γιγαβάτ αιολικής ενέργειας. Συγκεκριμένα 183 γιγαβάτ στην ξηρά (89%) και 22 γιγαβάτ στην θάλασσα (11%). Κατά το 2019 εγκαταστάθηκαν στην Ευρώπη 15,4 γιγαβάτ αιολικής ενέργειας. (27% περισσότερο από το 2018 και 10% λιγότερο από το 2017). Με την παραγωγή 417 TWh η αιολική ενέργεια κάλυψε το 15% της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας της ευρωπαϊκής ένωσης κατά το 2019. Τα νέα υπεράκτια αιολικά πάρκα καταλαμβάνουν το 24% των νέων εγκαταστάσεων με 3,6 γιγαβάτ συνδεδεμένα στο δίκτυο. Κατά το 2019 το 55% της αιολικής ενέργειας στην Ευρώπη εγκαταστάθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο, στην Ισπανία, στην Γερμανία και στη Σουηδία.

Στο παρακάτω σχήμα παρατίθενται οι νέες αιολικές εγκαταστάσεις κατά το έτος 2019 στην Ευρώπη.



Source: WindEurope

Σχήμα 3.7 : Νέες αιολικές εγκαταστάσεις κατά το 2019 (πηγή : windEurope-Annual-Statistics-2019.pdf)

Η Γερμανία παραμένει η χώρα με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ στην Ευρώπη. Από το 2014 μέχρι το 2017 εγκαθιστούσαν 4,6 γιγαβάτ κατά μέσο όρο κάθε χρόνο. Το 2019 οι χερσαίες εγκαταστάσεις μειώθηκαν κατά πολύ αφού εγκατέστησε 2.2 γιγαβάτ (1.1 στη ξηρά και 1.1 στη θάλασσα) λόγω πολύπλοκων διαδικασιών σχετικά με τις άδειες. Από τα 3.7 γιγαβάτ της δημοπρασίας μόνο το 1.8 απονεμήθηκε. Παρόλα αυτά συνέδεσε 1.1 γιγαβάτ σε τρία υπεράκτια αιολικά πάρκα.

Όσον αφορά τις υπόλοιπες Ευρωπαϊκές χώρες. Το Ηνωμένο Βασίλειο κατείχε το 2019 το 16% των νέων εγκαταστάσεων με το 74% να είναι υπεράκτιο (1,8 γιγαβάτ). Παραμένει η τρίτη χώρα με τη μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ στην Ευρώπη, με πρώτη τη Γερμανία και δεύτερη την Ισπανία. Ακολουθούν η Γαλλία και η Ιταλία. Στο Ηνωμένο Βασίλειο τέθηκε σε λειτουργία το αιολικό πάρκο Beatrice 2. Το Hornsea One συνέδεσε όλες τις ανεμογεννήτριες με το δίκτυο και έτσι έγινε το μεγαλύτερο υπεράκτιο αιολικό πάρκο με 1.218 μεγαβάτ. Στην Ισπανία εγκαταστάθηκαν 2,3 γιγαβάτ ενώ η Γαλλία εγκατέστησε 1,3 μεγαβάτ (πάνω από 1 στην ξηρά). Οι εγκαταστάσεις στην Ελλάδα ήταν 723 μεγαβάτ, στην Ιρλανδία 463 μεγαβάτ και στην Ιταλία 456 μεγαβάτ.

Τέλος το 2019, 11 χώρες έκαναν δημοπρασίες ανανεώσιμης ενέργειας. Ο αέρας στη ξηρά εξασφάλισε 8,6 γιγαβάτ ενώ στη θάλασσα 6,8 γιγαβάτ. Οι επενδύσεις σε νέα αιολικά πάρκα έφτασαν τα 19 δισεκατομμύρια ευρώ, 24% λιγότερα από το 18. Η Γαλλία ήταν ο μεγαλύτερος επενδυτής στην υπεράκτια αγορά με 2.4 δις για τη χρηματοδότηση του Saint-Nazaire 480 MW της EDF. Ακολούθησε το Ηνωμένο Βασίλειο με 2,3 δις για το Neart na Gaoithe της EDF επίσης.

Στον πίνακα 3.1 και στο σχήμα 3.8 παρουσιάζονται τα πιθανά σενάρια σε παραγωγή αιολικής ενέργειας ανά χώρα μέχρι το 2030.

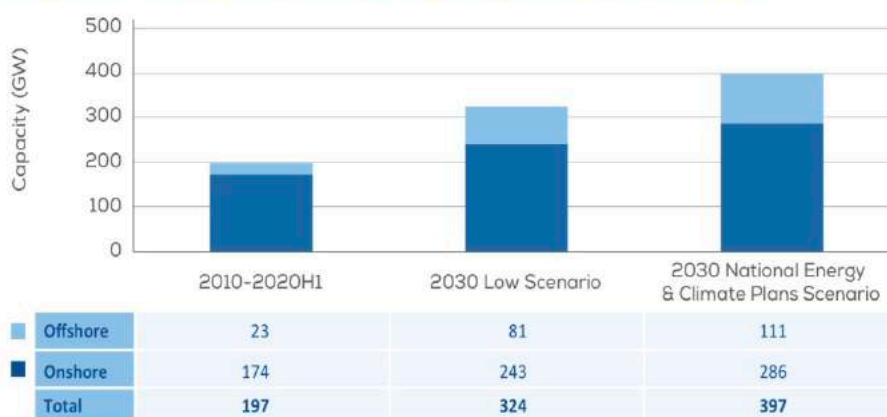
Πίνακας 3.1: Πιθανά σενάρια για κάθε χώρα μέχρι το 2030 (πηγή : windEurope-Annual-Statistics-2019.pdf)

TABLE 1
WindEurope 2030 scenarios per country

COUNTRY	2020 H1 [MW]	LOW SCENARIO [MW]	NECP SCENARIO [MW]
Austria	3,166	5,000	6,500
Belgium	4,164	7,500	8,900
Bulgaria	691	691	951
Croatia	739	1,200	1,364
Cyprus	158	158	198
Czechia	337	502	970
Denmark	6,224	10,871	16,603
Estonia	320	890	1,200
Finland	2,284	4,571	5,571
France	17,137	39,877	45,077
Germany	62,178	73,000	89,000
Greece	3,884	5,776	7,070
Hungary	329	300	329
Ireland	4,235	5,525	13,200
Italy	10,796	16,400	19,300
Latvia	72	72	1,100
Lithuania	534	700	1,600
Luxembourg	149	200	322
Malta	-	-	-
Netherlands	5,009	17,603	20,500
Poland	6,222	18,000	22,000
Portugal	5,446	6,025	9,225
Romania	3,029	4,600	5,555
Slovakia	3	3	500
Slovenia	3	3	150
Spain	26,036	48,000	50,333
Sweden	9,374	10,900	12,200
Total EU-27	172,519	278,368	339,718
UK	24,076	45,363	57,070
Total Europe	196,595	323,731	396,788

FIGURE 3

Cumulative wind power capacity in Europe (EU 27+ UK): 2020 to date and possible scenarios to 2030.



Source: WindEurope

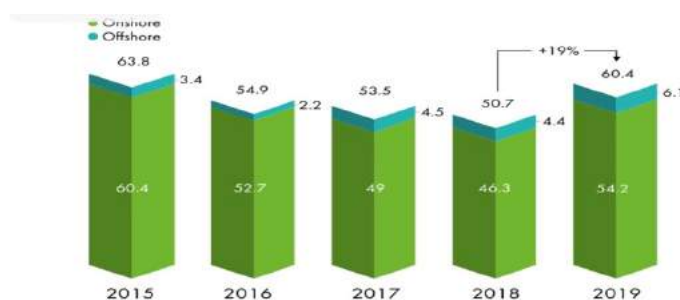
Σχήμα 3.8 : Συνολική ισχύς αιολικής ενέργειας από το 2010 και πιθανά σενάρια μέχρι το 2030 (πηγή : www.gwec.com)

3.3 Η στατιστική της αιολικής ενέργειας παγκοσμίως

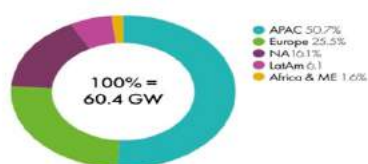
Οι αιολική ενέργεια και γενικά οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι προσιτή για τον άνθρωπο παγκοσμίως. Μελλοντικά θεωρείται ως ο βασικότερος παράγοντας για την άμβλυνση της κλιματικής αλλαγής στον πλανήτη. Ωστόσο η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας δεν είναι κατανομημένη κατά όμοιο τρόπο ανά τον κόσμο. Μέχρι και το 1999 το 70% της παγκόσμιας παραγωγής αιολικής ενέργειας ήταν τοποθετημένο στην Ευρώπη ενώ μέχρι το τέλος του 2008 πρωτοπόροι ήταν οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και η Γερμανία. Σήμερα η Κίνα και οι ΗΠΑ είναι πρώτες αντιπροσωπεύοντας αθροιστικά το 60% των νέων χερσαίων αιολικών προσθηκών.

Στο σχήμα 3.9 παρουσιάζεται η παραγωγή σε αιολική ισχύς στη στεριά στη θάλασσα και συνολικά καθώς και οι νέες εγκαταστάσεις κατά το 2019 ανά χώρα.

(α)



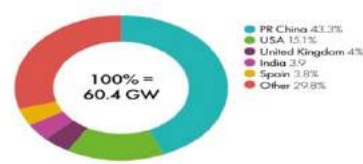
New capacity 2019 installed by region (%)



GWEC Market Intelligence, March 2020

(β)

New capacity 2019 and share of top five markets (%)



(γ)

Σχήμα 3.9 : (α) παράκτιες και υπεράκτιες αιολικές εγκαταστάσεις 2015-2019 , (β) νέες εγκαταστάσεις ανά χώρα το 2019, (γ) οι πρώτες πέντε χώρες σε παραγωγή αιολικής ενέργειας. (πηγή : www.gwec.com)

Μέχρι το τέλος του 2018 η συνολική αθροιστική ισχύς αιολικής ενέργειας στον κόσμο ήταν 600 γιγαβάτ. Εντός του 2018 προστέθηκαν περίπου 54 γιγαβάτ ενώ το 2017 περίπου 52 μεγαβάτ. Εντός του 2018 παρατηρήθηκε σημαντική ανάπτυξη κυρίως εκτός Ευρώπης (Κίνα, Ινδία) ενώ εντός Ευρώπης σημειώθηκε πτώση στην αιολική αγορά. Το 2019 προστέθηκαν 60,4 γιγαβάτ (αύξηση 19% σε σχέση με το 2018) και επομένως η παγκόσμια συνολική ισχύς αιολικής ενέργειας έφτασε τα 651 γιγαβάτ.

Στην χερσαία αγορά εγκαταστάθηκαν 54,2 γιγαβάτ ισχύος (17% περισσότερα από το 2018) ενώ η υπεράκτια αγορά το 2019 πέρασε τα 6 γιγαβάτ που είναι και το υψηλότερο μέχρι τώρα. Οι κορυφαίες αγορές του κόσμου σε νέες εγκαταστάσεις κατά το 2019 είναι η Κίνα, οι ΗΠΑ, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ινδία και η Ισπανία, οι οποίες αθροιστικά αντιστοιχούν στο 72% της συνολικής εγκατάστασης αιολικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο. Η Κίνα με προσθήκες χερσαίων αιολικών πάρκων 23,8 γιγαβάτ κατά το 2019 έφτασε τα 230 γιγαβάτ συνολικής εγκατάστασης αιολικής ενέργειας στην ξηρά. Οι ΗΠΑ η δεύτερη μεγαλύτερη αγορά το 2019 μαζί με τα 9,1 γιγαβάτ προσθηκών το 2019 έφτασε τα 100 γιγαβάτ χερσαίας αιολικής εγκατάστασης.

Όσον αφορά την υπεράκτια αιολική αγορά, κατά το 2019 εγκατέστησε περισσότερα από 6 γιγαβάτ νέων προσθηκών υπεράκτιων αιολικών πάρκων στο κόσμο, ρεκόρ για τη παγκόσμια βιομηχανία υπεράκτιου ανέμου. Η Κίνα πέτυχε νέο ρεκόρ 2.3 γιγαβάτ υπεράκτιου ανέμου, το Ηνωμένο Βασίλειο 1.8 γιγαβάτ και η Γερμανία εγκατέστησε 1,1 γιγαβάτ νέων προσθηκών αιολικής ενέργειας στη θάλασσα κατά το 2019. Το υπεράκτιο κόστος μειώθηκε μέσω της τεχνολογικής καινοτομίας. Ο αμερικάνικος υπεράκτιος τομέας είχε μεγάλη πρόοδο. Οι στόχοι από 9,1 γιγαβάτ έφτασαν τα 25,4 γιγαβάτ. Η ανάπτυξη στις υπεράκτιες αγορές της Ασίας ήταν επίσης μεγάλη κατά το 2019. Συγκεκριμένα η Ταιβάν σύνδεσε το 1^ο υπεράκτιας κλίμακας έργο με το δίκτυο. Επομένως οι τρεις πρωτοπόροι στην υπεράκτια αιολική αγορά ήταν η Κίνα με 3,6 γιγαβάτ (36.7%) νέων προσθηκών, ακολουθεί η Ευρώπη με 2,7 (28.2%) γιγαβάτ και τέλος οι ΗΠΑ με 1,6 (16,1%) γιγαβάτ νέων εγκαταστάσεων υπεράκτιας αιολικής ενέργειας.

Οι GWEC έχει ηγετικό ρόλο στην ανάπτυξη νέων αγορών για την αιολική βιομηχανία. Υποστηρίζει ότι οι επόμενες αναπτυξιακές αγορές θα είναι στη νοτιοανατολική Ασία, στη Λατινική Αμερική, στην Αφρική και στην Ιαπωνία. Συγκεκριμένα η αγορά της Κολομβίας

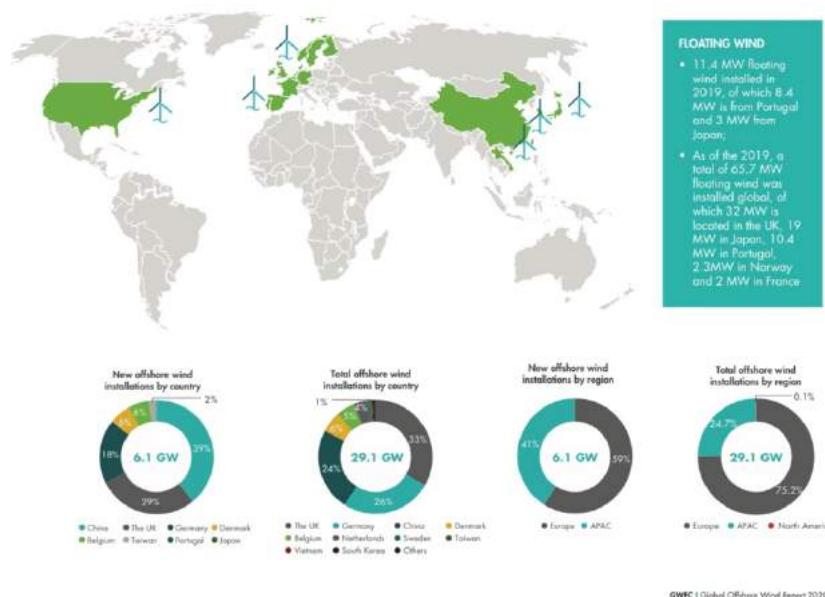
έως το 2022 αναμένεται να φτάσει τα 1,5 γιγαβάτ. Η Κολομβία είναι μία χώρα όπου υπάρχει αρκετά υψηλό αιολικό δυναμικό. Επόμενη ανερχόμενη αγορά αιολικής ενέργειας είναι η Χιλή η οποία το 2019 η εγκατεστημένη αιολική ενέργειας ήταν 526 μεγαβάτ, ενώ συνολικά εγκατεστημένα στη χώρα ήταν 2,15 γιγαβάτ, 1 γιγαβάτ ακόμα υπό κατασκευή και περισσότερα από 6 γιγαβάτ εγκεκριμένων αιολικών έργων. Επιπλέον, προοπτικές εξέλιξης λόγω υψηλών ταχυτήτων ανέμου στα νότια παρουσιάζει το Βιετνάμ και η Ταϊλάνδη που αποτελεί τη δεύτερη μεγαλύτερη οικονομία της ΝΑ Ασίας. Κατά το 2019 η Ταϊλάνδη εγκατέστησε 322 μεγαβάτ (συνολικά εγκατεστημένα 1,5 γιγαβάτ) και έχει στόχο μέχρι το 2030 να ανέλθει στα 3 γιγαβάτ.

Σχετικά με την υπεράκτια αγορά της Αμερική προβλέπεται ότι μέχρι το 2026 θα έχουν κατασκευαστεί 10,6 γιγαβάτ ισχύος. Από αυτά το 25% προβλέπεται να κατασκευαστεί στη Βιρτζίνια, το 17,2% στη Νέα Υόρκη και το 15,2 στη Μασαχουσέτη. Την ιδιοκτησία του έργου την ελέγχουν επί το πλείστον (κατά 70%) ευρωπαίοι προγραμματιστές.

Παρόλα αυτά πρωτοπόρος στην υπεράκτια αιολική αγορά όπως προαναφέρθηκε είναι η Κίνα. Ο στόχος για 5 γιγαβάτ μέχρι το 2020 κατοχυρώθηκε κατά το 2019 ύστερα από εγκατάσταση 2,4 γιγαβατ υπεράκτιου ανέμου. Συνολικά, μέχρι και το τέλος του 2019, η Κίνα έχει εγκατεστημένα 10 γιγαβάτ υπεράκτιων προσθηκών με πάνω από 40 γιγαβάτ ισχύος εγκεκριμένα προς ανάπτυξη.

Σε αντίθεση με τις παραπάνω χώρες η ανάπτυξη της αιολικής υπεράκτια αγοράς της Ιαπωνίας αναδύεται με αργό ρυθμό. Συγκεκριμένα, η Ιαπωνία έχει εγκατεστημένα μόνο 65,6 μεγαβάτ υπεράκτιων. Παρόλα αυτά από τις αρχές του 2020, 14,8 γιγαβάτ βρίσκονται σε εξέλιξη.

Προβλέπεται λοιπόν ότι οι προοπτικές για το 2020-2024, δεδομένο ότι η παγκόσμια ζήτηση αιολικής ενέργειας αυξάνεται συνεχώς, θα προστεθούν πάνω από 71 γιγαβάτ ανά χρόνο μέχρι το 2024. Το μέγεθος της υπεράκτιας αγοράς προβλέπεται να αυξηθεί σε 15 γιγαβάτ το 2024.



Εικόνα 3.6: Παραγωγή παράκτιας αιολικής ενέργειας κατά το 2019 (πηγή : www.gwec.com)

3.4 Τεχνικές λύσεις με στόχο την ανάπτυξη της αιολικής αγοράς

Προκειμένου να αυξηθεί το ποσοστό της αιολικής ενέργειας στις αγορές ενέργειας πρέπει να υπάρξουν κάποιες τεχνικές λύσεις ώστε να επιταχυνθεί η παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση. Δύο βασικοί παράγοντες της παγκόσμιας ενεργειακής μετάβασης είναι ο υβριδισμός και το πράσινο υδρογόνο.

3.4.1 Υβριδισμός

Υβριδισμός καλείται ο συνδυασμός δύο τουλάχιστον πηγών παραγωγής ενέργειας. Στοχεύει στην αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και εμμέσως στην σταδιακή αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων. Ο υβριδισμός ενσωματώνοντας περισσότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στο δίκτυο παρέχει ένα οικονομικά αποδοτικότερο ηλεκτρικό ρεύμα. Τα υβρίδια απαιτούν πιο οικονομικές και αποδοτικές λύσεις αποθήκευσης με στόχο τη μείωση του κόστους αποθήκευσης. Η εδραίωση τέτοιου είδους λύσεων συμβάλλει στη μείωση του κόστους αποθήκευσης. Έτσι, το επίπεδο διείσδυσης των υβριδικών λύσεων στην αγορά αναμένεται να αυξηθεί απότομα.

3.4.1.1 Φωτοβολταικά υβριδικά συστήματα με ανεμογεννήτριες

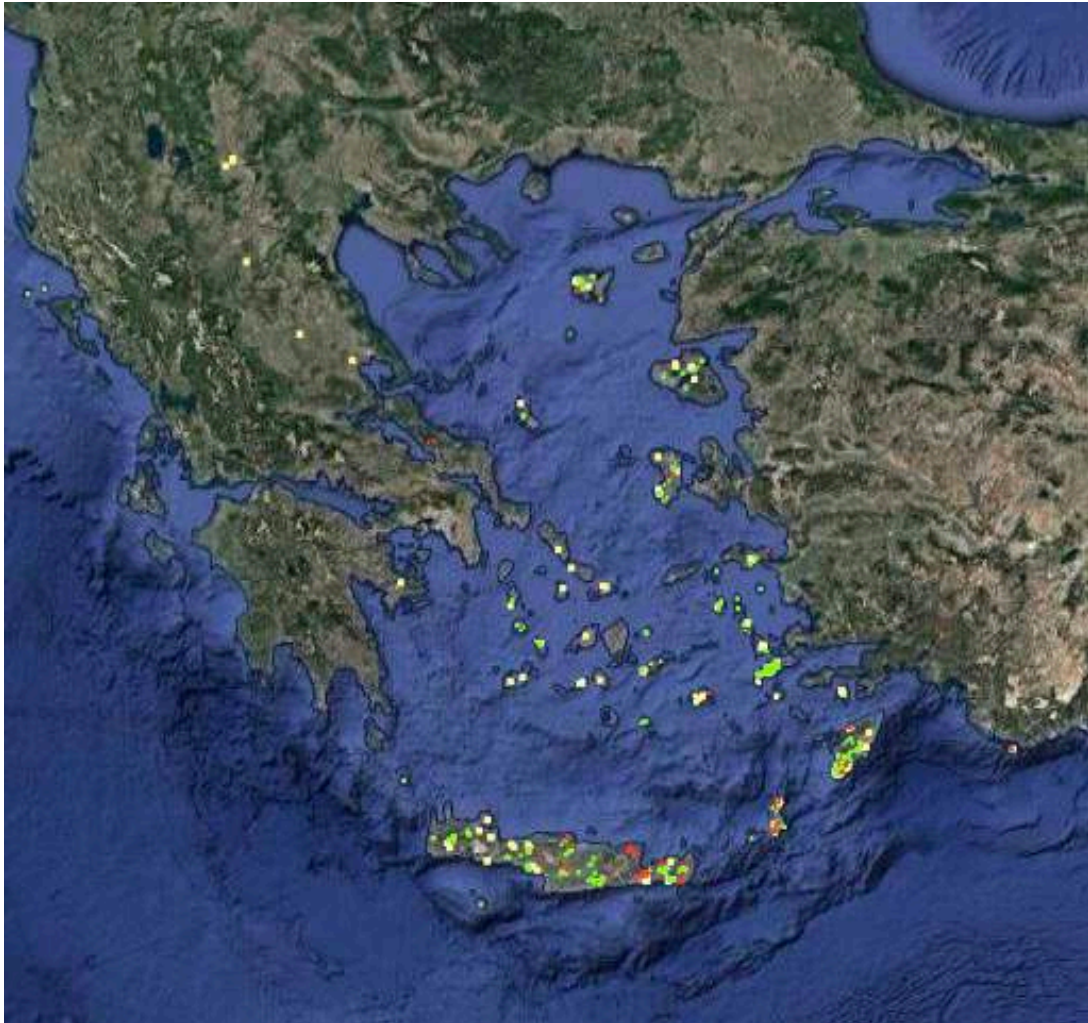
Τα υβριδικά συστήματα είναι συνδυασμός φωτοβολταικού συστήματος με ανεμογεννήτρια. Η χρήση της ανεμογεννήτριας παίζει σημαντικό ρόλο στο φωτοβολταικό σύστημα αφού δίνει τη δυνατότητα φόρτισης των συσσωρευτών ταυτόχρονα με τα φωτοβολταικά ακόμα και όταν δεν έχει ήλιο (κατά τη διάρκεια της νύχτας, του χειμώνα, ή με συννεφιασμένο καιρό). Ενισχύει λοιπόν την απόδοση του φωτοβολταικού συστήματος. Διακρίνονται σε υβριδικά αυτόνομα συστήματα και σε διασυνδεδεμένα υβριδικά συστήματα.

Τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα είναι κατάλληλα για περιοχές όπου δεν υπάρχει πρόσβαση στο βασικό δίκτυο. Εφαρμόζονται κυρίως σε οικιακά ή επαγγελματικά περιβάλλοντα και κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται με στόχο την αδιάλειπτη λειτουργία. Μπορεί να περιλαμβάνουν συσσωρευτές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για αδιάλειπτη λειτουργία ή για περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης (διακοπές ή μεταβολή τάσης) των περιοχών όπου είναι εγκατεστημένα. Τα αυτόνομα υβριδικά συστήματα περιλαμβάνουν την ανεμογεννήτρια, τις ομάδες των φωτοβολταικών πλαισίων, τους συσσωρευτές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, τον πίνακα τροφοδοσίας και τον σταθμό μετατροπής ισχύος, ο οποίος μπορεί να συνδεθεί και με ντιζελογεννήτρια (3^η πηγή παραγωγής ενέργειας).

Αντίθετα τα διασυνδεδεμένα υβριδικά συστήματα είναι κατάλληλα για απομονωμένες περιοχές όπως οι νησιωτικές και είναι κατασκευασμένα για μεγάλη ισχύ. Για συνεχή και αδιάλειπτη λειτουργία και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούν την λειτουργία της ντιζελογεννήτριας (η γεννήτρια ντίζελ αποτελείται από μία μηχανή εσωτερικής καύσης, η οποία στρέφει μία σύγχρονη γεννήτρια). Εμπερικλείουν τα φωτοβολταικά πάρκα(ομάδες φωτοβολταικών πλαισίων), το αιολικό πάρκο (συστοιχία ανεμογεννητριών), την ντιζελογεννήτρια, τους συσσωρευτές αποθήκευσης(batteries) και τον πολυμορφικό σταθμό μετατροπής ισχύος. Παρά όλα αυτά στη περίπτωση που το υβριδικό σύστημα είναι συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι απαραίτητοι οι συσσωρευτές αποθήκευσης και η ντιζελογεννήτρια.

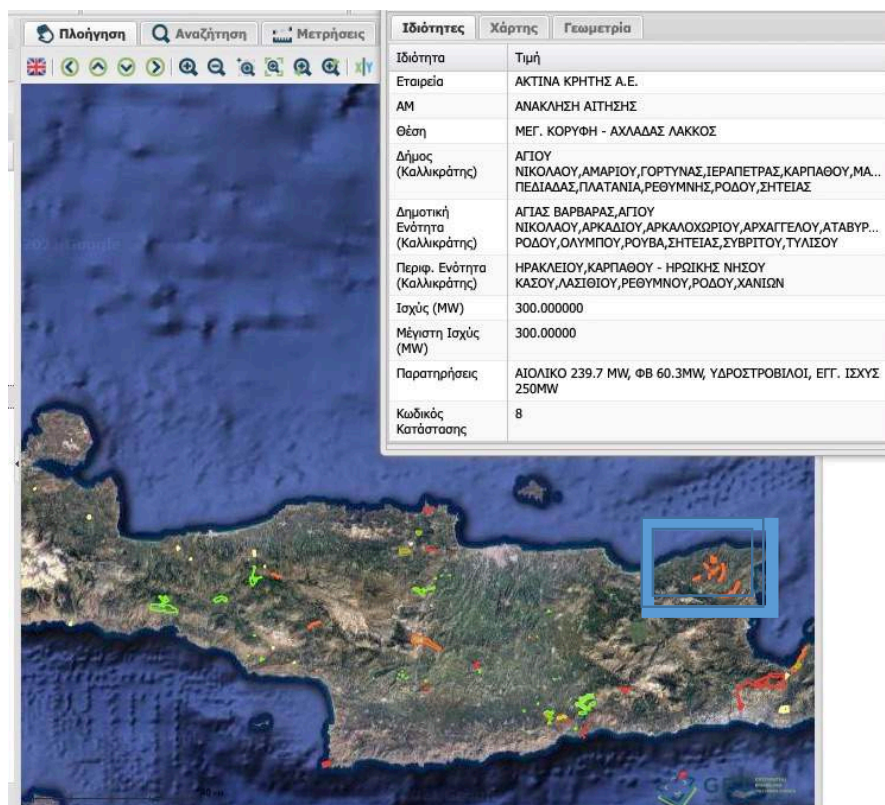
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται όλοι οι υβριδικοί σταθμοί που υπάρχουν στην Ελλάδα. Συγκεκριμένα με πράσινο απεικονίζονται οι υβριδικοί σταθμοί με άδεια

παραγωγής ενώ με κόκκινο και με κίτρινο, οι απορριπτικές αποφάσεις και οι προς σε αξιολόγηση υβριδικοί σταθμοί αντίστοιχα.



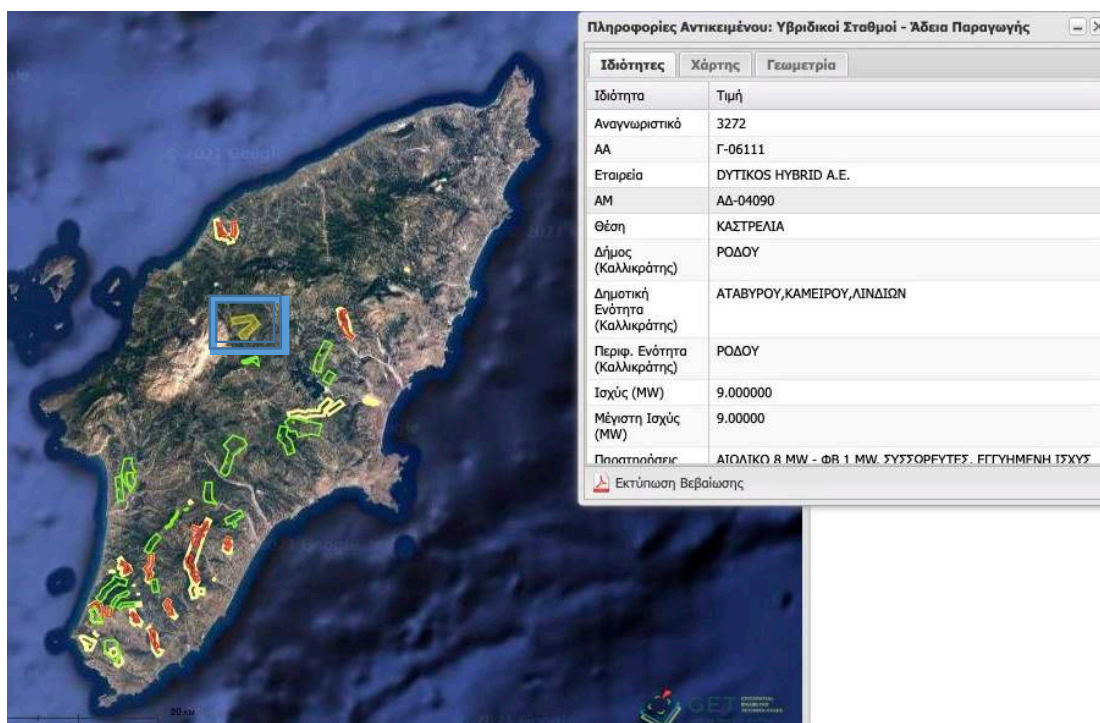
Εικόνα 3.7: Υβριδικοί σταθμοί στην Ελλάδα (πηγή : γεωπληροφοριακός χάρτης www.rae.gr)

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένας υβριδικός σταθμός στη Κρήτη που ανήκει στην εταιρεία ακτίνα Κρήτης καθώς και οι ιδιότητες του. Ο υβριδικός σταθμός αποτελείται από 239.7 MW αιολικής ισχύος, 60.3 MW φωτοβολταικά και υδροστρόβιλους εγγυημένης ισχύς 250 MW. Η αίτηση του συγκεκριμένου υβριδικού σταθμού βρίσκεται σε ανάκληση.



Εικόνα 3.7: Υβριδικοί σταθμοί στην Κρήτη (πηγή : γεωπληροφοριακός χάρτης

www.rae.gr)



Εικόνα 3.7: Υβριδικοί σταθμοί στην Ρόδο (πηγή : γεωπληροφοριακός χάρτης

www.rae.gr)

Ο υβριδικός σταθμός της παραπάνω εικόνας ανήκει στην εταιρεία Dytikos Hybrid A.E., βρίσκεται στο δήμο της Ρόδου και αποτελείται από 8 MW αιολικής ισχύος, 1 MW φωτοβολταϊκών και συσσωρευτές εγγυημένης ισχύος 3 MW.

3.4.1.2 Υδρογόνο

Το υδρογόνο έχει εξελιχθεί ως μείζον θέμα του ενεργειακού τομέα τα τελευταία χρόνια και έχει αποκτήσει ισχυρή έλξη μεταξύ της βιομηχανίας και των διεθνών οργανισμών το 2019. Προβλέπεται να είναι σημαντικός παράγοντας αντικατάστασης των ορυκτών καυσίμων και να χρησιμοποιηθεί ως πρώτη ύλη σε βιομηχανικές λειτουργίες λόγω των χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Το πράσινο υδρογόνο παράγεται χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ηλεκτρόλυση του νερού), επομένως είναι καύσιμο μηδενικών εκπομπών. Δεδομένο ότι γίνονται ολοένα και προσπάθειες εξάλειψης των εκπομπών αέριων του θερμοκηπίου η παραγωγή υδρογόνου από αιολική αλλά και ηλιακή ενέργεια μπορεί να προσφέρει μεγάλα οφέλη για την ανάπτυξη αιολικών αλλά και άλλων ΑΠΕ συστημάτων. Το υδρογόνο αποτελεί μια επιλογή αποθήκευσης χαμηλού κόστους για μεγάλο χρονικό διάστημα (μέχρι και μήνες) και για τη μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Η αποθήκευση της ενέργειας είναι πολύ σημαντική για την ενεργειακή μετάβαση. Παράγεται χρησιμοποιώντας μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και ανέμους μεγάλων ταχυτήτων.

Ο παράκτιος άνεμος αλλά και γενικά ο άνεμος αποτελεί μία σημαντική πηγή ενέργειας για την παραγωγή υδρογόνου. Η υπεράκτια αιολική ενέργεια έχει το υψηλότερο δυναμικό παραγωγής υδρογόνου. Μέχρι σήμερα υπάρχουν δύο τύποι λύσεων υπεράκτιου ανέμου και υδρογόνου. Μια λύση ανέμου και υδρογόνου έχει στόχο τη χρήση αιολικής ενέργειας για την τροφοδοσία ηλεκτρολυτών που είναι τοποθετημένοι σε πλατφόρμες πετρελαίου και φυσικού αερίου με στόχο την παραγωγή πράσινου υδρογόνου από θαλασσινό νερό. Το υδρογόνο αναμιγνύεται στη γραμμή εξαγωγής φυσικού αερίου και μεταφέρεται στην ξηρά. Μία άλλη λύση είναι η τροφοδοσία ηλεκτρολυτών που διαχωρίζουν σε υδρογόνο και οξυγόνο τα μόρια του νερού. Έτσι το υδρογόνο θα μπορεί να αποθηκευτεί σε δεξαμενές μέχρι να εκφορτωθεί όταν θα χρειαστεί ενέργεια. Το υδρογόνο μπορεί να μετατραπεί σε φυσικό αέριο (συνθετικό, αμμωνία δηλαδή) μέσω της πλατφόρμας

υπεράκτιας υδρογόνωσης πριν γίνει η μεταφορά στους χρήστες. Επίσης είναι εφικτό οι ηλεκτρολύτες να αναπτυχθούν σε περιοχές που υπάρχει διασύνδεση υπόγειων καλωδίων έτσι ώστε να υπάρχει μεταφορά του υδρογόνου με αγωγούς υδρογόνου άμεσα στη ξηρά.

Για να ανταποκριθεί σε αυτές τις προσδοκίες η GWEC συνεργάζεται με διάφορους φορείς για την ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας με την βιομηχανία υδρογόνου. Είναι πολύ σημαντικό να αυξηθεί η παραγωγή πράσινου υδρογόνου για να εξασφαλιστεί η ενεργειακή μετάβαση μέσω της διασφάλισης της μείωσης του κόστους του υδρογόνου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ

Με τον όρο αιολικό πάρκο (ή Αιολικός σταθμός παραγωγής) ορίζεται μία συστοιχία ανεμογεννητριών σε μία περιοχή με υψηλό αιολικό δυναμικό με στόχο της μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε μηχανική και στη συνέχεια σε ηλεκτρική. Έκτος από ανεμογεννήτριες εμπεριέχουν τους σταθμούς μετασχηματισμού, τα καλώδια μεταφοράς ρεύματος, του δρόμους πρόσβασης, τις ηλεκτρικές γραμμές μεταφοράς, ένα σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου και τους μετεωρολογικούς ιστούς. Σε αντίθεση με τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρισμού δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον. Τα αιολικά πάρκα διακρίνονται σε χερσαία, παράκτια και υπεράκτια ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασής τους.

4.1 Χερσαία αιολικά πάρκα



Εικόνα 4.1 : Χερσαίο αιολικό πάρκο (πηγή : Αξιολόγηση παραμέτρων απόδοσης αιολικού πάρκου ,Μακρίδης Ιωάννης ,2013)

Τα χερσαία αιολικά πάρκα είναι τοποθετημένα στη ξηρά στις κορυφογραμμές περιοχών με μεγάλο σχετικά υψόμετρο και σε απόσταση τουλάχιστον τριών χιλιομέτρων από ακτογραμμές. Είναι η πρώτη και η πιο διαδεδομένη μορφή αιολικών πάρκων. Συνήθως τοποθετούνται σε κορυφογραμμές για να υπάρχει υψηλή ταχύτητα ανέμου. Σε περίπτωση που τοποθετηθούν σε μεγάλο υψόμετρο μερικές φορές πρέπει να δημιουργηθούν δρόμοι επομένως αυξάνεται κατά πολύ το κόστος παραγωγής. Ωστόσο, είναι δυνατόν να τοποθετηθούν και σε περιοχές με χαμηλό υψόμετρο όπου δεν υπάρχει υψηλό κόστος για μεταφορά μηχανημάτων. Η χωροθέτηση ενός χερσαίου πάρκου είναι θεμιτό να διατηρεί αποστάσεις από περιοχές με οικολογικό ενδιαφέρον καθώς και από κατοικημένες περιοχές για αυτό χρησιμοποιούνται ζώνες αποκλεισμού και γίνεται ύστερα από αναλυτική παρακολούθηση των τοπικών ανέμων για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το εύρος των ζωνών που πρέπει να βρίσκονται οι κατοικημένες περιοχές σε σχέση με το αιολικό πάρκο κυμαίνεται από 500 μέτρα έως 2500 χιλιόμετρα.

4.2 Παράκτια αιολικά πάρκα

Παράκτια αιολικά πάρκα ονομάζονται τα πάρκα που βρίσκονται στην ξηρά σε απόσταση μικρότερη των τριών χιλιομέτρων από την πιο κοντινή ακτογραμμή ή στην θάλασσα σε απόσταση μικρότερη των δέκα χιλιομέτρων από την ακτογραμμή. Στα παράκτια αιολικά πάρκα που τοποθετούνται στη ξηρά η τεχνολογία τους είναι παρόμοια με των χερσαίων. Λόγω των ισχυρών ανέμων που δημιουργούνται με τη διαφορά θερμοκρασίας (θερμοκρασιακή διαφορά) σε θάλασσα και στεριά παρουσιάζουν σημαντικό πλεονέκτημα σε αντίθεση με τα παράκτια αιολικά πάρκα εντός της θάλασσας, όπου παρουσιάζονται δυσκολίες στην εγκατάσταση. Επιπλέον λόγω των υπόγειων καλωδίων που χρησιμοποιούνται παράγονται ηλεκτρομαγνητικά πεδία που μπορούν να προκαλέσουν επιπτώσεις σε θαλάσσιους οργανισμούς. Επίσης ένα ακόμα μειονέκτημα τους είναι ο θόρυβος όπου διακρίνεται σε αεροδυναμικό και μηχανικό. Συγκεκριμένα ο αεροδυναμικός προκαλείται από μεταλλικά εξαρτήματα που βρίσκονται σε τριβή μεταξύ τους ενώ ο θόρυβος κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας προκαλείται κατά την εγκατάσταση και απεγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου(250 ντεσιμπέλ στο 1 μέτρο).

4.3 Υπεράκτια αιολικά πάρκα



Εικόνα 4.2 Υπεράκτιο αιολικό πάρκο ανοικτά των βόρειων ακτών της Ολλανδίας
(πηγή :Μελέτη αιολικού πάρκου ισχύος 2,4MW,Μπαϊρακτάρης Κωνσταντίνος,2018)

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι τοποθετημένα σε περιοχές εντός της θάλασσας και εκτός της ζώνης των δέκα χιλιομέτρων από την κοντινότερη ακτή. Έχει αποδειχθεί ότι η ανεμογεννήτρια λειτουργεί αποδοτικότερα στη θάλασσα συγκριτικά με τη στεριά λόγω υψηλότερης ταχύτητας ανέμου. Στην θάλασσα δεν εμφανίζεται τύρβη στον άνεμο λόγω της ελάχιστης διαφοράς θερμοκρασίας στην ατμόσφαιρα και στη θαλάσσια επιφάνεια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα εκτός από βελτιωμένη απόδοση ανεμογεννητριών και λιγότερη καταπόνηση. Το γεγονός ότι το θαλάσσιο περιβάλλον δίνει περισσότερο εύρος στην επιλογή κατάλληλης περιοχής αυτό δε σημαίνει ότι δε πρέπει να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις. Χρειάζεται βάθος έως 50 μέτρα, καθώς και υψηλή ταχύτητα ανέμου. Θα πρέπει επίσης να διατηρείται απόσταση από επιφανειακούς υδάτινους όγκους για να προστατευθούν οι υγρότοποι αυτοί. Τα θεμέλια των γεννητριών τοποθετούνται μέσα στη θάλασσα ενώ ο πύργος πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Ωστόσο το κόστος τους είναι αρκετά υψηλό σε σχέση με τα χερσαία ή παράκτια επομένως είναι και πολύ λιγότερα. Το 1991 κατασκευάστηκε το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο στη Δανία. Επιπλέον, μετά από χρόνια τα θεμέλια των ανεμογεννητριών μπορούν να λειτουργήσουν

ως τεχνητοί ύφαλοι, γεγονός που θα οδηγήσει σε αύξηση του αριθμού των ψαριών και επομένως αύξηση των πουλιών.

4.4 Λειτουργία και συντήρηση αιολικών πάρκων

Είναι γεγονός πως το κόστος εγκατάστασης για ένα παράκτιο αιολικό πάρκο είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το κόστος εγκατάστασης ενός χερσαίου αιολικού πάρκου. Ειδικότερα στα χερσαία αιολικά πάρκα η σύνδεσής τους με το κύριο σύστημα ισχύος γίνεται με ένα εναλλασσόμενης τάσης δίκτυο μέσα στο πάρκο. Το δίκτυο αυτό συλλέγει ισχύ από τις ανεμογεννήτριες. Για ένα χερσαίο αιολικό πάρκο το πιο υψηλό επίπεδο τάσης βρίσκεται ανάμεσα σε 33 και 36 kV. Αντίθετα στα παράκτια αιολικά πάρκα υπάρχουν 3 διαφορετικές επιλογές σύνδεσης με την ακτή. Αυτές είναι η εναλλασσόμενου ρεύματος υψηλής τάσης (HVAC) μεταφορά, η μεταφορά μετατροπών εξαναγκασμένης μεταγωγής (VSC) και η μεταφορά μετατροπών μεταγωγής μέσω πυκνωτών (LCC), βασισμένες σε συνεχούς ρεύματος υψηλή τάση (HVDC).

Προκείμενου να γίνει πρόληψη ζημιών από διάφορους παράγοντες (ακραίες καιρικές συνθήκες και άλλα) είναι συνετό να υπάρχει σωστή και τακτή συντήρηση των ανεμογεννητριών. Η σκόνη είναι ένας από τους παράγοντες που μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στις ανεμογεννήτριες διότι εμποδίζει τη ροή του αέρα, επομένως μειώνει τη ψύξη και αυξάνει τη θερμοκρασία μηχανημάτων (κιβώτιο ταχύτητας, ηλεκτρική γεννήτρια). Επιπλέον οι δονήσεις στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας από καιρικές συνθήκες μπορεί να προκαλέσουν ακόμα και σπάσιμο των πτερυγίων. Έτσι καθίσταται απαραίτητη η πρόληψη των παραπάνω προβλημάτων. Για αυτούς τους λόγους διατίθεται πρόγραμμα συντήρησης που εκτελείται τακτικά. Έτσι ελέγχεται η κατάσταση κάθε ανεμογεννήτριας και σε τυχόν πρόβλημα επικαλείται η διορθωτική συντήρηση όπου εκτελούνται εργασίες συντήρησης για τη διόρθωση οποιασδήποτε ανωμαλίας. Ένα ακόμη είδος είναι η προαιρετική συντήρηση η οποία ασχολείται με διόρθωση ήδη υπάρχοντων βλαβών με στόχο την εξάλειψή τους.

4.5 Διακοπή λειτουργίας αιολικού πάρκου

Όταν σταματήσει η λειτουργία ενός αιολικού πάρκου λόγω η διάρκεια ζωής τους θα έχει φτάσει στο πέρας της, ο χρησιμοποιούμενος εξοπλισμός πρέπει να αποξηλωθεί και να

γίνει αποκατάσταση του χώρου. Οι ανεμογεννήτριες αποσυναρμολογούνται και τα υλικά τους (θεμέλια, πυλώνες, γεννήτρια, πτερύγια) ανακυκλώνονται κατά 85-90% ενώ παράλληλα μπορούν να διατεθούν για μεταγενέστερες χρήσεις. Συνήθως στον ήδη υπάρχον χώρο θα γίνει εγκατάσταση πιο σύγχρονων και παραγωγικών ανεμογεννητριών. Στόχος είναι η ανακύκλωση να φτάσει στο 100%.



(α)



(β)

Εικόνα 4.3: (α) καταστροφή θεμελίων ανεμογεννητριών και (β) αποκατάσταση εδάφους στα Ψαρά (Πηγή : www.ask4wind.gr / www.eletaen.gr)

Εκτός από τα Ψαρά, δέκα ακόμα αιολικά πάρκα ανακατασκευάστηκαν. 62 παλιές ανεμογεννήτριες (55-225 κιλοβάτ) αντικαταστάθηκαν από 15 νέες και πρόκειται να εγκατασταθούν σύνολο 22 ανεμογεννήτριες.

4.6 Εφαρμογές εντός και εκτός δικτύου

Οι αιολικές εγκαταστάσεις απαντώνται σε εφαρμογές εκτός δικτύου (πιο σύνηθες) και σε εφαρμογές εντός δικτύου. Στις πρώτες η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται για φόρτιση μπαταριών και άντλησης νερού. Οι μπαταρίες αποθηκεύουν ενέργεια από τις ανεμογεννήτριες και την παρέχουν στους χρήστες. Αντίθετα στις εφαρμογές εντός δικτύου ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στο δίκτυο άμεσα από τις ανεμογεννήτριες. Συγκεκριμένα μπορούμε να διακρίνουμε δύο είδη εφαρμογών εντός δικτύου, τη διασυνδέσεις σε απομονωμένο δίκτυο (σε απομακρυσμένες περιοχές, αιολικά υβριδικά diesel συστήματα) και τη διασύνδεση σε κεντρικό δίκτυο (αιολικό πάρκο) όπου ανεμογεννήτριες τοποθετούνται μαζικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΝΕΜΟΛΟΓΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΟΠΟΘΕΣΙΑΣ

5.1 Αιολικό δυναμικό

Μία από τις σημαντικές προϋποθέσεις για την λειτουργία των ανεμογεννητριών είναι το αιολικό δυναμικό. Η δημιουργία των ανέμων είναι βασισμένη σε μία αρχή. Όταν μία μάζα αέρα θερμανθεί, εκτονώνεται, γίνεται ελαφρύτερη και κινείται προς τα πάνω. Αυτό συμβαίνει διότι ο ψυχρός αέρας έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το θερμό. Η δημιουργία ανέμων είναι αποτέλεσμα ορισμένων διεργασιών της φύσης. Σύμφωνα με τη θεωρία της κατακόρυφης μεταφοράς ένα στρώμα αέρα που θα έρθει σε επαφή με την επιφάνεια της γης θα θερμανθεί και θα ανέλθει, ενώ τη θέση του θα πάρει ένα πιο ψυχρό σώμα που και αυτό θα θερμανθεί και θα ανέλθει και ούτω καθεξής. Άλλη μια συνιστώσα αποτελεί το ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα. Στο κατώτερο τμήμα της ατμόσφαιρας δημιουργείται ένα ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα μέσα στο οποίο η ταχύτητα (σχετική) μεταβάλλεται από 0 μέχρι πιο μεγάλες τιμές. Σημαντική συνιστώσα αποτελεί και η κίνηση της γης. Ο άνεμος στον ισημερινό θερμαίνεται πιο γρήγορα, έτσι ανυψώνεται και κινείται βόρεια και νότια.

Όταν δεν υπάρχει επάρκεια αιολικού δυναμικού υπάρχει δυνατότητα σύνδεσης των αιολικών πάρκων με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί για μεταγενέστερη χρήση σε περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου είναι χαμηλή. Τέτοιου είδους μορφές αποθήκευσης είναι οι μπαταρίες, αποθήκευση θερμότητας, αποθήκευση υδρογόνου και άλλα.

Σε πολλές περιοχές όπου είναι εγκατεστημένα αιολικά πάρκα, η ταχύτητα του ανέμου παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές. Συγκεκριμένα, υψηλές τιμές στην ταχύτητα δεν παρουσιάζονται τόσο συχνά, σε αντίθεση με τον περισσότερο καιρό όπου υπάρχουν χαμηλές τιμές στην ταχύτητα του ανέμου. Υψηλότερες, ισχυρότερες αλλά και διαρκέστερες ταχύτερες ανέμου εμφανίζονται στη διάρκεια της ημέρας σε σχέση με τη νύχτα. Ανάλογα το ίδιο ισχύει και το χειμώνα έναντι του καλοκαιριού με αποτέλεσμα αυτές τις περιόδους να αυξάνεται η συνεισφορά του ανέμου στο δίκτυο κατά 40-60%.

Η διεύθυνση του άνεμου καθορίζεται ως το σημείο από όπου πνέει ο άνεμος. Επικρατούσα διεύθυνση ονομάζεται η διεύθυνση με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης.

5.1.1 Ανάλυση του αιολικού δυναμικού μια περιοχής

Απαραίτητο στοιχείο για την καλή λειτουργία ενός αιολικού πάρκου είναι οι μετρήσεις αιολικού δυναμικού. Συνήθως για τη μέτρηση του αιολικού δυναμικού μια περιοχής τοποθετείται ένας μεταλλικός ιστός στον οποίο τοποθετούνται ανεμόμετρα και ανεμοδείκτες. Για να καλυφθούν όλες οι διακυμάνσεις ανάλογα με τις εποχές οι μετρήσεις θα πρέπει να διαρκούν πάνω από ένα χρόνο. Για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου χρησιμοποιείται το **ανεμόμετρο** ενώ για τον εντοπισμό της διεύθυνσης και της ταχύτητας του ανέμου χρησιμοποιείται ο **ανεμοδείκτης**

Στην εικόνα 6.1 (α) και 6.1 (β) παρουσιάζεται ένα κυπελλοφόρο ανεμόμετρο και ένας ανεμοδείκτης αντίστοιχα.



(α)



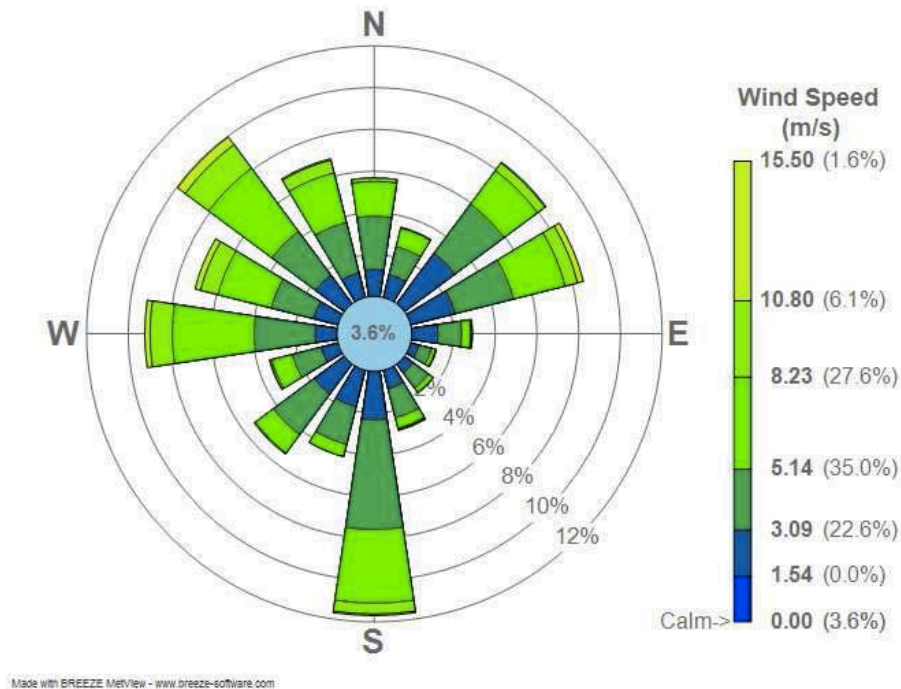
(β)

Εικόνα 6.1 : (α) ο συνηθέστερος τύπος ανεμομέτρου (κυπελλοφόρο, cup anemometer) ,
(β) ανεμοδείκτης (πηγή : Οικονομοτεχνική μελέτη αιολικού πάρκου, Μπαρμπαρήγου
Μυρτώ,2011)

Η κατεύθυνση του ανέμου απεικονίζεται με το ροδόγραμμα, ένα διάγραμμα που προσφέρει άμεσα τη κατεύθυνση, τη μέση ταχύτητα του ανέμου και τη διάρκεια πνοής

του ανέμου από κάθε κατεύθυνση. Από το μήκος των ακτινών του ροδογράμματος παρουσιάζεται η μέση ταχύτητα του ανέμου, η συχνότητα πνοής (%) υποδηλώνεται πάνω σε κάθε ακτίνα και η τιμή της νηνεμίας στο κέντρο του ροδογράμματος.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα ροδόγραμμα μίας περιοχής.



Εικόνα 6.2 : Ρόδογραμμα (πηγή : Ανάλυση και διαχείριση ρίσκου σε έργα ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, Μηλίωνης Αλέξανδρος, 2014)

5.1.2 Κατανομή ταχύτητας του ανέμου (Κατανομή Weibull)

Η ταχύτητα του ανέμου είναι δυνατόν να αντιμετωπιστεί ως μία συνεχής τυχαία μεταβλητή και μπορεί να περιγραφεί από μία συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Εκτίμηση του αιολικού δυναμικού γίνεται χρησιμοποιώντας ημιεμπειρικά μοντέλα που είναι ικανά να περιγράψουν το αιολικό δυναμικό μίας περιοχής που εξετάζεται χρησιμοποιώντας μικρό αριθμό παραμέτρων, ώστε να γίνει εκτίμηση της παραγόμενης ενέργειας. Οι πιο κοινές κατανομές είναι οι Weibull και Rayleigh, με πιο αξιόπιστη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας αυτή του Weibull. Η Rayleigh είναι υποσύνολο της Weibull η οποία περιγράφεται ως εξής :

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right], k > 1, v \geq 0, c > 0$$

Όπου $f(v)$ είναι η συνάρτηση πυκνότητας της πιθανότητας

v είναι η ταχύτητα του αέρα [m/s]

k είναι η παράμετρος μορφής κατανομής Weibull, σχετίζεται με τη μορφή κατανομής, είναι καθαρός αριθμός

c είναι η παράμετρος κλίμακας, σχετίζεται με τη μέση ταχύτητα και μετριέται σε m/s.

Με βάση διάφορες μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί η κατανομή Weibull προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια αρκεί η χρονική περίοδος που αναφέρεται να μην είναι πολύ μικρή. (περίοδοι αρκετών εβδομάδων).

Η μέση ταχύτητα υπολογίζεται και μέσω εξίσωσης η οποία υπολογίζει τη τιμή μια συνεχούς τυχαίας μεταβλητής. Αυτή είναι :

$$v_{\text{mean}} = \int_0^{\infty} v f(v) dv = \frac{c}{k} \Gamma\left(\frac{1}{k}\right)$$

όπου Γ είναι η γάμμα εξίσωση του euler :

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt$$

Η κατανομή Rayleigh εξαρτάται από την παράμετρο c , η οποία εξαρτάται από την μέση ταχύτητα του ανέμου.

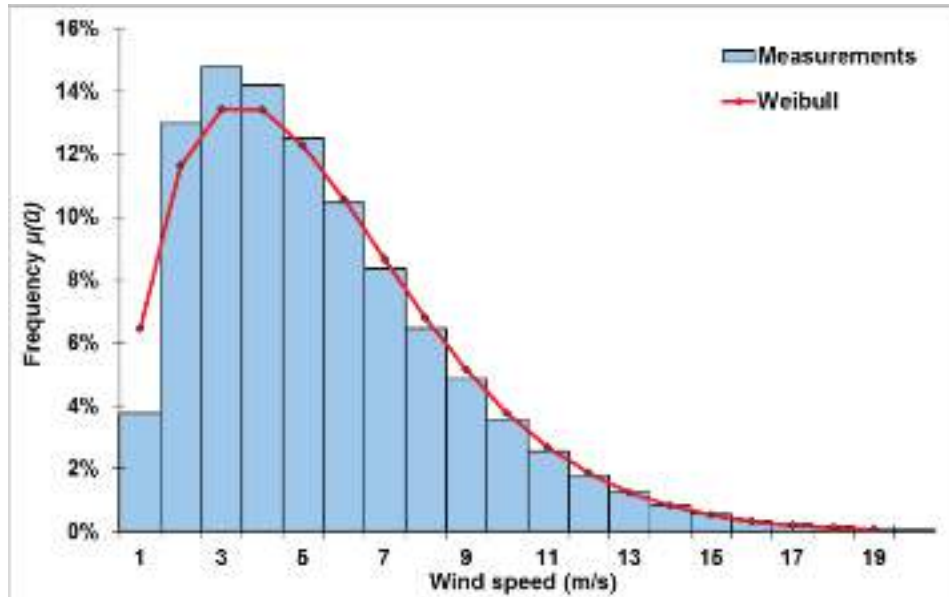
Η παράμετρος c υπολογίζεται ως :

$$c = \frac{2}{\sqrt{\pi}} v_{\text{mean}}, \text{ για } k = 2, \Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi}$$

Ο υπολογισμός της διασποράς της ταχύτητας του ανέμου δίνεται από τη σχέση :

$$\sigma^2 = c^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \left(\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right)^2 \right]$$

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η πιθανοτική κατανομή Weibull για την μέση ταχύτητα του ανέμου.



Σχήμα 6.1 : Πιθανοτική κατανομή Weibull για την μέση ταχύτητα του ανέμου (πηγή :
Διπλωματική εργασία, Κατσαρός Νικόλαος, 2019)

5.2 MEASNET

Το MEASNET είναι δίκτυο από ινστιτούτα μετρήσεων που έχει δημιουργηθεί με στόχο την εξασφάλιση της σωστής διαδικασίας μετρήσεων που σχετίζονται με την αιολική ενέργεια. Τα ινστιτούτα MEASNET λειτουργούν με μετρήσεις και υπολογισμούς σχετικά με την αιολική ενέργεια. Κάθε ινστιτούτο πρέπει να τεκμηριώνει την ποιότητα των μετρήσεων για την εφαρμογή 'διαδικασιών MEASNET'.

Σύμφωνα με το IEC 61400-1, οι συγκεκριμένες τοποθεσίες μπορούν να κατανεμηθούν σε συνθήκες ανέμου, περιβαλλοντικές συνθήκες, συνθήκες εδάφους και ηλεκτρικές συνθήκες.

Η διαδικασία αξιολόγησης του χώρου περιλαμβάνει τη συλλογή (μέτρηση), την επεξεργασία (αξιολόγηση) και ερμηνεία μετεωρολογικών δεδομένων. Απαιτεί χρόνο για να ολοκληρωθεί και πρέπει, ανάλογα με το αποτέλεσμα της κάθε φάσης, να επανεξετάζεται και να τροποποιείται συνεχώς. Η διαδικασία χωρίζεται σε δύο φάσεις, στη

μέτρηση (επιτόπια μέτρηση των συνθηκών ανέμου και τεκμηρίωση τους) και στην αξιολόγηση και παρέκταση δεδομένων (τεκμηρίωση και παραγωγή αποτελεσμάτων).

5.3 Εισαγωγή Δεδομένων

Για την αξιολόγηση των 'ειδικών συνθηκών' ανέμου θα πρέπει να είναι διαθέσιμα συγκεκριμένα δεδομένα και πληροφορίες εισόδου. Συγκεκριμένα, προκειμένου να επιτευχθεί σωστή αξιολόγηση των συνθηκών ανέμου, πραγματοποιείται επίσκεψη στο χώρο στην οποία αξιολογούνται πληροφορίες σχετικά με τις συντεταγμένες του χώρου, τις ορογραφικές συνθήκες, τις πανοραμικές φωτογραφίες, τις συνθήκες τραχύτητας εδάφους, την παρουσία εμποδίων, τις συντεταγμένες του ιστού μέτρησης και τον εξοπλισμό μέτρησης.

Τα τοπογραφικά δεδομένα αποτελούν τη βάση για τη δημιουργία του ψηφιακού τοπογραφικού μοντέλου. Τα κύρια δεδομένα εισαγωγής της διαδικασίας αξιολόγησης τοποθεσίας είναι δεδομένα μέτρησης σχετικά με μετεωρολογικές παραμέτρους τα οποία αποτελούν είσοδο για διαδικασίες υπολογισμού και παρέκτασης τους σε σχετικές θέσεις και ύψη. Οι παράμετροι που απαιτούνται ως είσοδος για την διαδικασία είναι η ταχύτητα του ανέμου, η κατεύθυνση του και η αναταραχή (τυπική απόκλιση ταχύτητας ανέμου). Για την διαδικασία απαιτούνται επίσης η θερμοκρασία και η πίεση του αέρα, η υγρασία και η κλίση ροής.

Για τη σωστή αντιπροσωπευτικότητα των μετρήσεων ανέμου, το ύψος του πρωτογενούς επίπεδου μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου πρέπει να είναι τουλάχιστον τα 2/3 του ύψους πλήμνης της ανεμογεννήτριας που θα εγκατασταθεί. Τα ύψη μέτρησης που είναι πλησιέστερα στο ύψος πλήμνης μειώνουν την αβεβαιότητα της παρέκτασης των συνθηκών ανέμου. Η ακτίνα γύρω από την οποία ο ιστός πραγματοποιεί αντιπροσωπευτικές μετρήσεις ονομάζεται ακτίνα αντιπροσωπευτικότητας. Όλες οι ανεμογεννήτριες πρέπει να βρίσκονται εντός της ακτίνας αντιπροσωπευτικότητας τουλάχιστον ενός ιστού. Για διάφορες τάξεις εδάφους (απλό έδαφος, περίπλοκο ορεινό έδαφος) η ακτίνα αντιπροσωπευτικότητας διαφέρει.

Στον πίνακα 5.1 παρουσιάζονται οι κατηγορίες εδάφους και οι απαιτήσεις μέτρησης που πρέπει να πληρούνται σε κάθε κατηγορία.

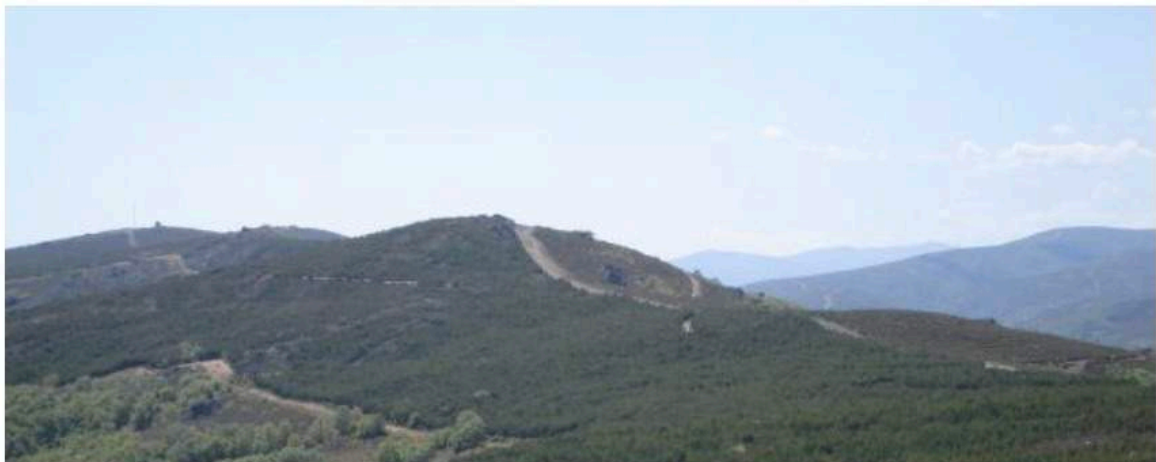
Πίνακας 5.1 Ορισμός των απαιτήσεων μέτρησης για διαφορετικές κατηγορίες εδάφους.

Terrain type	Minimum measurement height	Representativeness radius of a mast (max. distance of any wind turbine to the next mast)
Simple terrain (Figure 2)	2/3 hub height	10 km
Complex terrain (Figure 3)	2/3 hub height	2 km

Παρακάτω απεικονίζεται ένα απλό έδαφος (εικ.7.1) και ένα περίπλοκο έδαφος(εικ.7.2).



Εικόνα 7.1 Παράδειγμα απλού εδάφους όπως ορίζεται από τις οδηγίες.



Εικόνα 7.2 Παράδειγμα περίπλοκου εδάφους όπως ορίζεται από τις οδηγίες.

Οι παραπάνω ακτίνες αντιπροσωπευτικότητας ισχύουν για ομοιογενείς συνθήκες τραχύτητας. Για μη ομοιογενείς συνθήκες τραχύτητας στη περιοχή του αιολικού πάρκου η ακτίνα αντιπροσωπευτικότητας δεν ισχύει για όλες τις κατευθύνσεις διότι οι μετρήσεις των ιστών επηρεάζονται από τις διαφορετικές τιμές τραχύτητας του εδάφους.

Η τεκμηρίωση της μέτρησης περιλαμβάνει πτυχές όπως θέση της μέτρησης, εξοπλισμός μέτρησης, ιστορικό μετρήσεων, δεδομένα μέτρησης. Κενά στη τεκμηρίωση της μέτρησης οδηγούν σε αυξημένες αβεβαιότητες της μέτρησης.

Όσον αφορά τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου πραγματοποιείται σύμφωνα με το IEC 61400-12-1 και τα ανεμόμετρα πρέπει να βαθμονομούνται σύμφωνα με την οδηγία MEASNET κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Μία μέτρηση με βάση το ανεμόμετρο είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί με μετρήσεις τηλεπισκόπησης, προκειμένου να γίνει προέκταση της μέτρησης του ανέμου σε άλλα ύψη (κοντά στο ύψος της πλήμνης), λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα. Το άνω ανεμόμετρο τοποθετείται σε έναν κάθετο σωλήνα σύμφωνα με IEC 61400-12-1. Το επίπεδο της πρωτογενούς μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου πρέπει να είναι τουλάχιστον τα $2/3$ του προγραμματισμένου ύψους πλήμνης. Το πρωτεύον ανεμόμετρο πρέπει να έχει εγκατεστημένο ένα εφεδρικό αισθητήρα ώστε να επιτρέπεται η σύγκριση και συμπλήρωση των κενών δεδομένων. Ένα πρόσθετο ανεμόμετρο, με διαφορά τουλάχιστον 20 μέτρων στο ύψος μέτρησης, πρέπει να χρησιμοποιείται ώστε να προσδιοριστεί το προφίλ ανέμου και να εκτιμηθεί η διάτμηση ανέμου. Τα σημαντικά ύψη είναι εκείνα που βρίσκονται εντός της περιοχής σάρωσης του ρότορα.

Εξίσου σημαντικό είναι οι βραχίονες του ανεμομέτρου να είναι προσανατολισμένες προς την ίδια κατεύθυνση. Εάν η κατεύθυνση του επικρατέστερου ανέμου είναι γνωστή τότε οι βραχίονες πρέπει να εγκατασταθούν σε απόσταση 45 μοιρών από τον επικρατέστερο άνεμο (για σωληνοειδούς ιστούς), ή 90 μοιρών (κατεύθυνση για ιστούς πλέγματος) και κανένα άλλο όργανο δεν πρέπει να εγκατασταθεί στον ίδιο βραχίονα. Επιπλέον, οι ταχύτητες ανέμου μετριοούνται ως δεκάλεπτα και η περίοδος μέτρησης καλύπτει τουλάχιστον 12 πλήρεις και διαδοχικούς μήνες για τουλάχιστον ένα ιστό. Εάν είναι διαθέσιμα δεδομένα από περισσότερους από ένα ιστούς τότε θα γίνει συσχέτιση των

δεδομένων προκειμένου να παραταθεί η περίοδος μέτρησης κάθε ιστού και να καλυφθούν τα κενά δεδομένων.

Η επαναβαθμονόμηση των ανεμομέτρων θα πρέπει να πραγματοποιείται μετά από 12 μήνες.

Όσον αφορά την κατεύθυνση του ανέμου η μέτρηση της πραγματοποιείται με ανεμοδείκτες τοποθετημένους σε ξεχωριστούς βραχίονες σύμφωνα με IEC 61400-12-1[4]. Κατά την επιλογή του ύψους μέτρησης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν ότι τα πιο σημαντικά ύψη είναι τα ύψη εντός της περιοχής σάρωσης του ρότορα ενώ κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης θα πρέπει να πραγματοποιείται ευθυγράμμιση του ανεμοδείκτη.

Η μέτρηση των δύο παραπάνω συνιστωσών θεωρείται ελλιπής όταν η περίοδος της μέτρησης για κάθε ιστό δεν καλύπτει 12 διαδοχικούς μήνες τουλάχιστον, όταν η διαθεσιμότητα των δεδομένων από το βασικό και τον εφεδρικό αισθητήρα είναι μικρότερη από 90% και όταν η διαθεσιμότητα των δεδομένων που συμπληρώνονται με MCP μεθόδους είναι μικρότερη από 95%.

Για τοποθεσίες όπου αναμένονται ακραίες θερμοκρασίες συνιστάται η μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα. Ένας αισθητήρας τοποθετείται σε ύψος χαμηλότερο των 10 μέτρων στον ιστό μέτρησης.

Η μέτρηση της βαρομετρικής πίεση του αέρα πραγματοποιείται κατά προτίμηση κοντά στο κέντρο της πλήμνης. Σε διαφορετική περίπτωση η μετρήσεις πρέπει να διορθώνονται στο ύψος της πλήμνης σύμφωνα με ISO 2533. Συνίσταται επίσης, μέτρηση της υγρασίας σε τοποθεσίες με ακραίες κλιματικές συνθήκες. Ο αισθητήρας υγρασίας πρέπει να τοποθετηθεί σε ύψος χαμηλότερο των 10 μέτρων στον ιστό μέτρησης.

Θα πρέπει να πραγματοποιείται παρέκταση της θερμοκρασίας, πίεσης και υγρασίας με την προϋπόθεση ότι είναι διαθέσιμα μακροπρόθεσμα δεδομένα για να προσδιοριστεί η μέση μακροπρόθεσμη θερμοκρασία, πίεση και υγρασίας του αέρα στη τοποθεσία.

5.4 Αξιολόγηση και παρέκταση των δεδομένων

Κατά τη διαδικασία αξιολόγησης της τοποθεσίας τα μετρούμενα δεδομένα πρέπει να αξιολογηθούν και να παρεκταθούν σε μακροπρόθεσμες περιόδους και στις θέσεις των

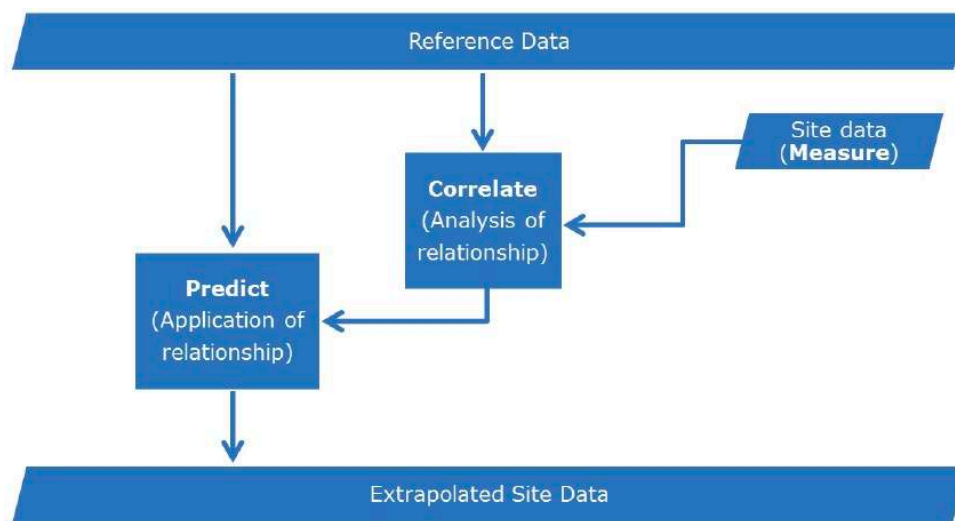
ανεμογεννητριών. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης εξαρτώνται από τα δεδομένα μέτρησης που εισάχθηκαν, επομένως λαμβάνεται υπόψη η ακεραιότητα των δεδομένων εισαγωγής. Σε καταστάσεις όπου η επεξεργασία δεδομένων είναι ασαφής και τα δεδομένα μέτρησης δε μπορούν να επαληθευτούν, δεν είναι δυνατή η εκτίμηση της αβεβαιότητας.

Η αξιολόγηση της ποιότητας των δεδομένων αποτελεί το πρώτο βήμα αξιολόγησης και στοχεύει στον εντοπισμό και την εξάλειψη σημαντικών σφαλμάτων και στη συνολική αξιολόγηση της ποιότητας των δεδομένων. Η αξιολόγηση των δεδομένων των σχετικών αισθητήρων πρέπει να γίνεται μεμονωμένα στη τοποθεσία. Η αξιολόγηση των δεδομένων φέρει ως κύρια συνέπεια την απόρριψη ορισμένων τιμών δεδομένων τα οποία θα οδηγήσουν σε κενά. Τα κενά των δεδομένων μπορούν να εισάγουν σφάλματα στη μέτρηση. Έτσι, πρέπει να καλυφθούν με ανακατασκευή των δεδομένων για να γίνει αύξηση της διαθεσιμότητας τους από τους σχετικούς αισθητήρες (ταχύτητας ανέμου, κατεύθυνσης ανέμου, πίεσης, υγρασίας κ.λπ.). Η συμπλήρωση των δεδομένων (data filling) εκτός από μέσες τιμές μπορεί να σχετίζεται και με άλλες ιδιότητες (τυπική απόκλιση, μέγιστη τιμή κ.α.). Για τη συμπλήρωση των δεδομένων συνήθως εφαρμόζονται οι διαδικασίες MCP (Measure-Correlate-Predict) οι οποίες είναι προτιμότερο να εφαρμόζονται με βάση παρόμοια σύνολα δεδομένων (π.χ. δεδομένα από δύο ανεμόμετρα στον ίδιο ιστό με μικρές αποκλίσεις ύψους).

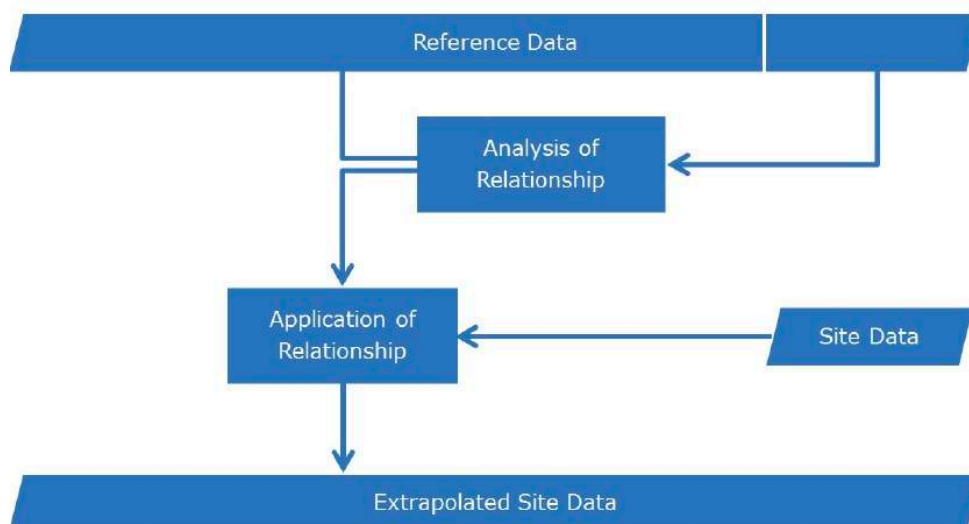
Τα αποτελέσματα μιας μέτρησης ανέμου σε μία τοποθεσία ισχύουν μόνο για τη περίοδο της μέτρησης, η οποία είναι μία περίοδος ενός ή λίγων ετών. Ωστόσο επειδή η κατανομή της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου μπορεί να δείξει ξεχωριστές εποχιακές παραλλαγές είναι απαραίτητη μια βάση δεδομένων πολλών ετών για αξιοπιστία των μέσων συνθηκών ανέμου και αντιπροσωπευτικές τιμές για μέσες συνθήκες ανέμου. Βασίζεται στη υπόθεση ότι υπάρχει μια σταθερή μέση τιμή ανέμου που μπορεί να προέλθει από ιστορικά δεδομένα και αυτή η μέση τιμή αντιπροσωπεύει την καλύτερη εκτίμηση για τις μελλοντικές συνθήκες ανέμου. Στόχος της μακροχρόνιας παρέκτασης είναι να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ των δεδομένων ανέμου της τοποθεσίας και των δεδομένων αναφοράς για την εφαρμογή μίας σχέσης μακροπρόθεσμης παρέκτασης των δεδομένων της τοποθεσίας. Τα αναλυόμενα δεδομένα πρέπει να έχουν υψηλή χρονική ανάλυσης (δεκάλεπτες ή ωριαίες χρονοσειρές).

Για τον προσδιορισμό των μακροπρόθεσμων συνθηκών ανέμου εφαρμόζεται συνήθως το MCP το οποίο λαμβάνει υπόψη τα δεδομένα μέτρησης (δεδομένα τοποθεσίας) και τα μακροπρόθεσμα δεδομένα (δεδομένα αναφοράς), τα συγκρίνει και η πρόβλεψη συνίσταται στην εφαρμογή σχέσεων για την παρέκταση των βραχυπρόθεσμων δεδομένων σε μακροπρόθεσμη βάση.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η διαδικασία μέτρησης-συσχέτισης-πρόβλεψης(σχ.7.1) και η διαδικασία μακροπρόθεσμης παρέκτασης.



Σχήμα 5.1 Διαδικασία μέτρησης-συσχέτισης-πρόβλεψης



Σχήμα 5.2 : Διαδικασία της μακροπρόθεσμης παρέκτασης

Ανάλογα με τις ιδιότητες της τοποθεσίας εφαρμόζονται διαφορετικοί μέθοδοι MCP με κυριότερες την τομεακή παλινδρόμηση MCP, όπου τα δεδομένα αναλύονται σε

διαφορετικούς τομείς κατεύθυνσης ανέμου σε σχέση με μια γραμμική ή μη σχέση, και το MCP Matrix, όπου τα ταυτόχρονα δεδομένα ταξινομούνται ανάλογα με τη ταχύτητα και την κατεύθυνση του ανέμου. Επίσης εφαρμόζονται διαφορετικοί μέθοδοι μακροπρόθεσμης κλιμάκωσης με κυριότερες την μέθοδο δείκτη ανέμου, όπου από τα δεδομένα αναφοράς προκύπτει μία τιμή δείκτη η οποία αντιπροσωπεύει την ταχύτητα του ανέμου που μπορεί να βασίζεται εμπειρικά καθορισμένες σχέσεις, και την μέθοδο κλιμάκωσης κατανομής όπου εφαρμόζονται μακροπρόθεσμες παρεκβολές στις παραμέτρους κατανομής του ανέμου (τομεακές παράμετροι Weibull A και k και συχνότητα κατανομή).

Η περίοδος για των προσδιορισμό των παραμέτρων συσχέτισης πρέπει να είναι τουλάχιστον ένα έτος προκειμένου να καλυφθούν όλες οι εποχιακές διακυμάνσεις ειδικά αν η παρέκταση δε μπορεί να γίνει βάση χρονοσειρών και οι διαφορές μεταξύ της βραχυπρόθεσμης μέτρησης και του δεδομένων αναφοράς του ιστού είναι μεγάλες. Σε περιπτώσεις όπου μπορούν να βρεθούν σημαντικές σχέσεις συσχέτισης των δεδομένων η διαδικασία παρέκτασης επικυρώνεται ακόμη και για μικρές περιόδους.

Η διάρκεια της περιόδου των δεδομένων αναφοράς θα πρέπει να είναι όσο τον δυνατόν μεγαλύτερη (περίοδος περίπου 30 ετών θεωρείται αντιπροσωπευτική). Ωστόσο η περίοδος ενδέχεται να περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία των δεδομένων.

Για παρέκταση των δεδομένων ανέμου απαιτείται μοντελοποίηση του αιολικού πεδίου στη θέση και το ύψος των ανεμογεννητριών. Αναλυτικότερα, γίνεται επαλήθευση του μοντέλου, το οποίο θα πρέπει να είναι ικανό να περιγράψει, να λειτουργεί σύμφωνα με τις προδιαγραφές και να εξετάζεται η καταλληλότητα των απλουστεύσεων μοντέλου. Το μοντέλο χρησιμοποιεί τα δεδομένα εισόδου που είναι διαθέσιμα και επηρεάζουν σημαντικά τις συνθήκες του ανέμου (τραχύτητα, εμπόδια, τύπος βλάστησης, ύψος) και επικυρώνεται έναντι των διαθέσιμων δεδομένων μέτρησης όσο το δυνατόν περισσότερο για τη δυνατότητα εφαρμογής, την εξαγωγή εκτιμήσεων για την αξιολόγηση αβεβαιότητας. Γενικότερα η μοντελοποίηση ροής λαμβάνει υπόψη όλα τα δεδομένα μέτρησης που είναι διαθέσιμα και συμβάλλουν στη μείωση της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων. Η συνολική αβεβαιότητα αξιολογείται από ένα συνδυασμό των

επιμέρους στοιχείων. Εάν τα στοιχεία αβεβαιότητας είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους η συνολική αβεβαιότητα προκύπτει από τη τετραγωνική ρίζα των αθροισμένων τετραγώνων των επιμέρους στοιχείων αβεβαιότητας ενώ σε διαφορετική περίπτωση τα στοιχεία αβεβαιότητας μπορούν να συσχετιστούν πλήρως με άθροισμα των επιμέρους στοιχείων αβεβαιότητας (π.χ. ταχύτητα ανέμου, κατεύθυνση ανέμου, πυκνότητα αέρα, συσχέτιση και μακροπρόθεσμη παρέκταση, μοντελοποίηση ροής, μετρήσεις).

5.5 Αποτελέσματα αξιολόγησης τοποθεσίας και ενεργειακής απόδοσης

5.5.1 Αποτελέσματα αξιολόγησης τοποθεσίας

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την αξιολόγησης δεδομένων προέκυψαν συμπεράσματα συναφή με τις συγκεκριμένες συνθήκες για την τοποθεσία. Συγκεκριμένα, οι συνθήκες ανέμου προέρχονται από την αξιολόγηση δεδομένων για τη θέση και το ύψος πρήμνης της ανεμογεννήτριας και η εκατοστιαία αβεβαιότητα για τις παραγόμενες μέσες ταχύτητες ανέμου θα πρέπει να έχει καθοριστεί. Επιπλέον από την μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα και της πίεσης της ατμόσφαιρας προκύπτει ο υπολογισμός της πυκνότητας του αέρα σύμφωνα με το IEC 61400-12-1 [4]. Εξίσου σημαντικός είναι και ο υπολογισμός της έντασης αναταραχής (turbulence intensity, TI) ο οποίος προκύπτει από το τυπική απόκλιση της ταχύτητας του ανέμου προς τη μέση ταχύτητα του ανέμου στη διάρκεια ενός δεκαλέπτου. Για τον υπολογισμό αυτό, η ταχύτητα στο ύψος της πλήμνης προέρχεται από τη μοντελοποίηση ροής ανέμου με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα μέτρησης και αφορά τις θέσεις μέτρησης και στο ύψος της μέτρησης και για τις θέσεις των ανεμογεννητριών στο ύψος της πλήμνης.

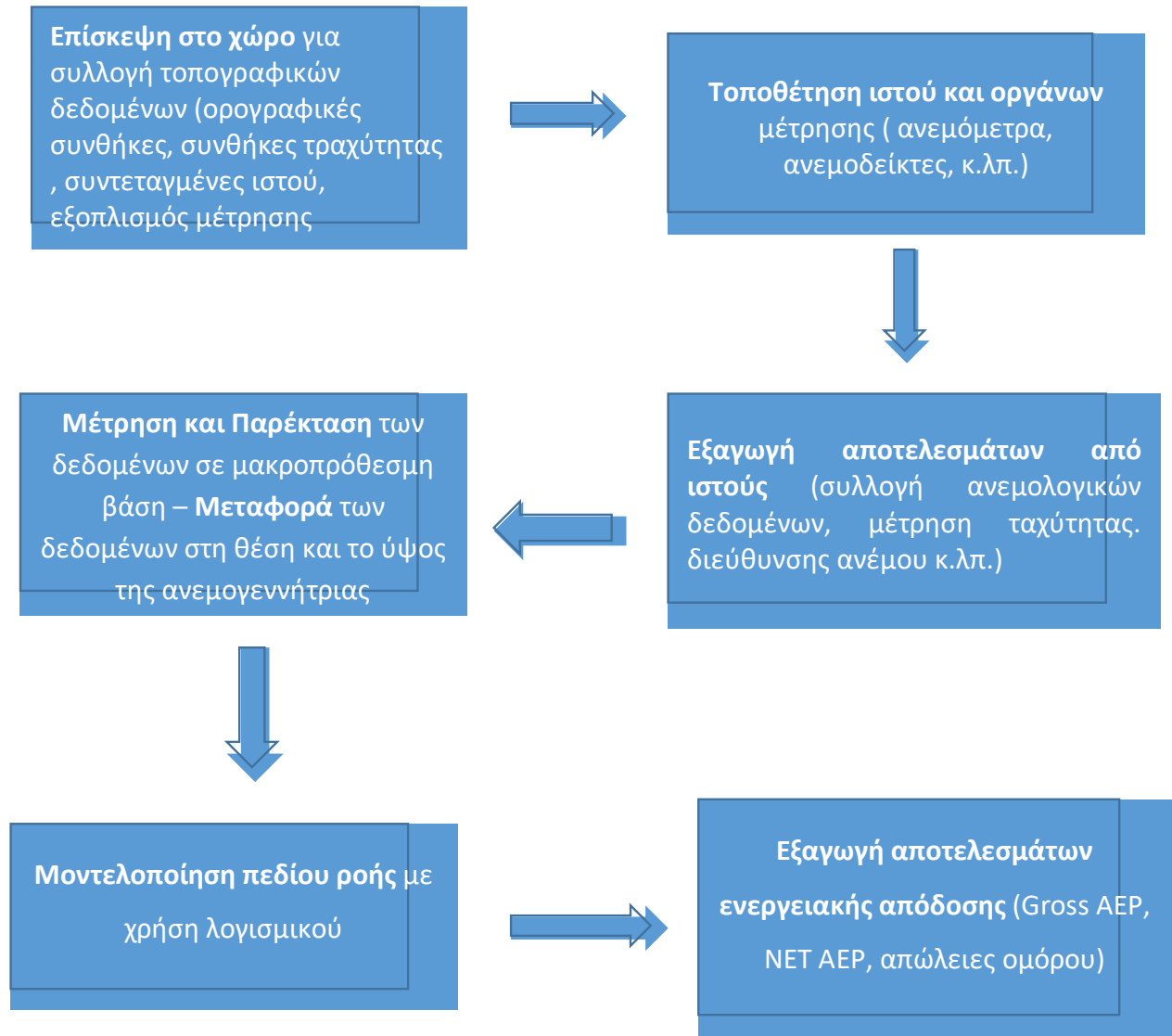
Όσον αφορά τον εκθέτη διάτμηση του αέρα a μεταξύ δύο δεδομένων υψών προκύπτει από τον ακόλουθο τύπο :

$$a = \frac{\ln \frac{v_1}{v_2}}{\ln \frac{z_1}{z_2}}$$

Όπου,

a είναι ο εκθέτης διάτμησης του αέρα, v_1 και v_2 , οι ταχύτητες του αέρα στα ύψη z_1 και z_2 αντίστοιχα.

Ο εκθέτης διάτμησης αέρα για κάθε θέση ανεμογεννήτριας πρέπει να προέρχεται από τα αποτελέσματα μοντελοποίησης ροής ανέμου με βάση της υπάρχουσες μετρήσεις.



Σχήμα 5.3 : Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας εξαγωγής αποτελεσμάτων.

5.5.2 Αξιολόγηση ενεργειακής απόδοσης

Ύστερα από ανάλυση και παρέκταση των δεδομένων ανέμου σε μακροπρόθεσμη βάση προκύπτει ένα “κλίμα ανέμου της τοποθεσίας” που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος στη μοντελοποίηση πεδίου ροής το οποίο οδηγεί σε χαρακτηρισμό των συνθηκών ανέμου στο ύψος της πλήμνης των ανεμογεννητριών. Συνδέοντας αυτές τις συνθήκες με τα

χαρακτηριστικά παραγωγής ισχύος της ανεμογεννήτριας προκύπτει η ακαθάριστη ενεργειακή απόδοση για τις ανεμογεννήτριες και το αιολικό πάρκο. Για να παραχθεί η καθαρή ενεργειακή απόδοση θα πρέπει να καθοριστούν οι απώλειες ωμώρου και οι συστηματικές απώλειες λειτουργίας του αιολικού πάρκου. Η καθαρή ενεργειακή απόδοση συχνά δίνεται σε τιμές πιθανότητας υπέρβασης (P_x) οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις ενεργειακές απόδοσης για δεδομένη αβεβαιότητα πεδίου και για διαφορετική επίπεδα κινδύνου. Οι τρεις βασικές εισοδοι που απαιτούνται για την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης είναι η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας (παρέχονται από τον κατασκευαστή), οι συνθήκες ταχύτητας ανέμου στο ύψος της πλήμνης και η πυκνότητα του αέρα στο ύψος της πλήμνης.

Η ακαθάριστη ενεργειακή απόδοση (AEP_{gross}) ορίζεται ως η ετήσια παραγωγή ενός αιολικού πάρκου χωρίς τις απώλειες ωμώρου ή άλλες συστηματικές λειτουργικές απώλειες.

Το AEP_{gross} ορίζεται ως:

$$AEP_{gross} = \sum_i P(v_i) \cdot H_i \quad \text{όπου,}$$

$P(v_i)$ = έξοδος ισχύος για κάθε διάστημα ταχύτητας ανέμου i και

H_i = ο αριθμός ωρών σε ένα χρόνο για κάθε διάστημα ταχύτητας ανέμου.

Για τον υπολογισμό της ακαθάριστης ενεργειακής απόδοσης είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν χρονοσειρές των δεδομένων ανέμου, με εφαρμογή σε αυτές την καμπύλη ισχύος. Η τιμή του AEP_{gross} θα πρέπει να υπολογίζεται ξεχωριστά για τις ανεμογεννήτριες (θέση και ύψος πλήμνης) και μπορεί να υπολογιστεί στο ύψος μέτρησης και στο ύψος πλήμνης για συγκρίσεις. Το ολικό AEP_{gross} για το αιολικό πάρκο υπολογίζεται ως το άθροισμα του AEP_{gross} κάθε ανεμογεννήτριας.

Αν στην AEP_{gross} συμπεριληφθούν και οι μειώσεις της απόδοσης ενέργειας που προκαλούνται από τις απώλειες ομώρου ή από συστηματικές λειτουργικές απώλειες που συμβαίνουν κατά τη λειτουργία του πάρκου τότε προκύπτει η καθαρή ενεργειακή απόδοση (AEP_{net}) που ορίζεται ως :

$$AEP_{net} = AEP_{gross} \cdot \eta_{total}$$

Όπου, η_{total} είναι ο συνολικός συντελεστής απωλειών.

5.5.3 Είδη απωλειών

Υπάρχουν πολλών ειδών απώλειες στη κανονική λειτουργία ενός αιολικού πάρκου. Συγκεκριμένα από τις πιο σημαντικές απώλειες είναι οι απώλειες ωμώρου. Πρόκειται για μείωση της εκτιμώμενης ενεργειακής απόδοσης μιας ανεμογεννήτριας ή ενός αιολικού πάρκου που προκαλείται από την παρουσία κοντινών ανεμογεννητριών. Τα εφέ όμορου συνήθως μοντελοποιούνται ξεχωριστά χρησιμοποιώντας ένα μοντέλου όμορου αλλά μπορεί να είναι και μέρος της γενικής μοντελοποίησης ροής του εδάφους. Για να υπολογισμό των απωλειών όμορου μίας ανεμογεννήτριας λαμβάνονται υπόψη όλες οι ανεμογεννήτριες που βρίσκονται σε ακτίνα το πολύ 20 διαμέτρων ρότορα (με τη μεγαλύτερη διάμετρο) ενώ για μεγάλα αιολικά πάρκα αυτή η ακτίνα μοντελοποίησης πρέπει να επεκταθεί. Οι απώλειες όμορου πρέπει να δίνονται για κάθε ανεμογεννήτρια του αιολικού πάρκου.

Ένας ακόμη λόγος δημιουργίας απωλειών είναι η μη διαθεσιμότητα ανεμογεννητριών λόγω σημαντικών βλαβών ή προγραμματισμένης συντήρησης ή ακόμη αστοχιών των εξαρτημάτων τους. Απώλειες λόγω διακοπής λειτουργίας του δικτύου ισχύος εκτός της εγκατάστασης θεωρούνται απώλειες διαθεσιμότητας δικτύου. Επίσης κατά τη λειτουργία του αιολικού πάρκου μπορεί να προκληθούν απώλειες διότι η απόδοση των ανεμογεννητριών δεν είναι ιδανική, δηλαδή, δεν παράγει την καμπύλη ισχύος αναφοράς ή τις κανονικές συνθήκες για την τοποθεσία (διάτμηση ανέμου, αναταράξεις κ.α.) καθώς και ηλεκτρικές απώλειες. Οι ηλεκτρικές απώλειες εξαρτώνται από το σχεδιασμό του δικτύου σύνδεσης καλύπτουν απώλειες από τους μετασχηματιστές, τις καλωδιώσεις, μετάδοση και απώλειες λόγω παρασιτικών καταναλώσεων εντός του δικτύου σύνδεσης.

Επιπλέον, είναι προφανές ότι κατά τη διάρκεια ζωής της μία ανεμογεννήτρια θα αντιμετωπίσει περιβαλλοντικές επιπτώσεις οι οποίες επηρεάζουν την παραγωγή ισχύος. (π.χ. απώλειες λόγω βρωμιάς, εντόμων και γήρανσης του υλικού στις λεπίδες του ρότορα, απώλειες λόγω θερμοκρασίας περιβάλλοντος εκτός των προδιαγραφών που έχει σχεδιαστεί η ανεμογεννήτριας.

Οι συστηματικές λειτουργικές απώλειες πρέπει να αναφέρονται σε μορφή πίνακα. Επιπλέον, κατά το συνδυασμό διαφορετικών μορφών απώλειας πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι αλληλεξαρτήσεις. Μετά την αντιμετώπιση των αλληλεξαρτήσεων, οι

ποσοστιαίες απώλειες πρέπει να μετατραπούν σε απόδοση η και σε συνδυασμό με τον πολλαπλασιασμό των υπόλοιπων αποδόσεων $\eta_1, \eta_2, \eta_3, \dots, \eta_i$

$$\eta_{\text{total}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \dots \cdot \eta_i$$

όπου, $\eta_i = 1 - \text{loss}_i$, εκφρασμένο ως κλάσμα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΙΟΛΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ

6.1 Ανεμογεννήτριες (Α/Γ)

Παρακάτω απεικονίζεται μία ανεμογεννήτρια τριών πτερυγίων.



Εικόνα 6.1 Συνηθέστερη μορφή ανεμογεννήτριας ,ρότορας τριών πτερυγίων (πηγή : https://el.wikipedia.org/wiki/Ανεμογεννήτρια#/media/Αρχείο:Schuelp_bilderbuchwindraeder.JPG).

Η εκμετάλλευση και αξιοποίηση της ενέργειας του ανέμου γίνεται από μηχανές που ονομάζονται ανεμογεννήτριες. Στόχος των ανεμογεννητριών είναι η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του αέρα σε χρησιμοποιούμενη ηλεκτρική ενέργεια. Η κινητική ενέργεια μετατρέπεται αρχικά σε μηχανική ενέργεια στο ρότορα και αργότερα σε

ηλεκτρική ενέργεια. Επομένως, για να πραγματοποιηθεί αυτή η μετατροπή ενέργειας καλείται να γίνει κατάλληλος σχεδιασμός οικονομικά αποδοτικών ανεμογεννητριών. Ο σχεδιασμός αυτός επικεντρώνεται στην αύξηση, κατά το μέγιστο δυνατό, της δέσμευσης ενέργειας των ανέμων καθώς και στην μείωση του κόστους. Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας εξαρτάται από το μέγεθος της αλλά και από την ταχύτητα του ανέμου. Το μέγεθος ποικίλει από εκατοντάδες μέχρι και εκατομμύρια βατ. Πολλές ανεμογεννήτριες μαζί συγκροτούν ένα αιολικό πάρκο και τροφοδοτούν με ενέργεια το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Ουσιαστικά μία ανεμογεννήτρια, λόγω της χρησιμοποίησης του ανέμου από τους έλικες, είναι ένας αντίστροφος ανεμιστήρας. Οι έλικες με διπλάσιο μήκος πτερυγίων παράγεται τετραπλάσια ισχύ, επομένως αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα μέλη της ανεμογεννήτριας.

6.2 Κατηγορίες ανεμογεννητριών

Στην εικόνα 5.2 (α) παρουσιάζεται μία ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα ενώ στην εικόνα 5.2 (β) μία ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα.



(α)



(β)

Εικόνα 6.2 :Τύποι αιολικών μηχανών (α) Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα, (β) Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα (πηγή : οικονομική μελέτη αιολικού πάρκου, Μπαρμπάρηγου Μυρτώ, 2011)

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ανεμογεννητριών. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι είναι οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (horizontal axis wind turbine HAWT) και οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα (vertical axis wind turbine VAWT). Η βασική διαφορά τους αναφέρεται στον άξονα περιστροφής των πτερυγίων. Τα πτερύγια στις οριζοντίου άξονα περιστρέφονται με άξονα περιστροφής παράλληλο με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους και ο δρομέας τους είναι τύπου έλικα (η ροή του αέρα πάνω από τις λεπίδες σε σχήμα αεροτομής δημιουργεί μια ανυψωτική δύναμη που γυρίζει του ρότορα), σε αντίθεση με τις κάθετου άξονα ανεμογεννήτριες που περιστρέφονται με άξονα περιστροφής κάθετο προς την επιφάνεια της γης και τα πτερύγια τους πηγαίνουν από πάνω προς τα κάτω.

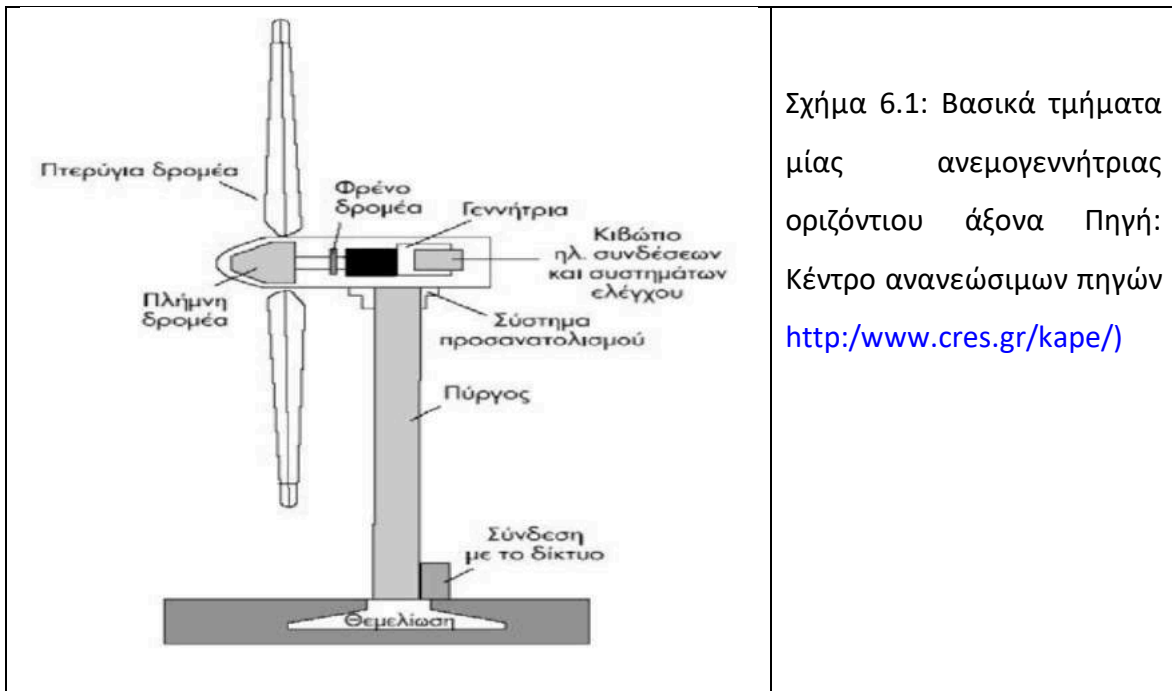
Οι οριζοντίου άξονα ανεμογεννήτριες χαρακτηρίζονται από τον αριθμό των πτερυγίων τους. Οι ανεμογεννήτριες με ένα πτερύγιο ονομάζονται μονόπτερες, με δύο δίπτερες, με τρία τρίπτερες και με περισσότερα από τρία πολύπτερες. Μια χαρακτηριστική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα είναι περίπου εξήντα μέτρα και έχει τρία πτερύγια. Μία τυπική ανεμογεννήτρια κάθετου άξονα έχει ύψος περίπου τριάντα μέτρα και πλάτος περίπου δεκαπέντε μέτρα. Στην αγορά επί το πλείστον επικρατούν οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (με δύο ή τρία πτερύγια), αποδίδοντας ισχύ 200 με 400 κιλοβάτ, διότι έχουν πιο υψηλό βαθμό απόδοσης περίπου 35 με 40 τοις εκατό σε αντίθεση με τις κάθετες ανεμογεννήτριες που έχουν βαθμό απόδοση περίπου 15 τοις εκατό, αποδίδοντας ισχύ 200 με 400 κιλοβάτ. Επίσης ένα ακόμη πλεονέκτημα τους είναι ότι είναι πιο σταθερές αφού το αεροδυναμικό τους φορτίο μοιράζεται ομοιόμορφα ενώ το μηχανικό ισορροπείται.

Οι σύγχρονες κάθετες ανεμογεννήτριες είναι τύπου Savonius και Darrieus. Η διαφορά τους είναι ότι οι πρώτες ξεκινάνε πιο εύκολα αλλά δεν είναι τόσο αποδοτικές σε αντίθεση με τις Darrieus που ξεκινάνε πιο δύσκολα αλλά είναι αρκετά αποδοτικές.

Οι ανεμογεννήτριες επίσης κατατάσσονται σε αργόστροφες και ταχύστροφες ανάλογα με τη ταχύτητα περιστροφής τους η οποία εξαρτάται από το μέγεθος των πτερυγίων αλλά και από τις αεροδυναμικές παραμέτρους.

6.3 Βασική δομή ανεμογεννητριών

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται τα βασικά τμήματα μίας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα.



Όπως προαναφέρθηκε ρόλος μίας ανεμογεννήτριας είναι η μετατροπή της ενέργειας στο εύρος του ανέμου σε μηχανική και στη συνέχεια μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Στις βιομηχανίες διατίθενται πολλοί τύποι ανεμογεννητριών. Παρά όλα αυτά μοιράζονται τα ίδια εξαρτήματα. Συγκεκριμένα τα βασικά εξαρτήματα μιας ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα είναι τα εξής :

Ο πύργος (στήριξης) ο οποίος είναι το μεγαλύτερο και βαρύτερο μέρος. Έχει κυλινδρικό κωνικό σχήμα συνήθως κατασκευασμένος από κυλινδρικά τμήματα από χαλύβδινο σωλήνα που είναι βιδωμένα μεταξύ τους. Διακρίνονται δύο τύποι πύργων ο πύργος τύπου δικτυώματος(συμβατικής τριγωνικής στήριξης) και ο σωληνωτού τύπου πύργος (κατασκευάζεται από τσιμέντο ή από χαλυβδόφυλλα) με επικρατέστερο το δεύτερο διότι στο εσωτερικό του βρίσκεται το κουβούκλιο. Ο πύργος στηρίζει όλη την ηλεκτρομηχανική εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας. Αποτελεί 15% του ολικού κόστους περίπου. Στη βάση του είναι τοποθετημένος ο ηλεκτρονικός πίνακας και ο πίνακας ελέγχου όπου ελέγχονται όλες οι λειτουργίες της ανεμογεννήτριας. Οι υψηλοί πύργοι περιέχουν γεννήτριες που παραγάγουν περισσότερο ηλεκτρισμό διότι η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το ύψος.



Εικόνα 6.3 Τύποι πύργου ανεμογεννητριών (πύργος δικτυώματος και κυλινδρικός) (πηγή : wind turbine design and analysis Yunus Emre Ozturk,2020)

Η ανεμογεννήτρια η οποία περιλαμβάνει την ηλεκτρική γεννήτρια (σύγχρονη και ασύγχρονη εναλλασσόμενου ρεύματος και πολύ σπάνια γεννήτριες συνεχούς ρεύματος) η οποία συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού συνδέσμου που μετατρέπει την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Συνήθως παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα 60 κύκλων.

Η ταχύτητα της γεννήτριας θα πρέπει να είναι (για συχνότητα $f = 50 \text{ Hz}$) :

Για δύο ζεύγη πόλων ($p = 2$),

$$n_s = \frac{f \cdot 60}{p}$$

Και $n_s = 1500 \text{ στρ/min}$

Βρίσκεται πάνω στο πύργο της ανεμογεννήτριας. Η ανεμογεννήτρια περιλαμβάνει επίσης το σύστημα προσανατολισμού το οποίο λειτουργεί ηλεκτρικά και οδηγείται από τον ελεγκτή της Α/Γ στον ανεμοδείκτη (στην κορυφή του θαλάμου) καθώς και το κιβώτιο ταχυτήτων (gear box). Τα κιβώτια που χρησιμοποιούνται στις σημερινής τεχνολογίας ανεμογεννήτριες είναι ή πλανητικά ή παράλληλου άξονα. Τα γρανάζια συνδέουν τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας. Το κιβώτιο ταχυτήτων το οποίο

περιλαμβάνεται στο κέλυφος εκτός από πολύ βαρύ είναι και ακριβό. Για αυτό το λόγο μελετώνται ανεμογεννήτριες που θα λειτουργούν χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων και οι στρόφές τους ανά λεπτό θα είναι χαμηλότερες.

Η ανεμογεννήτρια καταλαμβάνει περίπου το 34% του κόστους. Περιέχεται επίσης το σύστημα προσανατολισμού το οποίο καθιστά αναγκαία την παράλληλη θέση του άξονα περιστροφής του δρομέα με τη διεύθυνση του ανέμου.

Επιπλέον βασικό μέρος της ανεμογεννήτριας είναι το σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας. Αποτελείται από ένα πλήθος μικροελεγκτών τοποθετημένων στην ανεμογεννήτρια. Χρήση τους είναι η παρακολούθηση και ο έλεγχος του συστήματος. Μπορεί να ανταπεξέλθει σε αντίξοες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Στόχος του συστήματος ελέγχου είναι το άνοιγμα της τουρμπίνας και το κλείσιμο της καθώς και η προσαρμογή της τουρμπίνας στην ταχύτητα που φέρει ο άνεμος. Ο ελεγκτής ξεκινά τη μηχανή όταν η ταχύτητα του ανέμου κυμαίνεται από 10-16 μίλια ανά ώρα και την σταματά στα 65 μίλια την ώρα, όριο το οποίο αν ξεπεραστεί ενδέχεται να υπάρξει υπερθέρμανση ή να σπάσουν τα πτερύγια.

Το ρότορα (τα πτερύγια και το κεντρικό σημείο) ο οποίος μπορεί να αποτελείται από 1 πτερύγιο (μονόπτερος), ή και περισσότερα πτερύγια συνήθως 2-3 ή και πολύπτερος (περισσότερα από 3 πτερύγια). Τα πτερύγια προσδένονται (είτε σταθερά είτε με τη δυνατότητα περιστροφής γύρω από ένα διαμήκη άξονα) πάνω σε μία πλήμνη(από χυτό όλκιμο σίδηρο) η οποία συνδέεται με τον άξονα χαμηλών ταχυτήτων. Ο άξονας χαμηλών ταχυτήτων συνδέει την πλήμνη με το κιβώτιο ταχυτήτων από το οποίο ξεκινάει ο άξονας υψηλών ταχυτήτων και καταλήγει στη γεννήτρια. Η γεννήτρια συνδέεται σε ένα μετασχηματιστή για σύνδεση με το δίκτυο.

Ο πολύπτερος ρότορας χρησιμοποιείται κυρίως σε ανεμογεννήτριες όπου χρειάζεται μεγάλη ροπή με ήπιους ανέμους. Όσο μικρότερος είναι ο αριθμός των πτερυγίων τόσο μεγαλύτερος ρυθμός περιστροφής απαιτείται με αποτέλεσμα περισσότερη φθορά αλλά και θόρυβο.

Οι τρίπτερες ανεμογεννήτριες είναι οι πιο αξιόπιστες και έχουν καλύτερο αισθητικό αποτέλεσμα. Όσον αφορά τα πτερύγια του ρότορα, είναι κατασκευασμένα από πλαστικό ενισχυμένο με υαλονήματα και εκεί μπορεί να ενσωματώνεται και η αντικεραυνική

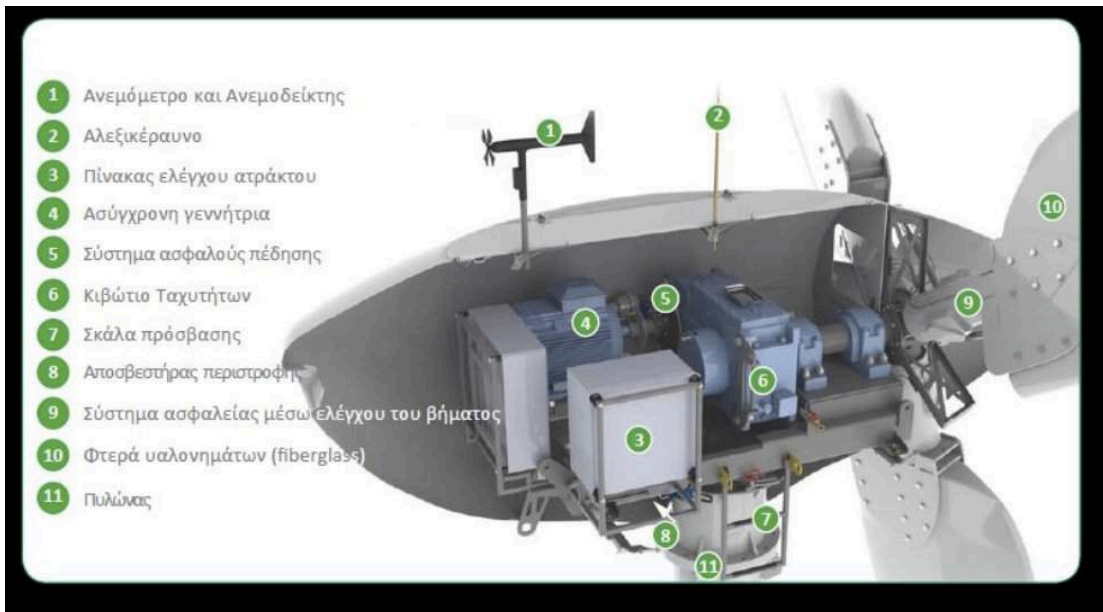
προστασία. Προσανατολίζεται κάθετα προς την διεύθυνση του ανέμου για να ελαχιστοποιούνται τα φορτία στο ρότορα αλλά και για να μεγιστοποιείται η παραγωγή ενέργειας. Μέσω του ανέμου πάνω στα περίπτερα δημιουργείται άνωση με αποτέλεσμα τη δημιουργία ροπής γύρω από τον άξονα. Έτσι τα πτερύγια αναγκάζονται να περιστρέφουν. Το ανεμόπτερο μετράει την ταχύτητα που έχει ο άνεμος και μεταφέρει δεδομένα σε ένα ελεγκτή. Οι κινητήρες εκτροπής μετατρέπουν τον άξονα του στρόβιλου για να βλέπει ο ρότορος και οι λεπίδες στον άνεμο.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης και το σύστημα πέδησης της ανεμογεννήτριας που τοποθετείται με στόχο την προστασίας της από υψηλές ταχύτητες και για έλεγχο. Περιλαμβάνει αεροδυναμικό και μηχανικό σύστημα ασφαλείας. Αποτελείται από πτερύγιο, μεταπτερύγιο και το μηχανικό φρένο. Σε περίπτωση παρατήρησης στάσης της ανεμογεννήτριας ενεργοποιείται η αεροπέδη και τα φρένα. Ο εξοπλισμός των πτερυγίων συνίστανται από ένα κινητό πτερύγιο που όταν είναι σε θέση ενεργοποίησης, στρέφεται κάθετα σε σχέση με το επίπεδο του ρότορα με αποτέλεσμα να δρα ως αεροπέδη.

Ο ρότορας συνδέεται με το κέλυφος στο οποίο εκτός από το κιβώτιο ταχυτήτων τους περιέχονται και οι άξονες χαμηλής (οδηγεί τη γεννήτρια) και υψηλής συχνότητας η γεννήτρια, το φρένο και ο ελεγκτής. Το φρένο (δισκόφρενο) μπορεί να σταματήσει τον κινητήρα σε περίπτωση που χρειαστεί. Είναι ασφάλειας- αστοχίας δύο σταδίων, το πρώτο προσφέρει μέση ροπή για στάσεις συντήρησης και το δεύτερο υψηλή ισχύ για στάσεις επείγουσας ανάγκης.

Μία τυπική ανεμογεννήτρια που αποδίδει ισχύ των 500 κιλοβάτ έχει διάμετρο δρομέα 40 μέτρα και ύψος 40 με 50 μέτρα σε αντίθεση με μια ανεμογεννήτρια των 3 μεγαβάτ που έχει μεγαλύτερες διαστάσεις (διάμετρος δρομέα 80 μέτρα και ύψος 80 με 100 μέτρα.

Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται τα βασικά τμήματα της ατράκτου μιας ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 6.4 : Βασικά τμήματα ατράκτου (Πηγή: Κέντρο ανανεώσιμων πηγών

<http://www.cres.gr/kape/>)

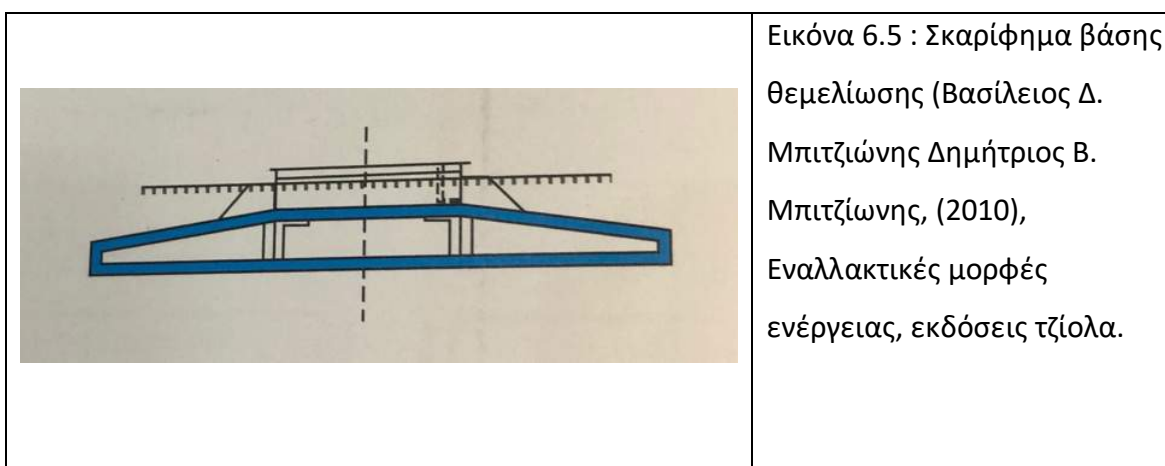
6.4 Αρχή λειτουργίας ανεμογεννήτριας

Οι κινητήρες εκτροπής μετατρέπουν το άξονα του στροβίλου έτσι ώστε ο ρότορας και οι λεπίδες να βλέπουν απευθείας στον άνεμο. Οι λεπίδες διαμορφώνονται με διατομή αεροfoil (όπως στα αεροσκάφη) και ο αέρας αναγκάζεται να επιταχύνει την κίνηση του από τη μία πλευρά από τη από την άλλη. Λόγω της διαφοράς ταχύτητας προκαλείται διαφορά πίεσης, η οποία προκαλεί την κίνηση της λεπίδας, τη στροφή του ρότορα και τη ροπή(δύναμη περιστροφής). Ο άξονας χαμηλής ταχύτητας περιστρέφεται όπως τα πτερύγια. Όμως χρειάζεται μεγαλύτερη ταχύτητα για να παραχθεί ρεύμα. Έτσι, Ο ρότορας όπως προαναφέρθηκε συνδέεται με το κιβώτιο ταχυτήτων (πολλαπλασιάζει την ταχύτητα περιστροφής του άξονα χαμηλής ταχύτητας) και με την ηλεκτρική γεννήτρια(συνδέεται με τον άξονα υψηλής ταχύτητας) ρόλος της οποίας είναι η μετατροπή της ροπής σε δύναμη περιστροφής σε ηλεκτρική ενέργεια η οποία τροφοδοτείται σε ένα μετασχηματιστή και στη συνέχεια μεταφέρεται σε έναν υπόγειο σταθμό μέσω υπόγειων καλωδίων. Εκεί μέσω άλλων μετασχηματιστών αυξάνεται η τάση και εξάγεται το τοπικό δίκτυο. Χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων έχουμε άμεση σύνδεση του άξονα από την πρύμνη στην γεννήτρια.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης το πως το ρεύμα που παράγει η ανεμογεννήτριας φτάνει στους εκάστοτε καταναλωτές. Συγκεκριμένα, η ηλεκτρική γεννήτρια μέσα στην άτρακτο συνήθως παράγει ρεύμα εναλλασσόμενης τάσης το οποίο μεταφέρεται εντός του πυλώνα και στη συνέχεια με τη βοήθεια υπόγειων καλωδίων σε υποσταθμό ρεύματος όπου η τάση ανυψώνεται με στόχο να είναι εφικτό να τροφοδοτηθεί στο ηλεκτρικό δίκτυο και τέλος να γίνει η μεταφορά στους καταναλωτές.

6.5 Θεμελίωση, τοποθέτηση και στήριξη ανεμογεννητριών

Αρχικά πραγματοποιείται η κατασκευή της βάσης θεμελίωσης από οπλισμένο σκυρόδεμα, συνήθως, ύστερα από συστηματική και προσεκτική μελέτη για τη βάση αλλά και την ολική στήριξη.



Στη συνέχεια ανυψώνεται ο πύργος της ανεμογεννήτριας ο οποίος τοποθετείται τμηματικά. Ακολουθεί η ανύψωση και τοποθέτηση της ατράκτου και του ρότορα αφού έχει συναρμολογηθεί στη βάση. Για την μεταφορά του πύργου, της ατράκτου και των πτερυγίων απαιτείται να μην είναι δύσβατος ο δρόμος. Για τα αιολικά πάρκα στη θάλασσα όπως είναι προφανές το κατασκευαστικό κόστος είναι μεγαλύτερο.

6.6 Επιλογή κατάλληλης περιοχής

Με την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, η τεχνολογία αιολικής καλλιέργειας βελτιώνεται σε μεγάλο επίπεδο και συνεχώς. Επομένως έχουν διαμορφωθεί κάποιες προϋποθέσεις που πρέπει να πληρούνται μία περιοχή ούτως ώστε να προχωρήσει η διαδικασία

εγκατάστασης ανεμογεννητριών. Συγκεκριμένα για να χαρακτηριστική μία περιοχή πλήρως κατάλληλη για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών θα πρέπει ο άνεμος στην συγκεκριμένη περιοχή να έχει υψηλές ταχύτητες για ένα σημαντικά μεγάλο χρονικό διάστημα σε ένα έτος. Επίσης να υπάρχει σε διαθεσιμότητα μεγάλη έκταση γης (για εγκατάσταση αιολικού πάρκου) καθώς και δυνατότητα εύκολης πρόσβασης. Ακόμα, θα πρέπει να βρίσκεται σε μικρή απόσταση από το κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας για να υπάρχει δυνατότητα σύνδεσης. Ιδανικό θα ήταν να μην υπάρχει μεγάλο υψόμετρο ώστε να αποφεύγονται περιορισμοί λόγω καιρικών συνθηκών.

Με στόχο την επιλογή της ιδανικής τοποθεσίας εκτός από τις παραπάνω παραμέτρους θα πρέπει να είναι γνωστή η ταχύτητα του ανέμου(μέση, στιγμιαία και μέγιστη) και η διεύθυνση του (από που φυσάει ο άνεμος σε σχέση με τη τοποθεσία) στη συγκεκριμένη περιοχή. Σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά του ανέμου παρουσιάζουν τα επιφανειακά εμπόδια (δέντρα, σπίτια) που παρεμβάλλονται στη διεύθυνση του ανέμου και στο εξεταστέο σημείο εμποδίζοντας με την ελεύθερη κυκλοφορία. Αξιοσημείωτος είναι ο ρόλος που παίζει η τραχύτητα του εδάφους η οποία όσο μεγαλύτερη είναι τόσο περισσότερο αλλάζει η κατανομή της ταχύτητας του ανέμου καθώς και η τύρβη (ανατάραξη του αέρα, διακύμανση της ταχύτητας γύρω από τη μέση τιμή) η οποία επιδρά στην ισχύ και στην όλη εγκατάσταση του συστήματος. Επιπροσθέτως τα εμπόδια του αέρα δημιουργούν στροβιλισμούς, ανωμαλίες στη ροή του αέρα, οι οποίοι και αυτοί με τη σειρά τους επιδρούν στην ισχύ και στην εγκατάσταση του συστήματος. Η μορφολογία του εδάφους παίζει επίσης πολύ σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά του ανέμου. Η ιδανική θέση για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών είναι η κορυφή μιας λοφοσειράς διότι η ταχύτητα του έχει μεγαλύτερη τιμή με αποτέλεσμα και σημαντική αύξηση της ισχύος. Η κλίση του εδάφους είναι ένας σημαντικός παράγοντας (όριο περίπου 10%) διότι δυσκολεύει την πρόσβαση και κατασκευή του αιολικού πάρκου.

Επιπρόσθετα, για να κριθεί κατάλληλη μια περιοχή για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών θα πρέπει να ικανοποιούνται κάποιοι περιορισμοί σε σχέση με τις αποστάσεις τόσο από το οδικό δίκτυο όσο και από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Όσο είναι μικρότερη η απόσταση από το οδικό δίκτυο θα είναι μικρότερο και το κόστος κατασκευής. Το ίδιο ισχύει και σχετικά με τις αποστάσεις από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής

ενέργειας όπου περιοχές απομακρυσμένες αποκλείονται. Επίσης, είναι συνετό να υπάρχει απόσταση από αεροδρόμια έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ασφάλεια των ανθρώπων.

6.7 Μέγεθος ανεμογεννητριών

6.7.1 Ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος

Οι ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος τοποθετούνται σε αιολικά συστήματα στα οποία η τιμή της ονομαστικής τους ισχύος είναι μικρότερη από 30 κιλοβάτ. Χρησιμοποιούνται σε αυτόνομα ή υβριδικά συστήματα και μπορούν να συνδεθούν με το κεντρικό δίκτυο διανομής.

Τα αυτόνομα αιολικά συστήματα θα πρέπει να συνδέονται με συστοιχία συσσωρευτών ώστε να αποθηκεύεται η πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια. Εκτός από τους συσσωρευτές αποθήκευσης και την ανεμογεννήτρια μικρής ισχύος εμπερικλείουν πίνακα τροφοδοσίας καταναλώσεων της τάξης των 230V και συχνότητας των 50Hz, πίνακα ελέγχου της ανεμογεννήτριας, καθώς και μετατροπέα compact, ο οποίος εμπεριέχει ενσωματωμένο φορτιστή και ρυθμιστή φόρτισης.

Αντίθετα τα διασυνδεδεμένα με το δίκτυο χαμηλής τάσης συστήματα, εμπεριέχουν εκτός από την ανεμογεννήτρια μικρής ισχύος πίνακα ελέγχου και λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, πίνακα ελέγχου και λειτουργίας της εγκατάστασης για διοχέτευση της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και μετρητή ηλεκτρικής ενέργειας διπλής εγγραφής. Επιπλέον μέσω ενός ειδικού πολυμορφικού σταθμού γίνεται σύνδεση της γεννήτριας με το κεντρικό δίκτυο. Έτσι υπάρχει η δυνατότητα παροχής ισχύος και σε περιόδους όπου η ανεμογεννήτριας είναι εκτός λειτουργίας.

Πολλές φορές υπάρχει τοποθέτηση μικρής ισχύος ανεμογεννήτριας μέσα σε κατοικημένες περιοχές αλλά και απομονωμένες περιοχές, σε κτηνοτροφικές μονάδες σε γεωτρήσεις και άλλα. Διακρίνονται σε μικρογεννήτριες (ονομαστική ισχύς από 0,1 βατ μέχρι 1 κιλοβάτ) που η σύνδεση τους γίνεται με συσσωρευτές αποθήκευσης, σε μέσου εύρους ανεμογεννήτριες (ονομαστική ισχύς από 1 κιλοβάτ μέχρι 5 κιλοβάτ) που η σύνδεση τους με το δίκτυο γίνεται μέσω ειδικού μετατροπέα δικτύου και σε μίνι ανεμογεννήτριες (με ονομαστική ισχύ από 5 μέχρι 30 κιλοβάτ) που συνδέονται με το κεντρικό δίκτυο

διανομής μέσω ειδικών ηλεκτρονικών διατάξεων. Ο πύργος τους είναι από 10 μέχρι 40 μέτρα.

Το σύστημα στο οποίο υπάρχει συνδυασμός ανεμογεννήτριας μικρής ισχύος και φωτοβολταϊκών συλλεκτών για εγκαταστάσεις που πρέπει να λειτουργούν αδιάκοπα όμως βρίσκονται μακριά από το δίκτυο διανομής ηλεκτρικού ρεύματος καλείται υβριδικό σύστημα με ανεμογεννήτριες μικρής ισχύος.

Manufacturer	Model	Capacity (kW)
Kestrel	e300i	1.0
Raum	Raum 1.3	1.3
Cascade Wind	ARE 110	2.5
Kestrel	e400i	3.0
Raum	Raum 3.5	3.5
Fortis	Montana	5.0
Cascade Wind	ARE 442	10.0
Fortis	Alize	10.0
Bergey Windpower	Excel-S	24.0

Εικόνα 6.6 : Κατασκευαστές, μοντέλα και ισχύς μικρών ανεμογεννητριών (Πηγή : Catalog of DC Appliances and Power Systems Karina Garbesi, research gate 2017).

6.7.2 Προϋποθέσεις για την εγκατάσταση αιολικού συστήματος μικρής ισχύος

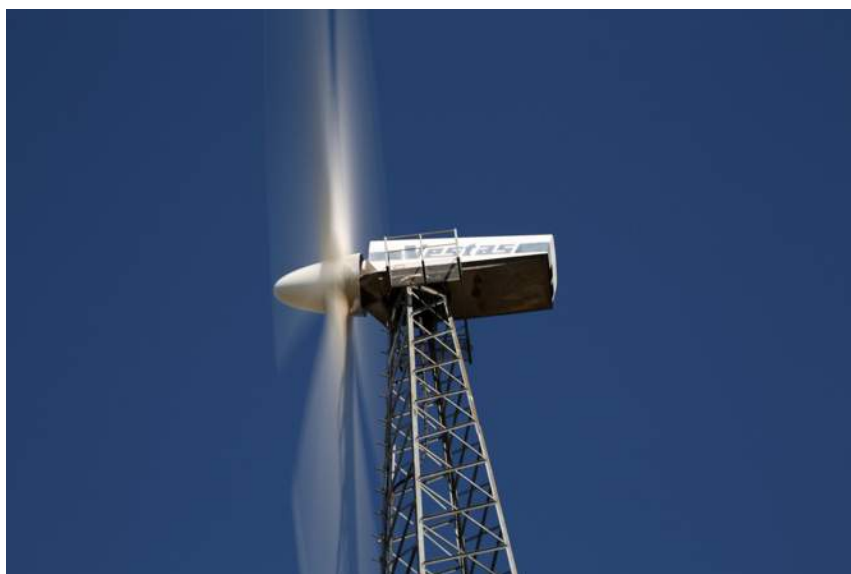
Για να είναι εφικτή η εγκατάσταση αιολικού συστήματος μικρής ισχύος σε μία περιοχή θα πρέπει να έχει πραγματοποιηθεί ορθή εκτίμηση των κλιματολογικών συνθηκών και ανεμολογικών στοιχείων και χαρακτηριστικών στην εξεταζόμενη περιοχή. Επίσης, να έχει επιλεγθεί η κατάλληλη ανεμογεννήτρια (τύπος και μέγεθος) καθώς και η κατάλληλη επιλογής της θέσης τοποθέτησης της. Η εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας θα πρέπει να πληρούνται τις κατάλληλες προδιαγραφές, σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα και κανονισμούς. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να γίνει ορθός υπολογισμός του πύργου εγκατάστασης της εκάστοτε ανεμογεννήτριας με βάση τα ακραία φορτία καθώς και

σωστός υπολογισμός της θεμελίωσης του πύργου. Τέλος, είναι συνετό να υπάρχει αξιόπιστο σύστημα ελέγχου και ασφάλειας της ανεμογεννήτριας.

5.7.3 Ανεμογεννήτριες μέσης ή μεγάλης ισχύος

Οι ανεμογεννήτριες μέσης ισχύος τοποθετούνται σε συστήματα στα οποία η ονομαστική ισχύς τους είναι από 30 κιλοβάτ μέχρι 200 κιλοβάτ σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος που εγκαθίστανται σε αιολικά συστήματα όπου η τιμή της ονομαστικής τους ισχύς είναι πάνω από 200 κιλοβάτ. Είναι συνήθως οριζοντίου άξονα σύγχρονες (με 1,2 ή 3 πτερύγια). Όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος είναι σύνηθες να εγκαθίστανται σε αιολικά πάρκα και να εκμεταλλεύονται σε πιο μεγάλο βαθμό το αιολικό δυναμικό της περιοχής από μικρότερης ισχύος ανεμογεννήτριες. Τα αιολικά πάρκα λόγω σημαντικής μείωσης του κόστους κατασκευής αλλά και συντήρησης αποτελούν την πιο οικονομικά συμφέρουσα εφαρμογή στον τομέα της αιολικής ενέργειας. Επιπλέον η αιολική ενέργεια σε μία ανεμογεννήτρια είναι ανάλογη του μήκους των πτερυγίων. Ο πύργος τους και ο πυλώνας τους έχει μεγάλο ύψος στο οποίο η ισχύς που παράγεται είναι μεγαλύτερη (μεγαλύτερη ταχύτητα συνεπάγεται και μεγάλη αύξηση ισχύς).

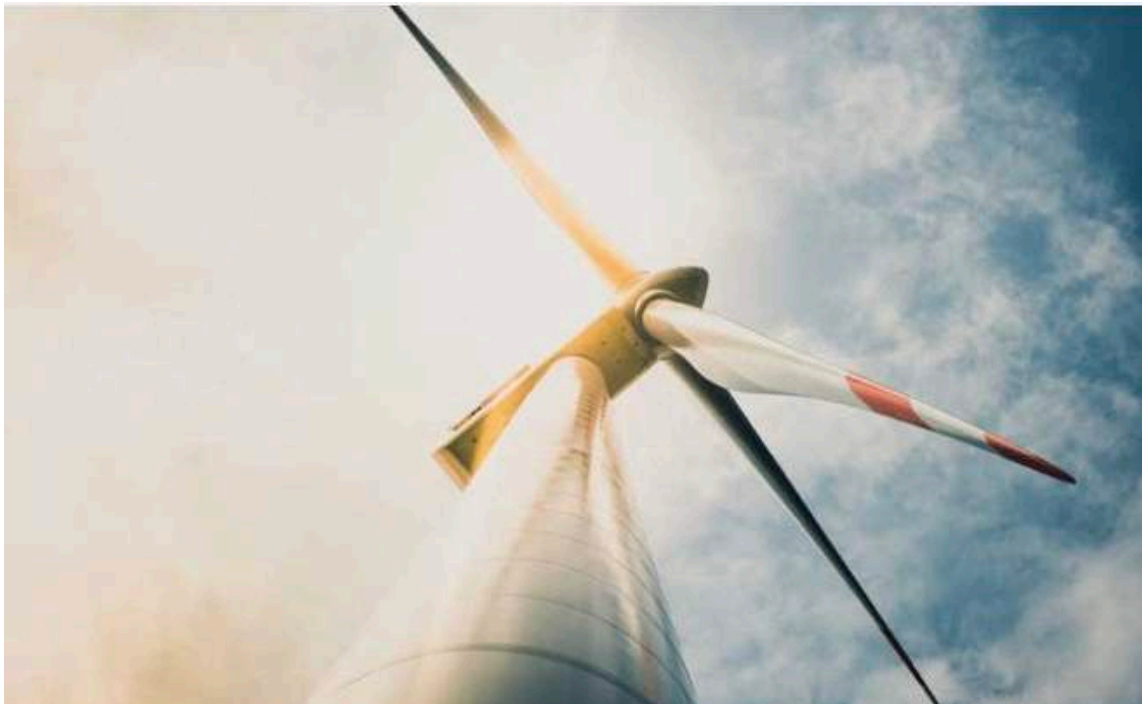
Η κορυφαία κατασκευαστική εταιρεία Vestas έχει κατασκευάσει πολλά μοντέλα ανεμογεννητριών μεσαίου και μεγάλου μεγέθους. Η ανεμογεννήτρια Vestas V20 με ισχύ 100kW είναι ανεμογεννήτρια μεσαίου μεγέθους και παρουσιάζεται στην παρακάτω φωτογραφία.



Εικόνα 6.7 : Vestas V20 με ισχύ 100kW

Η ανεμογεννήτριες Vestas V20 έχουν ταχύτητα εκκίνησης 4.5 m/s και ταχύτητα αποκοπής τα 25m/s, η διάμετρος του ρότορα τους είναι 20 μέτρα και έχουν περιοχή σάρωσης τα 314 τετραγωνικά μέτρα.

Αντίθετα η μεγάλης ισχύος ανεμογεννήτρια Vestas V162 με ισχύ 5.6 MW έχει διάμετρο ρότορα 162 μέτρα είναι wind class S και έχει επιφάνεια σάρωσης 20,612 τετραγωνικά μέτρα. Έχει ταχύτητα εκκίνησης 3 m/s και ταχύτητα αποκοπής τα 25 m/s. Το ύψος της πρήμνης κυμαίνεται από 119 μέχρι 166 μέτρα (το μεγαλύτερο μέγεθος ρότορα στο portfolio των Vestas).



Εικόνα 6.8 : Vestas V62 με ισχύ 5600kW

Υπό ανάπτυξη είναι η Vestas V164 με ισχύ 8.6 MW η οποία έχει ύψος πρήμνης 164 μέτρα είναι wind class S και έχει επιφάνεια σάρωσης 21,125 τετραγωνικά μέτρα. Έχει ταχύτητα εκκίνησης 3,5 m/s και ταχύτητα αποκοπής τα 25 m/s.



Εικόνα 6.9 : Πρωτότυπη Vestas V164 τοποθετημένη στη ξηρά.

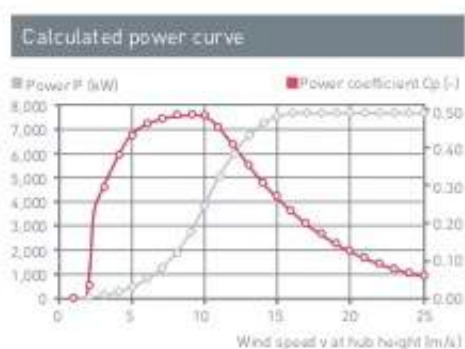
Η εταιρεία Enercon επίσης από τις μεγαλύτερες κατασκευαστικές εταιρείες ανεμογεννητριών παγκοσμίως, έχει κατασκευάσει την μεσαίου μεγέθους και τριών πτερυγίων ανεμογεννήτρια E20/200 με ισχύς 200 kW και διάμετρο ρότορα 30 μέτρα και έχει επιφάνεια σάρωσης 707 τετραγωνικά μέτρα. Έχει ταχύτητα εκκίνησης 2,5 m/s και ταχύτητα αποκοπής τα 25 m/s.

Παράδειγμα μεγάλων Enercon ανεμογεννητριών είναι η ανεμογεννήτρια E126/7580 με ισχύ 7,580 kW, διάμετρο ρότορα 127 μέτρα και έχει επιφάνεια σάρωσης 12,668 τετραγωνικά μέτρα. Έχει ταχύτητα εκκίνησης 2,5 m/s και ταχύτητα αποκοπής τα 25 m/s , είναι wind class IEC III και δεν φέρει κιβώτιο ταχυτήτων.

Παρακάτω απεικονίζεται η ανεμογεννήτρια E126/7580 της κατασκευαστικής εταιρείας Enercon, τα χαρακτηριστικά και η καμπύλη ισχύος της.



Εικόνα 6.9 : Ανεμογεννήτρια E126/7580.



Technical specifications E-126	
Rated power:	7,580 kW
Rotor diameter:	127 m
Hub height in meter:	135
Wind zone (DIBt):	WZ III
Wind class (IEC):	IEC/EN IA
WEC concept:	Gearless, variable speed, single blade adjustment
Rotor	
Type:	Upwind rotor with active pitch control

Εικόνα 6.10 : Καμπύλη ισχύος και χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας E126/7580.

Ακόμα ένα παράδειγμα ανεμογεννήτριας Enercon είναι η E147/4300 με ισχύ 4,300 kW διάμετρο ρότορα 147 μέτρα και έχει επιφάνεια σάρωσης 16,972 τετραγωνικά μέτρα. Έχει ταχύτητα εκκίνησης 2,5 m/s και ταχύτητα αποκοπής τα 25 m/s.

Πρωτοπόρα κατασκευαστική εταιρεία ανεμογεννητριών είναι επίσης η Siemens Gamesa. Παραδείγματα ανεμογεννητριών Siemens Gamesa είναι η SG 2.1-122 με ισχύ 2,100 kW ,διάμετρο ρότορα 112 μέτρα είναι wind class IEC III/S και έχει επιφάνεια σάρωσης 9,852 τετραγωνικά μέτρα. Φέρει κιβώτιο ταχυτήτων και έχει 3 λεπίδες.



Εικόνα 6.11 : Ανεμογεννήτρια SG 2.1-122.

Ακόμα ένα παράδειγμα ανεμογεννητριών Siemens Gamesa, μοντέλο το οποίο είναι υπό κατασκευή είναι η SG 14-222 με ισχύ 14,000 kW ,διάμετρο ρότορα 222 μέτρα είναι wind class IEC III/IS και έχει επιφάνεια σάρωσης 38,708 τετραγωνικά μέτρα. Δεν φέρει κιβώτιο ταχυτήτων, έχει 3 λεπίδες και είναι μοντέλο σχεδιασμένο για υπεράκτιο άνεμο.

6.7.4 Προϋποθέσεις εγκατάστασης αιολικού πάρκου με μέσης ή μεγάλης ισχύος ανεμογεννήτριες

Λόγω του μεγάλου κόστους της τοποθέτησης ανεμογεννητριών μέσης ή μεγάλης ισχύος πρέπει να πληρούνται κάποιες προϋποθέσεις. Αναλυτικότερα, θα πρέπει να είναι γνωστή η ακριβής τοποθεσία εγκατάστασης των ανεμογεννητριών. Η επιλογή γίνεται εκτιμώντας το αιολικό δυναμικό της εξεταζόμενης περιοχής με αιολικούς χάρτες, ανεμογράφους και ανεμοδείκτες. Επιπλέον θα πρέπει να υπάρχει δυνατότητα πρόσβασης στα απαιτούμενα έργα υποδομής (αποστάσεις από οικισμούς) και να γνωρίζουμε τα δίκτυα μεταφοράς

ηλεκτρικής ενέργειας στη περιοχή. Για την επιλογή του κατάλληλου μεγέθους και τύπου ανεμογεννήτριας θα πρέπει να είναι γνωστή η ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας. Όσον αφορά τον αριθμό των ανεμογεννητριών εξαρτώνται από την διαθέσιμη γη έτσι ώστε να αποφεύγονται τυχόν σκιάσεις. Συγκεκριμένα όταν οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται στη σειρά και ο άνεμος φυσάει μόνο από μία διεύθυνση η απόσταση ανάμεσα τους θα πρέπει να είναι τριπλάσια από τη διάμετρο της ανεμογεννήτριας, ενώ όταν ο άνεμος φυσάει σε διαφορετικές διευθύνσεις θα πρέπει η απόσταση μεταξύ τους να είναι δεκαπλάσια της διαμέτρου της πτερωτής.

Ο βασικός εξοπλισμός γίνεται αναλόγως το μέγεθος, την ισχύς του αιολικού πάρκου καθώς και τις προσφορές των εταιριών για τις ανεμογεννήτριες.

6.8 Χαρακτηριστικά μεγέθη για ανεμογεννήτριες

Σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν και επηρεάζουν τη λειτουργικότητα και την παραγωγικότητα μίας ανεμογεννήτριας είναι η ταχύτητα εκκίνησης (συνήθως 3-5 m/s), η οποία είναι η ταχύτητα όπου η ανεμογεννήτριας ξεκινά να παράγει καθαρή ισχύ και όχι η ταχύτητα που απαιτείται για να περιστραφούν τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας. Η ταχύτητα αποκοπής, η οποία αποτελεί ένα άνω όριο ταχύτητας το οποίο αν ξεπεραστεί διακόπτεται η λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Τέλος η ονομαστική ταχύτητα, η οποία είναι η ταχύτητα που χρειάζεται για την επίτευξη της ονομαστικής ισχύος (μέγιστη δυνατή παραγόμενη ισχύς).

Η ονομαστική ισχύς της μηχανής που καθορίζει το μέγεθος της μηχανής και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση :

$$P_{αν} = \frac{1}{2} \times \eta \times \rho \times A \times v^3, \text{ όπου,}$$

$P_{αν}$ η ισχύς του ανέμου ή θεωρητική ισχύς σε KW

ρ η πυκνότητα του αέρα σε kg/m³

A εμβαδόν του κύκλου που δημιουργείται από τη σάρωση των πτερυγίων σε m²

και v η ταχύτητα του ανέμου σε m/s.

Όσον αφορά τα επιμέρους μεγέθη :

$$\rho_a = \frac{Pa}{Rg \cdot Ta} \quad \text{όπου,}$$

P_a = πίεση περιβάλλοντος σε Nt/m^2

R_g = σταθερά αερίων, για τον αέρα ίση με $287 J/kg \cdot Kelvin$

T_a = θερμοκρασία περιβάλλοντος σε βαθμούς kelvin

$$A = \pi D^2 / 4 \quad \text{όπου,}$$

$D = 2r$ είναι η διάμετρος της πτερωτής της ανεμογεννήτριας σε m.

Η μηχανική ισχύς που παράγεται από την ενέργεια του ανέμου υπολογίζεται ως εξής :

$$P_{\mu\chi} = \frac{1}{2} \rho * A * V^3 * Cp \quad \text{όπου,}$$

C_p = ο συντελεστής ισχύος που μπορεί να πάρει τιμή μέχρι $C_{pmax} = 0,593$ σύμφωνα με το νόμο του Betz.

Επομένως σύμφωνα με το νόμο αυτό από την αιολική ισχύ, η μέγιστη μηχανική ισχύς που μπορούμε να πάρουμε είναι το 59,3%. Πρακτικά λαμβάνεται ως 65%.

Τέλος η ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να παραγάγει η γεννήτρια είναι ίση με :

$$P_{\eta\lambda} = \frac{1}{2} \rho * A * V^3 * Cp * H_{H/M} \quad \text{όπου,}$$

$H_{H/M} = \eta_H * \eta_\mu$, η_H = ηλεκτρικές απώλειες υπολογίζονται από 2 μέχρι 5% ($\eta_H = 0,95-0,98$)

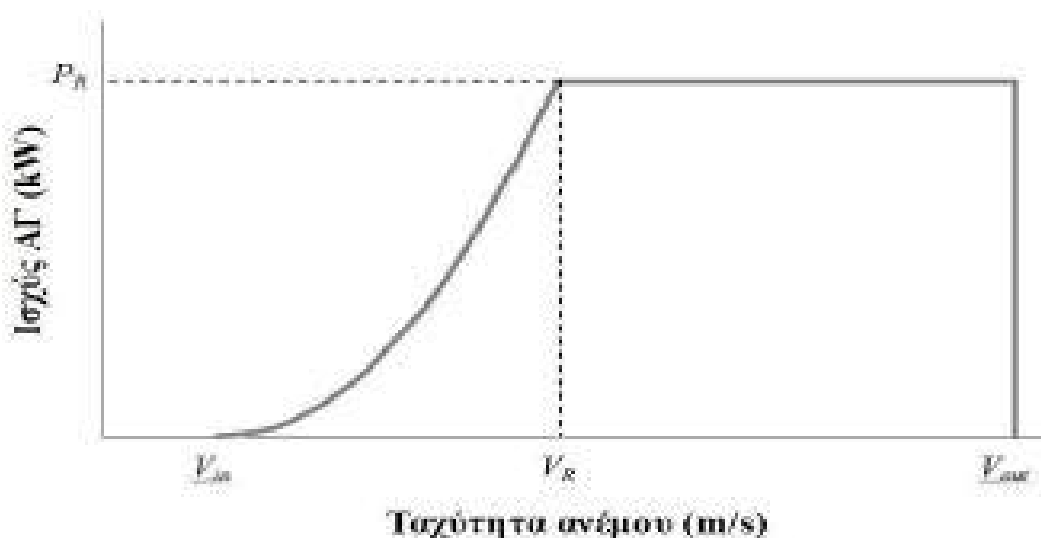
και η_μ = μηχανικές απώλειες στο 5% ($\eta_\mu = 0,95$).

Βασικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν μία ανεμογεννήτρια είναι η διάμετρος πτερωτής της ανεμογεννήτριας (D) η οποία καθορίζει το εμβαδόν σάρωσης της πτερωτής, το ύψος τοποθέτησης δεδομένου ότι αύξηση του ύψους συνεπάγεται και αύξηση του αιολικού δυναμικού. Επίσης δεν μπορεί το ύψος τοποθέτησης να είναι πολύ χαμηλό για την αποφυγή φαινομένων αλληλεπίδρασης εδάφους. Επιπλέον άλλο ένας βασικός παράγοντας που χαρακτηρίζει μια ανεμογεννήτρια είναι το πλήθος των πτερυγίων το οποίο συνδέεται με τη στιβαρότητα της μηχανής.

Μεγάλη στιβαρότητα συνεπάγεται αργόστροφη μηχανή, μικρός βαθμός απόδοσης. Εξίσου χαρακτηριστικοί παράγοντες είναι το είδος το πτερυγίων, το βήμα της πτερωτής και ο βαθμός απόδοσης που περιγράφει το ποσοστό της ισχύος του ανέμου που εκμεταλλεύεται η πτερωτή της μηχανής. Δεν είναι δυνατό ο βαθμός απόδοσης να είναι πάνω από 59%. Η κλίση του εδάφους αποτελεί σημαντικό παράγοντα ως προς τη χωροθέτηση (όριο 10%).

Οι κατασκευαστές στα χαρακτηριστικά στοιχεία της ανεμογεννήτριες υποδεικνύουν την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας όπου η ισχύς φτάνει την μέγιστη ονομαστική τιμή της, την ταχύτητα έναρξης λειτουργίας όπου αρχίζει να παράγεται ισχύς από την ανεμογεννήτρια και την ταχύτητα διακοπής λειτουργίας δηλαδή την μέγιστη ταχύτητα του ανέμου στην οποία μπορεί η ανεμογεννήτρια να παράγει ισχύς. Αν ξεπεραστεί το όριο ταχύτητας αποκοπής η ανεμογεννήτρια τίθεται εκτός λειτουργίας. Συνήθως για ανεμογεννήτριες μέσης ισχύος έχουμε ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας (rated output speed) 12-15 m/sec, ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (cut-in speed) 3-5 m/sec, ταχύτητα διακοπής λειτουργίας (cut-out speed) 20-25 m/sec.

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται η καμπύλη ισχύος μίας ανεμογεννήτριας. Η καμπύλη ισχύος βασίζεται στη αεροδυναμική ποιότητας μίας ανεμογεννήτριας, στις επικρατούσες συνθήκες ανέμου και στα χαρακτηριστικά εδάφους.

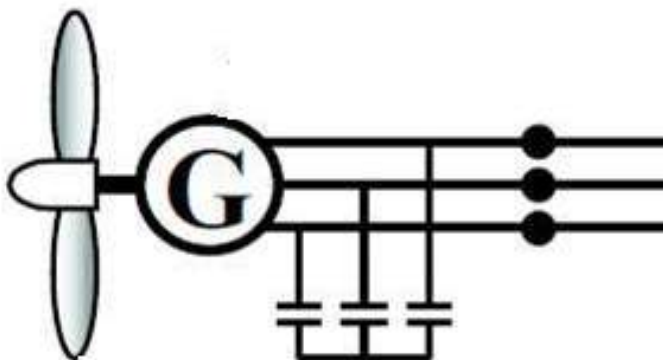


Σχήμα 6.2 : Τυπική καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας (πηγή : Ανάλυση και διαχείριση ρίσκου σε έργα ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, Μηλιώνης Αλέξανδρος, 2014)

6.9 Ηλεκτρική μηχανή ανεμογεννήτριας

Το ηλεκτρικό σύστημα περιέχει την γεννήτρια, το εξοπλισμό προστασίας, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, το διακοπτικό εξοπλισμό και σύστημα ελέγχου. Η ηλεκτρική μηχανή μιας ανεμογεννήτριας μετατρέπει την μηχανική ισχύς στο δρομέα σε ηλεκτρική στους ακροδέκτες της. Σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως σύγχρονες και ασύγχρονες γεννήτριες. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες διατάξεως ανεμογεννήτριας με βάση τη δυνατότητα ρύθμισης της περιστροφικής ταχύτητας. Αυτές είναι οι σταθερής ταχύτητας ανεμογεννήτριες και οι μεταβλητής ταχύτητας ανεμογεννήτριες.

Στην σχήμα 6.3 απεικονίζεται μια επαγωγική μηχανή βραχυκυκλωμένου κλωβού.



Σχήμα 6.3 : Επαγωγική μηχανή βραχυκυκλωμένου κλωβού (πηγή : Διπλωματική εργασία, Νικολάου Βεντούρη)

Η σταθερής ταχύτητας τοπολογία ανεμογεννητριών έγκειται στην απευθείας σύνδεση, μέσω μετασχηματιστή, της μηχανής με το δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιούν συνήθως επαγωγικές μηχανές βραχυκυκλωμένου κλωβού. Έτσι από την συχνότητα του δικτύου και τον αριθμό των πόλων της επιβάλλεται σταθερή ταχύτητα περιστροφής στη μηχανή. Οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας αποτελούνται από μία επαγωγική γεννήτρια και μία συστοιχία πυκνωτών για μείωση κατανάλωσης άεργου ισχύος. Η τοπολογία αυτή χρησιμοποιείται κυρίως σε παλαιότερης τεχνολογίας ανεμογεννήτριες. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη τοπολογία, η ανεμογεννήτρια δεν είναι δυνατό πάντα να λειτουργεί με τη μέγιστη αεροδυναμική απόδοση. Εξίσου σημαντικό μειονέκτημα είναι η όσο η παραγωγή ενεργού ισχύος αυξάνεται τόσο αυξάνεται και η κατανάλωση άεργου ισχύος από την επαγωγική μηχανή. Για την ισοστάθμιση αυτής της

κατανάλωσης χρησιμοποιείται συστοιχία παράλληλων πυκνωτών. Επίσης υπάρχει αδυναμία διατήρησης συγχρονισμού με το δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στις ασύγχρονες γεννήτριες πραγματοποιήθηκε προσπάθεια άρσης του περιορισμού της σταθερής ταχύτητας.

Επίσης η λειτουργία σταθερής ταχύτητας αδυνατεί να ελέγξει την ποιότητα της ενέργειας που παράγεται ή της κατανάλωσης έργου ισχύος. Οι αναταράξεις του αέρα αντιμετωπίζονται σαν διαταραχές στη μηχανική ροπή και μεταφέρονται σαν διαταραχές στο δίκτυο με αποτέλεσμα τη δημιουργία διαταραχών στη τάση και αυξημένων απωλειών στις γραμμές.

Στο σχήμα 6.4 απεικονίζεται η διάταξη ανεμογεννήτριας σταθερής ταχύτητας με ασύγχρονη μηχανή ενώ στο σχήμα 6.5 η διάταξη ανεμογεννήτριας με σύγχρονη μηχανή και στατικό μετατροπέα.

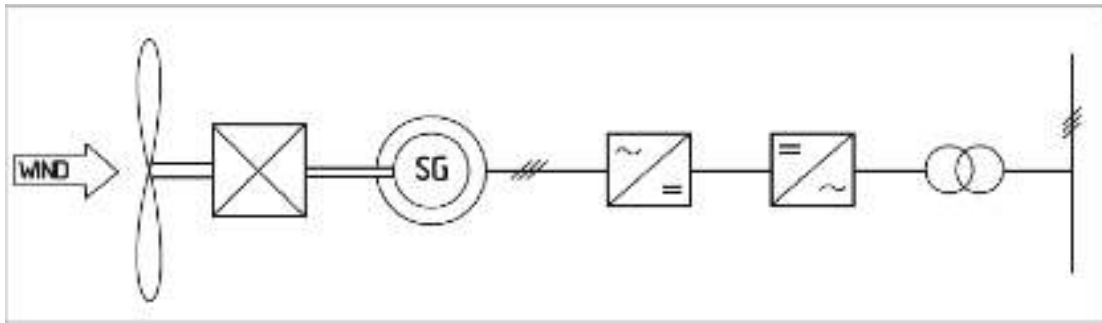


Σχήμα 6.4: Διάταξη ανεμογεννήτριας σταθερής ταχύτητας με ασύγχρονη μηχανή
(διπλωματική εργασία, Κατσαρός Νικόλαος, 2019)

Στη λειτουργία ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας οι ανεμογεννήτριες δύναται να λειτουργούν σε ένα μεγάλο φάσμα ταχύτητας με στόχο τη μέγιστη αεροδυναμική απόδοση.

Η σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο (σταθερής συχνότητας 50Hz) επιτυγχάνεται μέσω ενός μετατροπέα συχνότητας. Στη έξοδο της γεννήτριας για τη μετατροπή των AC ηλεκτρικών μεγεθών σε DC συνδέεται ένας τριφασικός ανορθωτής. Τα DC μετατρέπονται σε AC με ένα αντιστροφέα με τη συχνότητα του δικτύου και έτσι πραγματοποιείται η σύνδεση με το δίκτυο σταθερής συχνότητας.

Σε αντίθεση με ασύγχρονες μηχανές, στις σύγχρονες παρέχεται η δυνατότητα ελέγχου της έργου ισχύος αλλά και η εύκολη εκκίνηση και ηλεκτρική πέδηση.



Σχήμα 6.5 : Διάταξη ανεμογεννήτριας με σύγχρονη μηχανή και στατικό μετατροπέα
(διπλωματική εργασία, Κατσαρός Νικόλαος, 2019)

Με την λειτουργία μεταβλητών στροφών βελτιώνεται η ενεργειακή απόδοση της μηχανής. Εξίσου σημαντικά πλεονεκτήματα της λειτουργίας αυτής είναι η δυνατότητα ελέγχου άεργου ισχύος, η εξομάλυνση της μεταβλητότητας των μηχανικών ροπών με αποτέλεσμα μεγαλύτερη διάρκεια ζωής στο σύστημα. Ωστόσο, η τοπολογία μεταβλητής ταχύτητας ανεμογεννήτριες παρουσιάζει αυξημένη πολυπλοκότητα, αυξημένο κόστος και αυξημένες αρμονικές στο δίκτυο. Επομένως είναι απαραίτητη η εγκατάσταση φίλτρων με στόχο των περιορισμό τους.

6.9.1 Σύγχρονες γεννήτριες

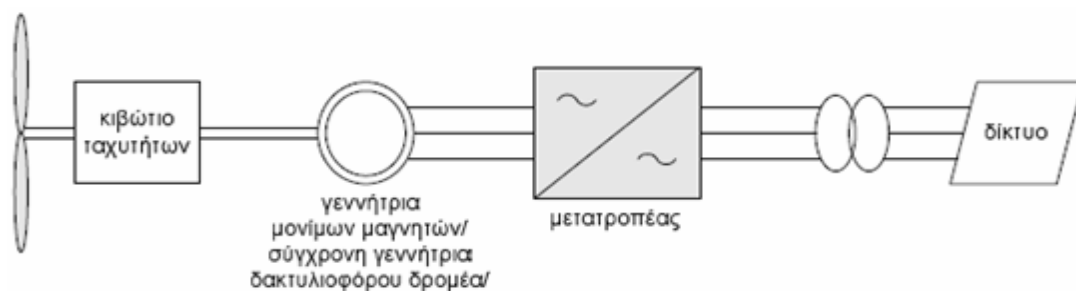
Σε αντίθεση με τις επαγωγικές γεννήτριες, οι σύγχρονες παρουσιάζουν μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και κόστος. Πλεονεκτούν στο γεγονός ότι το ρεύμα μαγνήτισης τους δεν δημιουργείται από το κύκλωμα του στάτη αλλά μέσω μόνιμων μαγνητών ή με ένα συμβατικό τύλιγμα πεδίου. Συνδέεται στο δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος ο οποίος στοχεύει στην απόσβεση των διαταραχών της ισχύος και στον έλεγχο της μαγνήτισης ώστε να παραμένει σε συγχρονισμό με τη συχνότητα του δικτύου.

Τον βασικότερο τύπο γεννήτριας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί η σύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα η ταχύτητα περιστροφής της οποίας καθορίζεται από τη συχνότητα που έχει το δίκτυο. Πλεονεκτεί σε σχέση με τις ασύγχρονες γεννήτριες στο γεγονός ότι δεν απαιτούνται επιπρόσθετα μέτρα αντιστάθμισης της άεργου ισχύος. Στα τυλίγματα του δρομέα όπου περνάει ρεύμα παράγεται το πεδίο

διέγερσης και περιστρέφεται με σύγχρονη ταχύτητα ή οποία καθορίζεται από τη συχνότητα του πεδίου αλλά και τον αριθμό των πόλων της γεννήτριας.

Μια ακόμη καινοτομία με στόχο την εξασφάλιση μεγαλύτερης αξιοπιστίας είναι οι σύγχρονες μηχανές με μόνιμο μαγνήτη στο δρομέα τους χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων (gear box) αλλά με άμεση σύνδεση στον άξονα περιστροφής. Έτσι επιτυγχάνεται μικρότερη μηχανική πολυπλοκότητα και η πιθανότητα η ανεμογεννήτρια να μείνει στάσιμη λόγω βλάβης στο κιβώτιο ταχυτήτων είναι πλέον μηδενική.

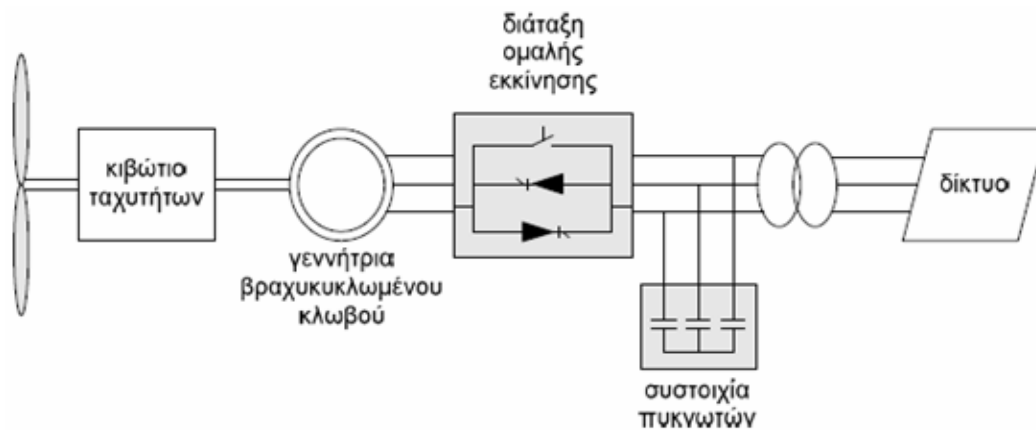
Στο σχήμα 6.6 απεικονίζεται Διάταξη ανεμογεννήτριας με σύγχρονη μηχανή μόνιμου μαγνήτη χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων και στατικό μετατροπέα, ενώ στο σχήμα 6.7 μία Γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο.



Σχήμα 6.6 : Διάταξη ανεμογεννήτριας με σύγχρονη μηχανή μόνιμου μαγνήτη χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων και στατικό μετατροπέα (διπλωματική εργασία, Κατσαρός Νικόλαος, 2019)

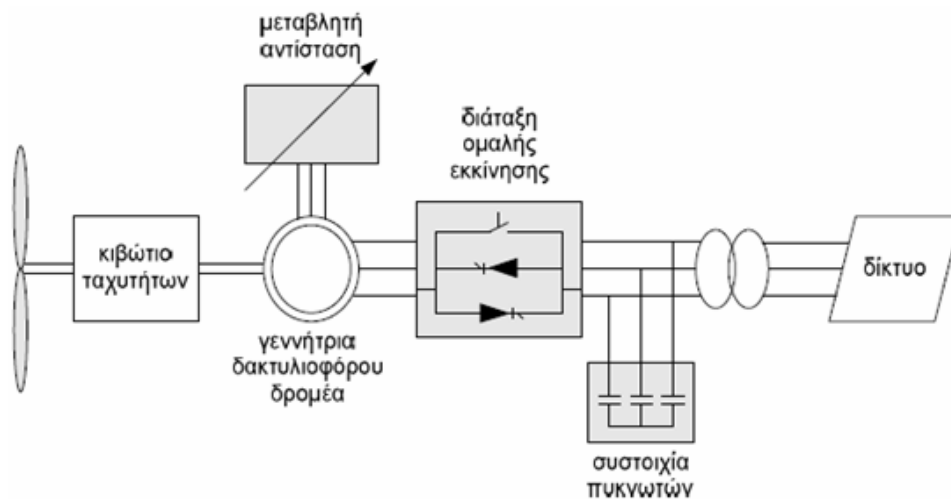
6.9.2 Ασύγχρονες επαγωγικές γεννήτριες

Οι ασύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούνται κυρίως στις ανεμογεννήτριες διότι παρουσιάζουν αρκετά χαμηλό κόστος αγοράς, είναι απλές όσον αφορά το μηχανικό κομμάτι και εμφανίζουν μεγάλη στιβαρότητα και αξιοπιστία. Ωστόσο το σημαντικότερο μειονέκτημα τους είναι η κατανάλωση άεργου ισχύος. Διακρίνονται σε βραχυκλωμένου κλώβου (όταν ο στάτης είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο δημιουργείται το μαγνητικό πεδίο του δρομέα με επαγωγή) και δακτυλιοφόρου δρομέα. Η ταχύτητα του μαγνητικού πεδίο που προκαλείται από τη διέγερση μίας τέτοιας γεννήτριας καθορίζεται από τη συχνότητα του ρεύματος και τον αριθμό των πόλων της γεννήτριας.

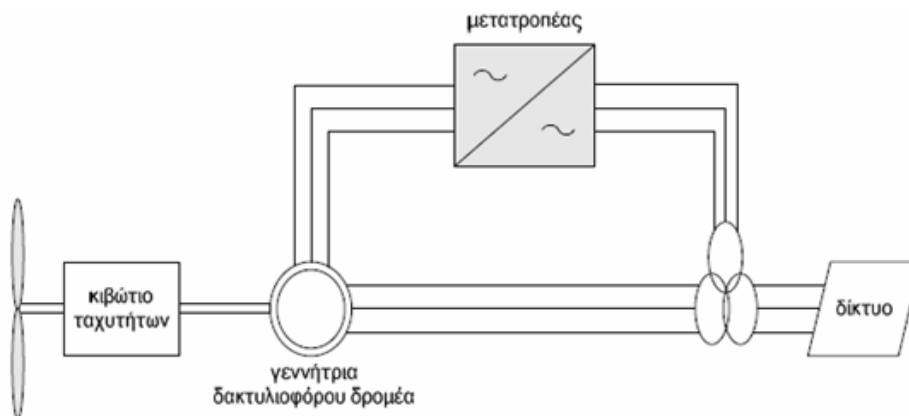


Σχήμα 6.7: Γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού απευθείας συνδεδεμένη στο δίκτυο(διπλωματική εργασία, Κατσαρός Νικόλαος, 2019)

Οι ασύγχρονες γεννήτριες διακρίνονται σε επαγωγικές γεννήτριες με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη τάση (αντίσταση δρομέα) (OSIG), σε επαγωγικές γεννήτριες διπλής τροφοδοσίας (DFIG) και σε επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλώβου (SCIG) με επικρατέστερες στη διεθνή αγορά τις διπλής τροφοδοσίας με ποσοστό πάνω από 70% οι οποίες αποτελούν εξέλιξη των OSIG. Η γεννήτρια διπλής τροφοδότησης αποτελείται από μία γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα με τα τυλίγματα του στάτη σε απευθείας σύνδεση με διάταξη από μετατροπείς πηγής τάσης. Όσον αφορά την επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλώβου, εξαιτίας της μηχανικής της απλότητας και του εξαιρετικά χαμηλού κόστους που χρειάζεται, σε απλές εφαρμογές αποτελούν την επικρατέστερη εφαρμογή. Η γεννήτρια και ο άξονας της ανεμογεννήτριας συνδέονται μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων (gear box). Είναι συνετό η σύνδεση της συγκεκριμένης γεννήτριας στο δίκτυο να γίνεται σε στάδια έτσι ώστε να επιτευχθεί μείωση του μεταβατικού ρεύματος. Η κατανάλωση άεργου ισχύος δεν είναι ελέγξιμη διότι η μεταβολή της βασίζεται στις συνθήκες του ανέμου και στην περίπτωση σφάλματος δεν υπάρχει σύστημα αντιστάθμισης της άεργου ισχύος. Παρόλα αυτά σήμερα λόγω της εξέλιξης των ηλεκτρονικών ισχύος οι SCIG είναι δυνατόν με τη σύνδεση ενός ελεγχόμενου πλήρως μετατροπέα ισχύος να ελέγχεται η ενεργός και άεργος ισχύς και να προσαρμόζεται στις συνθήκες του ανέμου. Έτσι αποφεύγονται τυχόν διαταραχές καθώς και προσαρμόζεται η ταχύτητα περιστροφής ώστε να παράγεται η μέγιστη ισχύς σε όλο το φάσμα ταχυτήτων.



Σχήμα 6.8 : Γεννήτρια με ηλεκτρονικά μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα (διπλωματική εργασία, Κατσαρός Νικόλαος, 2019)



Σχήμα 6.9 : Γεννήτρια διπλής τροφοδότησης(διπλωματική εργασία, Κατσαρός Νικόλαος, 2019)

6.10. Υλικά για ανεμογεννήτριες

Σε πολλά μηχανήματα που παράγονται σήμερα και συγκεκριμένα στις ανεμογεννήτριες έχει αναγνωριστεί η σημασία του υλικού, η ποιότητα και οι ιδιότητες του.

Όσον αφορά τα πτερύγια η αεροδυναμική αλλά και η αντοχή τους παίζουν σημαντικό ρόλο στον βαθμό αποτελεσματικότητας της ανεμογεννήτριας. Περιλαμβάνουν τα υαλονήματα, τις εποξειδικές ρητίνες, τα ανθρακονήματα, τις πολυουρεθάνες, τις πολυστερίνες, τα

θερμοπλαστικά και τα ειδικά κεραμικά υλικά. Πλέον τα καταλληλότερα υλικά για πτερύγια είναι σύνθετα δηλαδή λαμβάνονται με το συνδυασμό υλικών που φέρουν διαφορετικές ιδιότητες στη φύση και στοχεύουν στο συνδυασμό υλικών που δε παρέχουν όλες τις ιδιότητες που επιθυμείτε όπως αντοχή στο χρόνο, ανθεκτικότητα στη διάβρωση, θερμική αγωγιμότητα, ακουστική μόνωση και άλλα.

Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα υλικά στη δομή των πτερυγίων σήμερα είναι τα πλαστικά ενισχυμένα με γυαλί. Επίσης τα σύνθετα υλικά με ανθρακονήματα (carbon fiber) παρόλο που προσφέρουν σημαντικές ιδιότητες σε υψηλές τιμές έχουν πολύ υψηλό κόστος.

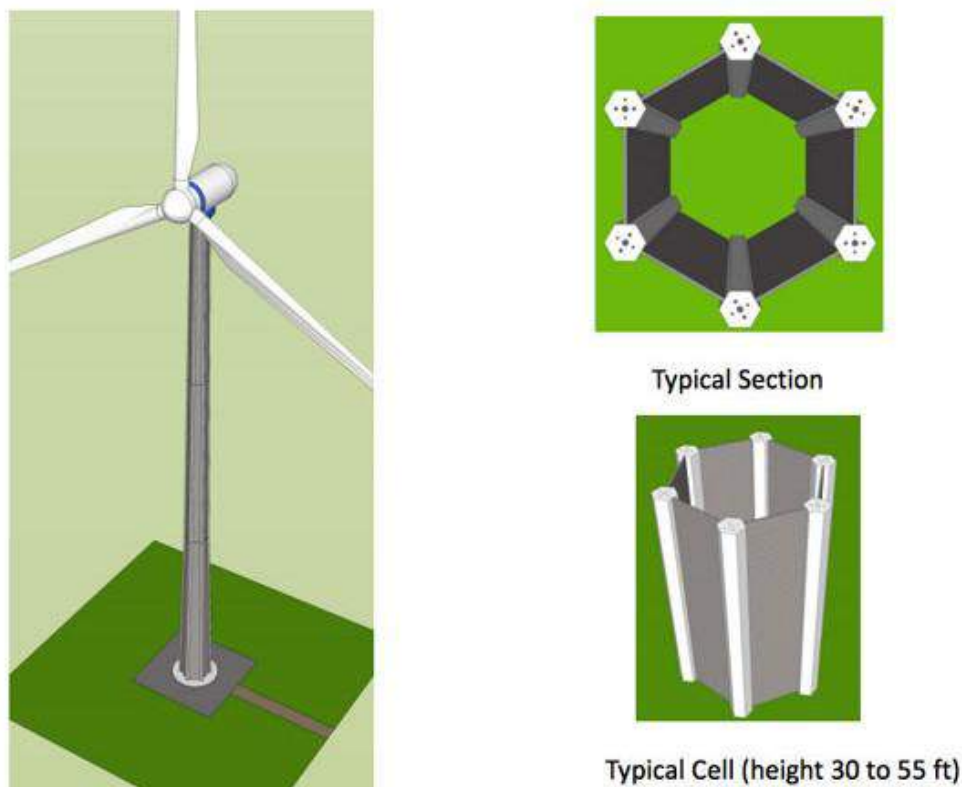
Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται όλα τα υλικά κατασκευής πτερυγίων ανεμογεννητριών καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους.

Πίνακας 6.1 : Υλικά Κατασκευής Πτερυγίων και Τεχνικά Χαρακτηριστικά τους. (Πηγή: http://www.redstar.gr/Foto_red/Other/Compozit.html, ανακτήθηκε 10.5.2016.)

Υλικό	Μέτρο Ελαστικότητας E (Kg/mm ²)	Μέγιστη τάση εφελκυσμού σ (Kg/mm ²)	Ειδικό βάρος (Kg/m ³)	Ειδικό μέτρο E/γ (m) X10 ⁵	Ειδική τάση σ/ γ (m) X10 ⁵
E- Υαλονήματα	7350	320	2550	2.9	1.25
S- Υαλονήματα	8400	380	2490	3.4	1.53
E-Υαλονήματα Εποξειδ.	5250	140	1940	2.7	0.72
S-Υαλονήματα Εποξειδ.	5250	210	1940	2.7	1.08
Κέβλαρ 29	6300	350	1440	4.4	2.43
Κέβλαρ 49	14000	350	1660	8.4	2.11
Κέβλαρ 49/Εποξειδ.	8400	200	1520	5.5	1.32
HM Νήματα Γραφίτη	38500	210	1910	20.2	1.10
HS Νήματα Γραφίτη	24500	245	1770	13.8	1.38
HM Γραφίτη Εποξειδ.	21000	95	1605	13.1	0.59
HS Γραφίτη Εποξειδ.	15400	145	1495	10.3	0.97
Νήματα Βορίου	42000	280	2630	16.0	1.06
Νήματα Βορίου/Εποξ.	21700	155	2075	10.5	0.75
Αλουμίνιο 7075-T6	7200	55	2685	2.7	0.20
Αλουμίνιο 6061-T6	7200	30	2685	2.7	0.11
Τιτανίο Ti-6Al-4V	11200	105	4430	2.5	0.24
Χρώμιο μολυβδαινούχος	20300	95	7830	2.6	0.12
Χάλυβας 4130					

Οι πύργοι των ανεμογεννητριών αποτελούν το 30-60 % του βάρους του στροβίλου, επομένων καταλαμβάνουν ένα μεγάλο ποσοστό του ολικού κόστους. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες υποστηρίζονται από κωνικό, σωληνωτό πύργο από χάλυβα. Το κόστος θα ήταν δυνατό να μειωθεί κατά πολύ με τη χρήση ελαφρύτερων υλικών στους πύργους των ανεμογεννητριών. Επίσης, το σκυρόδεμα δείχνει να είναι μια λύση υψηλών προσδοκιών ειδικά σε πύργους αυξημένου ύψους όπου οι κωνικοί πύργοι από χάλυβα μειονεκτούν. Επίσης σε σύγκριση με το χάλυβα το σκυρόδεμα μειονεκτεί όσον αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα όσο κατασκευάζεται. Παρά όλα ένας πύργος κατασκευασμένος από σκυρόδεμα (εικ.6.3) δύναται να διπλασιάζει τη κατά μέσο όρο διάρκεια ζωής της ανεμογεννήτριας εξ'ολοκλήρου.

Ένα ακόμη υλικό που μελετάται στην κατασκευή των πύργων της ανεμογεννήτριας είναι το ξύλο το οποίο παρουσιάζει ίδια πλεονεκτήματα τμηματικής μεταφοράς με το χάλυβα με τη διαφορά ότι δεν είναι κοστοφόρο ως προς την κατανάλωση.



Εικόνα 6.12 : Κατασκευή Πύργου Ανεμογεννήτριας από Σκυρόδεμα.

(Πηγή: Levitan, (2013), <http://spectrum.ieee.org/energywise/green-tech/wind/too-tall-for->

20.5.2016.)

Όσον αφορά τα υλικά κατασκευής των λεπίδων των ανεμογεννητριών, τα ιδανικά υλικά κατασκευής θα πρέπει να ικανοποιούν κάποιες προϋποθέσεις όπως εύκολη επεξεργασία, μεγάλη διαθεσιμότητα, ελαφρύ βάρος, χαμηλή πυκνότητα, μεγάλη αντοχή στην καταπόνηση, στην θραύση αλλά και στις περιβαλλοντικές συνθήκες (πχ υγρασία, κεραυνούς) και υψηλή ακαμψία για σταθερότητα. Οι περισσότερες λεπίδες ανεμογεννητριών στο εμπόριο κατασκευάζονται από πολυμερή ενισχυμένα με ίνες (FRP, σύνθετα υλικά συνδυασμός πολυμερούς βάσης με ίνες) τα οποία παρουσιάζουν ποικίλα οφέλη όπως διαμήκη αντοχή και ακαμψία.

Τα βασικότερα, υλικά κατασκευής ανεμογεννητριών σήμερα είναι σύνθετα υλικά. Αναλυτικότερα τα πιο διαδεδομένα είναι τα υβριδικά σύνθετα πολυμερών (HPC), τα υαλονήματα (GF), τα ανθρακονήματα (CF) και τα βασαλτονήματα (BF). Επειδή το κόστος των υαλονημάτων είναι σημαντικά μικρότερο από των ανθρακονημάτων είναι αυτά που κυριαρχούν σήμερα.

Η ακαμψία των λεπίδων των ανεμογεννητριών είναι πολύ σημαντική διότι αποφεύγεται η κάμψη των λεπίδων και έτσι αυτές δεν χτυπούν στον πύργο. Τα ανθρακονήματα σε σχέση με τα υαλονήματα είναι 4 με 6 φορές πιο άκαμπτα και για αυτό η εισροή τους στο εμπόριο είναι όλο και μεγαλύτερη. Μελλοντική κυρίαρχη τάση αποτελούν τα σύνθετα νάνονήματα, για να ενισχύσουν τα νανονσύνθετα μίγματα που βασίζονται σε πολυμερή, τα οποία διαθέτουν πολύ χαμηλή πυκνότητα αρά βελτιωμένη ελαστικότητα, δύναμη και αντοχή στη θραύση .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΛΙΒΑΔΑΚΙ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ WasP

7.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για το έργο Λιβαδάκι που βρίσκεται στη Στερεά Ελλάδα πραγματοποιήθηκε ανάλυση αιολικών πόρων και εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης. Έχουν τοποθετηθεί δύο ανεμογεννήτριες ίδιου τύπου.

Η ανάλυση βασίζεται σε δεδομένα μέτρησης ενός ιστού 40 m που είναι εγκατεστημένος στη τοποθεσία. Ο ιστός εγκαταστάθηκε στις 9/11/2006 και συνεχίζει να μετρά. Η διαμόρφωση των ιστών έγινε σύμφωνα με τις οδηγίες IEC61400-12-1 και εργαλεία λογισμικού wasp.

Τέλος, οι παράμετροι αβεβαιότητας σύμφωνα με τα πρότυπα έχουν τεκμηριωθεί και αναλυθεί.

Αυτή η έκθεση παρουσιάζει μια περιγραφή του τόπου του έργου και μια ανάλυση του τοπικών και μακροπρόθεσμων δεδομένων ανέμου με στόχο την εκτίμηση της μακροπρόθεσμης ταχύτητας ανέμου στο τόπο. Η μακροπρόθεσμη ταχύτητα ανέμου μεταφέρεται στη θέση και το ύψος του κέντρου των ανεμογεννητριών.

Αυτή η ανάλυση ακολουθείται από ένα υπολογισμό της αναμενόμενης απόδοσης ενέργειας του έργου μαζί με τις αναμενόμενες απώλειες και αβεβαιότητες. Όλες οι μεθοδολογίες που χρησιμοποιούνται για αυτήν την αναφορά είναι σύμφωνα με τις τυπικές βιομηχανικές πρακτικές.

Όλοι οι πίνακες, οι εικόνες και τα σχήματα που περιλαμβάνονται στο κεφάλαιο 8 παρέχονται από τη Nostira S.A. μέσω των εντύπων, General Spfication V112-3.0 MW (Class 1 V-CEU Document no.: 0011-9181-R02), GSpecsV112.pdf (General Specification T05 Item no.: 0004-7993 V00 2009-06-30), Karkaros Wind Farm Energy Yield Assessment και άλλων δεδομένων που παρέχονται μέσω των αποτελεσμάτων των προγραμμάτων windographer και WasP.

Η ανάλυση και η έκθεση έχουν συνταχθεί σύμφωνα με

1. Τεχνικές κατευθυντήριες γραμμές για ανεμογεννήτριες

Προσδιορισμός του αιολικού δυναμικού και της απόδοσης ενέργειας Αναθεώρηση 9
23/04/2015 - FGV

2. Ανεμογεννήτριες -Μέρος 12-1: Μετρήσεις απόδοσης ισχύος για παραγωγή ηλεκτρισμού
της ανεμογεννήτριας 2017 - IEC

3. Αξιολόγηση των ειδικών για τον ιστότοπο συνθηκών ανέμου

4. Τεχνική τεκμηρίωση Συστημάτων γεννήτριας ανεμογεννητριών 5.5-158 - 50Hz
Υπολογισμένη καμπύλη ισχύος και συντελεστής ώθησης REV01 12/06/2019 – GE.

7.2 Περιγραφή τοποθεσίας

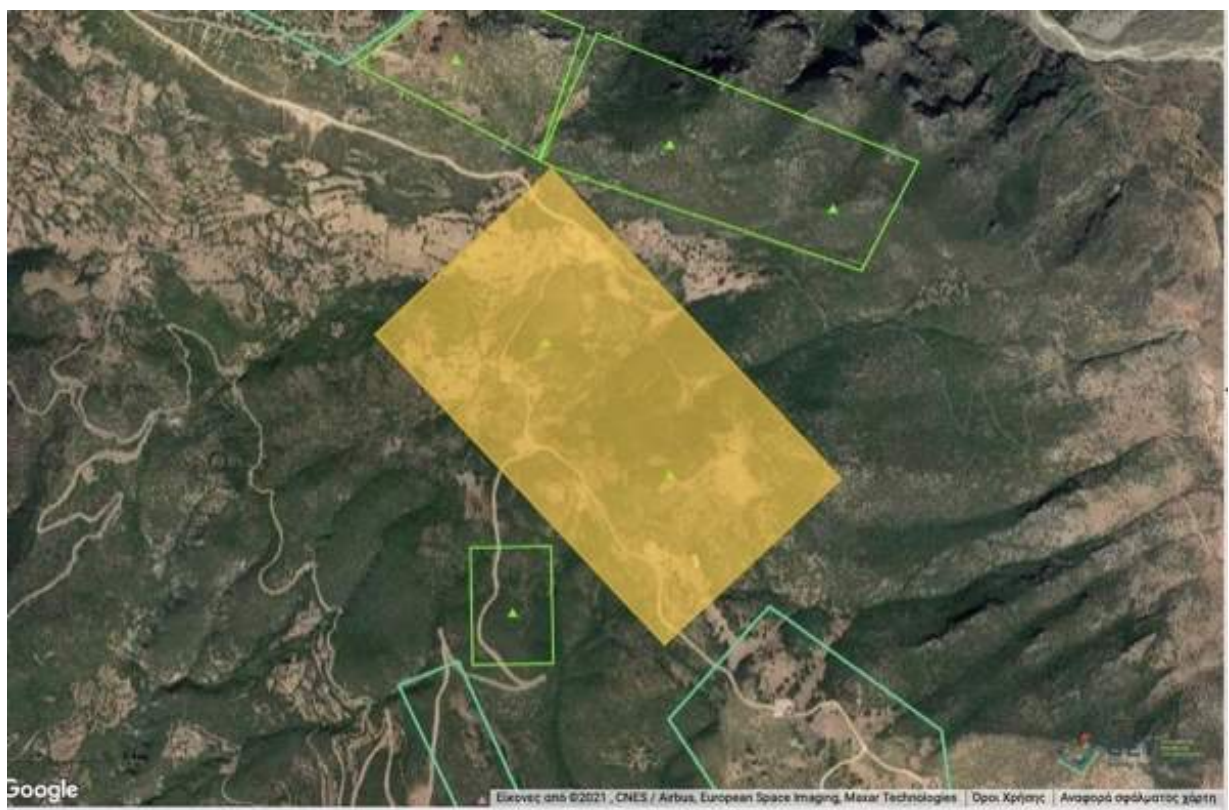
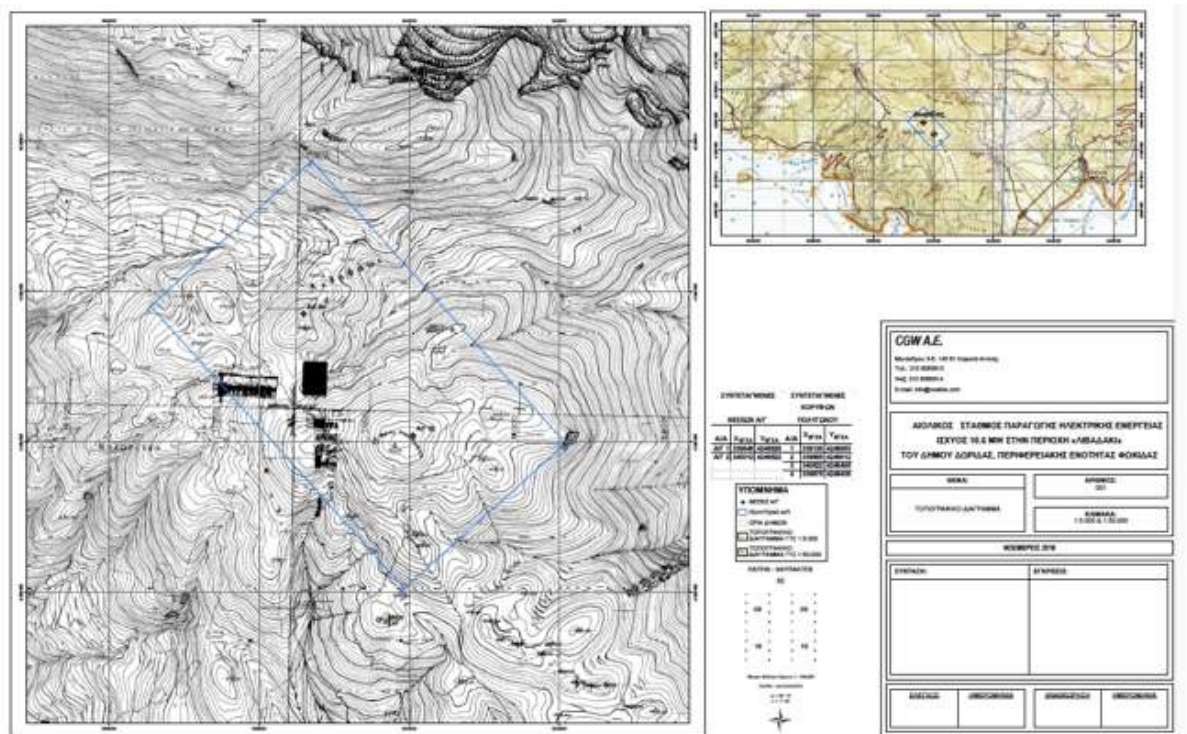
Η τοποθεσία Λιβαδάκι βρίσκεται στην περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας στη περιφερειακή
ενότητα Φωκίδος, στο Δήμο Δωρίδος, στη δημοτική ενότητα Τολοφώνος.

Στο παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι συντεταγμένες τις τοποθεσίας.

Πίνακας 7.1 : Συντεταγμένες τοποθεσίας αιολικού πάρκου Λιβαδάκι.

Χ/Γεωγρ. Μήκος	Υ/Γεωγρ. Πλάτος
☐ Τμήμα:1	
339675	4249436
340522	4248495
339985	4248012
339138	4248953

Η τοποθεσία και η τοπογραφία του αιολικού πάρκου απεικονίζονται στο παρακάτω
σχήμα.



Εικόνα 7.1 : Τοπογραφικό διάγραμμα του αιολικού πάρκου Λιβαδάκι.

7.3 Μετρήσεις ανέμου

Ένας ιστός 30 μέτρων ήταν εγκατεστημένος, αργότερα για μεγαλύτερη ακεραιότητα των δεδομένων ανέμου ανακατασκευάστηκε στα 40 μέτρα, με σκοπό την αξιολόγηση των συνθηκών ανέμου της συγκεκριμένης τοποθεσίας.

Για την ανάλυση των ανεμολογικών δεδομένων χρησιμοποιείται το πρόγραμμα **windographer**. Αυτό το πρόγραμμα σε συνδυασμό με τα δεδομένα που έχουν ληφθεί από τον ιστό μέτρησης που είναι εγκατεστημένος στη περιοχή Λιβαδάκι παρέχονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες που αφορούν την ταχύτητα, τη διεύθυνση του ανέμου και άλλες σημαντικές παραμέτρους. Το windographer εισάγει γρήγορα σχεδόν κάθε μορφή δεδομένων, επιτρέπει γρήγορο ποιοτικό έλεγχο και στατιστική ανάλυση και εξάγει σε όλα τα κοινά μοντέλα ροής ανέμου.

Στις μελέτες αξιολόγησης των αιολικών πόρων, η μεταβολή του ανέμου αναλύεται χρησιμοποιώντας κατανομές συχνότητας ταχύτητας και κατεύθυνση ανέμου, ταχύτητας ανέμου σε σχέση με το ύψος και μέση ταχύτητα ανέμου ανάλογα με την ώρα της ημέρας. Με βάση αυτές και άλλες μεταβλητές, η κατάλληλη ανεμογεννήτρια για να σχεδιάζεται ή επιλέγεται βάση της συγκεκριμένη θέσης για την ανεμογεννήτρια και την πρόβλεψη της ισχύος ή της ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να αξιοποιηθεί στη περιοχή.

7.3.1 ιστός KLA4002

Ο ιστός KLA4002 εγκαταστάθηκε από την 2EN S.A τον Νοέμβριο του 2006 και συνεχίζει να μετρά. 2EN είναι διαπιστευμένο για την εκτέλεση των μετρήσεων ανέμου σύμφωνα με το ΕΛΟΤ EN ISO 17025: 2005. Ο ιστός εγκαταστάθηκε σύμφωνα με τις συστάσεις του IEC 61400-12-1: 2006 με το χρήση ενός πάνω (πρωτεύοντος) ανεμόμετρου και ενός βραχίονα (δευτερεύον) ανεμόμετρου.

Ο προσανατολισμός των πλευρικών βραχιόνων θα προκαλούσε σκίαση σε τομείς με χαμηλή εμφάνιση.

Μια σύντομη περιγραφή της θέσης του ιστού δίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 7.2 : Περιγραφή θέσης ιστού KLA4002

Company	EDF EN GREECE S.A. & CO FOKIDA 4 LLP
Wind farm	Kato Lakomata
Country	Greece
Province / Municipality	Kato Lakomata fokida
Measurement station	KLA4002
Installation Contractor	2EN

x (m)	340003
y (m)	4248488
Coordinate System	EGSA 87
Altitude (m)	704
Mast type	TUBULAR
Levels	15/30/40
Installation date	09/11/2006
Removal date	

Ο ιστός είναι εξοπλισμένος με ανεμόμετρα, ανεμοδείκτες και 1 θερμόμετρο. Όλα τα ανεμόμετρα και οι ανεμοδείκτες βαθμονομήθηκαν από τον ΙWE, μέλος της Μέτρησης Δικτύου Ινστιτούτων Αιολικής Ενέργειας (MEASNET). Οι παράμετροι βαθμονόμησης ήταν άμεσα προγραμματισμένοι στο καταγραφικό δεδομένων.

Στον παρακάτω πίνακα μια σύντομη περιγραφή των οργάνων του.

Πίνακας 7.3 : Περιγραφή των οργάνων του ιστού KLA4002

Height	Type	Serial Number	Installation date	Removal date	Calibration curve		Boom Aiming	Channel	Notes
					Slope (Hz/(m/s))	Offset (m/s)			
15	NRG	EE129	09/11/2006	01/10/2009	0.7659	0.3248	320	C1	
29	NRG	EE137	09/11/2006	01/10/2009	0.7690	0.3186	340	C2	
29	VECTOR A100LK	2087/CSR	09/11/2006	01/10/2009	0.0507	0.2916	180	C3	
15	NRG MAX 40	179500110549	01/10/2009	07/04/2011	0.7774	0.2595	320	C1	Second Calibration OK
29	NRG MAX 40	179500110835	01/10/2009	07/04/2011	0.7753	0.2845	320	C2	Second Calibration OK
29	VECTOR A100LK	2125-DBI	01/10/2009	07/04/2011	0.0504	0.2750	180	C3	Second Calibration OK
15	VECTOR A100LK	3405-KDK	07/04/2011	12/10/2013	0.0503	0.2700	320	C1	
29	NRG MAX 40	179500167724	07/04/2011	12/10/2013	0.7640	0.3200	340	C2	
29	VECTOR A100LK	5166-SMB	07/04/2011	12/10/2013	0.0495	0.2800	180	C3	
40	NRG MAX 40	179500167721	07/04/2011	12/10/2013	0.7660	0.3100	340	C4	
40	VECTOR A100LK	5167-SMC	07/04/2011	12/10/2013	0.0500	0.2600	180	C5	
15	VECTOR A100L2	6633/EAC	18/10/2013	21/12/2015	0.0501	0.2200	319	C1	Second Calibration OK
29	SECOND WIND	25094	18/10/2013	21/12/2015	0.7614	0.3890	342	C2	Second Calibration FAIL
29	VECTOR A100LK	8194/E224A	18/10/2013	21/12/2015	0.0503	0.2300	182	C3	Second Calibration OK
40	SECOND WIND	25096	18/10/2013	21/12/2015	0.7650	0.3150	342	C4	Second Calibration OK
40.25	VECTOR A100LK	8199/E229A	18/10/2013	21/12/2015	0.0506	0.1900	181	C5	Second Calibration OK
15	VECTOR A100LM	2202-E30C	21/12/2015		0.0960	0.2400	319	C1	
29	NRG MAX 40	1795-00248800	21/12/2015		0.7610	0.3300	342	C2	
29	VECTOR A100LK	5085-EG17	21/12/2015		0.0505	0.2300	182	C3	
40	NRG MAX 40	1795-00248808	21/12/2015		0.7620	0.3400	342	C4	
40.25	VECTOR A100L2	12527-EBRK	21/12/2015		0.0500	0.2800	181	C5	

Height	Type	Serial Number	Installation date	Removal date	Offset (°)	Channel	Notes
17	NRG 200P	2EN W39	09/11/2006	01/10/2009	198	A1	
27	NRG 200P	2EN W42	09/11/2006	01/10/2009	14	A2	
17	NRG 200P	2EN W467	01/10/2009	07/04/2011	198	A1	Offset in Data logger was 14
27	NRG 200P	2EN W470	01/10/2009	07/04/2011	14	A2	Offset in Data logger was 198
17	NRG 200P	2EN W481	07/04/2011	12/10/2013	14	A1	
27	NRG 200P	2EN W486	07/04/2011	12/10/2013	198	A2	
17	NRG 200P	EEN W001	18/10/2013	21/12/2015	14	A1	
27	NRG 200P	EEN W003	18/10/2013	21/12/2015	198	A2	
17	NRG 200P	2EN W 616	21/12/2015		12	A1	
27	NRG 200P	2EN W 618	21/12/2015		197	A2	

Other measurement equipment

Sensor	Type	Serial Number	Installation date	Removal date	Height	Calibration		Channel	Notes
						Slope	Offset		

THERMOMETER	VECTOR T351 PX	1315	09/11/2006	21/12/2015	5			A3	
-------------	----------------	------	------------	------------	---	--	--	----	--

Όλοι οι προσανατολισμοί των βραχιόνων αναφέρονται στο μαγνητικό βορρά. Η τοποθεσία του ιστού και η γύρω περιοχή παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.

Οι παρακάτω είναι εικόνες από την εγκατάσταση του ιστού KLA4002.



(α)



(β)

Εικόνα 8.2 (α), (β) Εγκατάσταση του KLAKE4002 το 2006.



Εικόνα 7.3 : (α), (β) Εγκατάσταση του KLAKE4002 το 2018.

Όλα τα δεδομένα ιστού ελέγχονται σύμφωνα με τα πρότυπα της βιομηχανίας. Δεδομένα που θεωρείται ότι είναι επηρεασμένα από την τήξη ή από δυσλειτουργία του αισθητήρα αφαιρούνται από το σύνολο δεδομένων.

7.3.1.1 .Ανάλυση ανέμου

Όλα τα δεδομένα ιστού ελέγχονται σύμφωνα με τα πρότυπα της βιομηχανίας. Δεδομένα που θεωρείται ότι είναι επηρεασμένα από την τήξη ή από δυσλειτουργία του αισθητήρα αφαιρούνται από το σύνολο δεδομένων.

Στο ακόλουθο πίνακα παρατίθενται μια σύνοψη των αισθητήρων ταχύτητας ανέμου.

Πίνακας 7.4 : Σύνοψη των αισθητήρων ταχύτητας ανέμου.

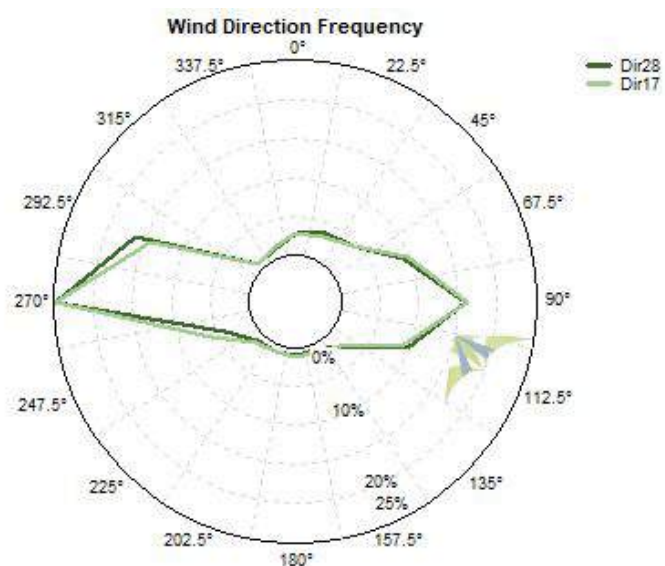
Variable	U40_a	U40_b	U29_a	U29_b	U15
Measurement height (m)	40.2	40	29	29	15
Mean wind speed (m/s)	6.699	6.580	6.612	6.374	6.067
MoMM wind speed (m/s)	6.672	6.552	6.586	6.348	6.044
Median wind speed (m/s)	5.730	5.700	5.630	5.620	5.300
Min wind speed (m/s)	0.190	-0.505	0.200	-0.545	0.200
Max wind speed (m/s)	31.275	31.615	30.390	30.040	27.060
CRMC wind speed (m/s)	8.895	8.876	8.733	8.663	8.088
Weibull k	1.666	1.532	1.707	1.421	1.570
Weibull A (m/s)	7.511	7.286	7.435	6.961	6.729
Mean power density (W/m ²)	398	396	377	368	299
MoMM power density (W/m ²)	394	391	373	364	296
Mean energy content (kWh/m ² /yr)	3,490	3,467	3,302	3,224	2,622
MoMM energy content (kWh/m ² /yr)	3,449	3,426	3,265	3,185	2,593
Energy pattern factor	2.341	2.454	2.304	2.510	2.369
Frequency of calms (%)	0.00	0.05	0.00	0.01	0.00
Possible data points	546,511	546,511	546,511	546,511	546,511
Valid data points	544,592	544,592	544,592	544,592	544,592
Missing data points	1,919	1,919	1,919	1,919	1,919
Data recovery rate (%)	99.65	99.65	99.65	99.65	99.65

7.3.1.2 Κατανομή ανέμου

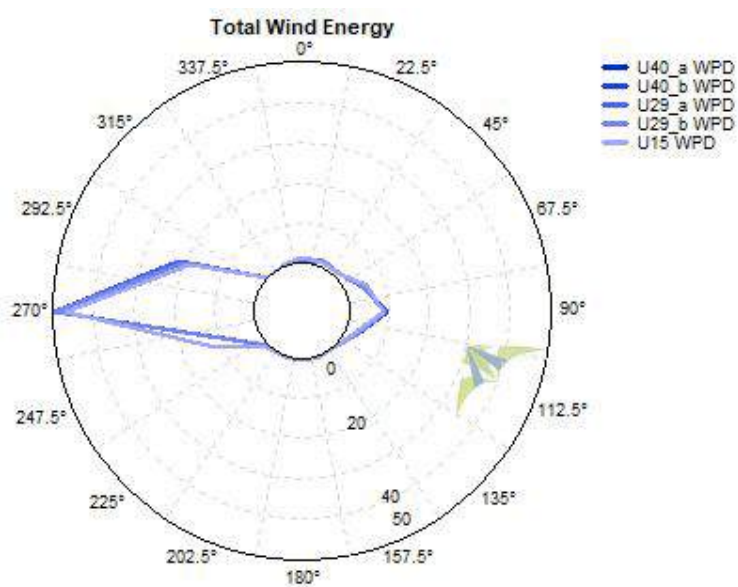
Όπως φαίνεται από τα παρακάτω σχήματα, η κύρια εμφάνιση της συνεισφοράς της ενέργειας είναι από τις ανατολικές και νοτιοδυτικές κατευθύνσεις

Ένα ροδόγραμμα είναι ένας κύκλος μέσω του οποίου ο ορίζοντας διαιρείται ανάλογα με την κατεύθυνση του τέσσερα βασικά σημεία, τυπικά σε 8, 12 ή 16 τομείς (45, 30 ή 22,5 μοίρες ανά τομέα, αντίστοιχα), και σχεδιάζεται το ποσοστό του ανέμου που φυσά προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Βασική χρήση του ροδογράμματος είναι ο προσδιορισμός της βέλτιστης θέσης για μια ανεμογεννήτρια. Στο σχήμα 7.1(α) φαίνεται η Κατεύθυνση του ανέμου ως συνάρτηση της συχνότητας και της ενέργειας.

Τα προφίλ εποχιακού και ημερησίου ανέμου στην ακριβή τοποθεσία του ιστού φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



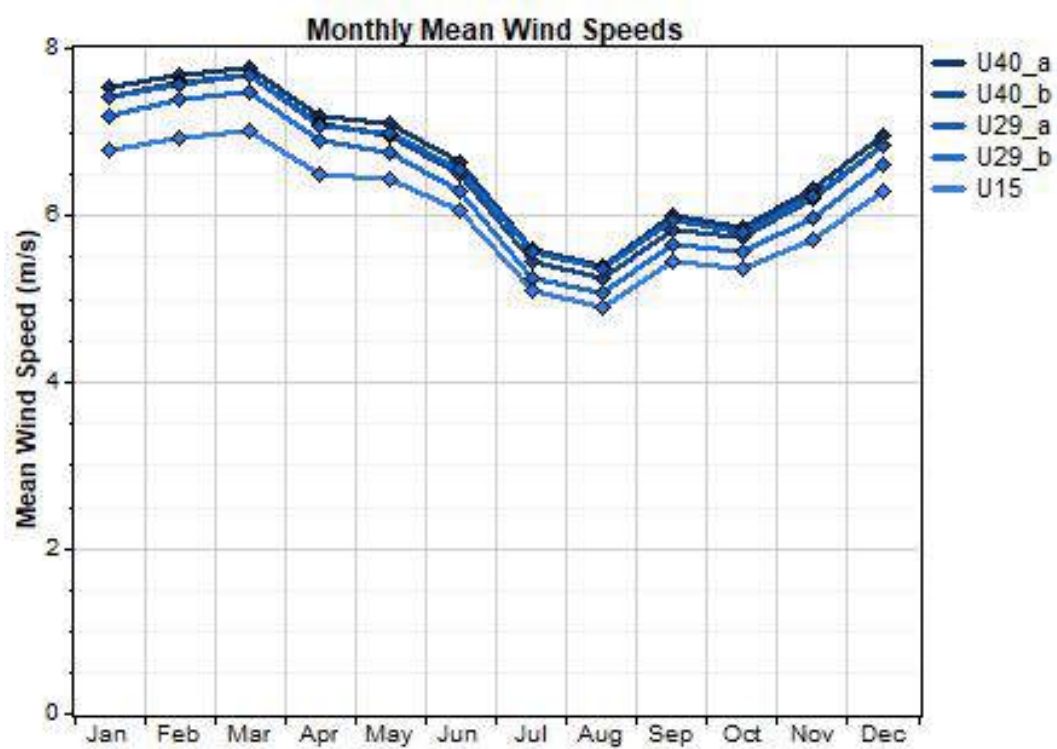
(α)



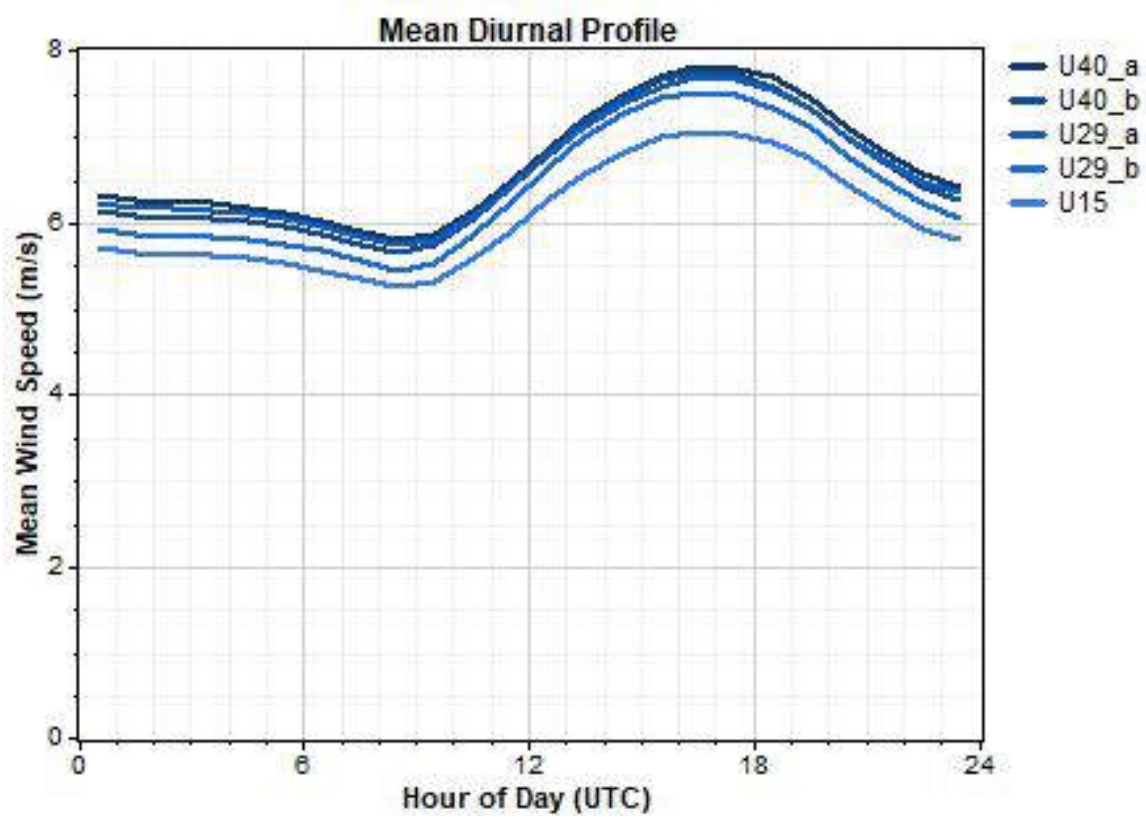
(β)

Σχήμα 7.1 (α) συχνότητα κατεύθυνσης ανέμου στη τοποθεσία του ιστού , (β) ολική αιολική ενέργεια στην τοποθεσία του ιστού

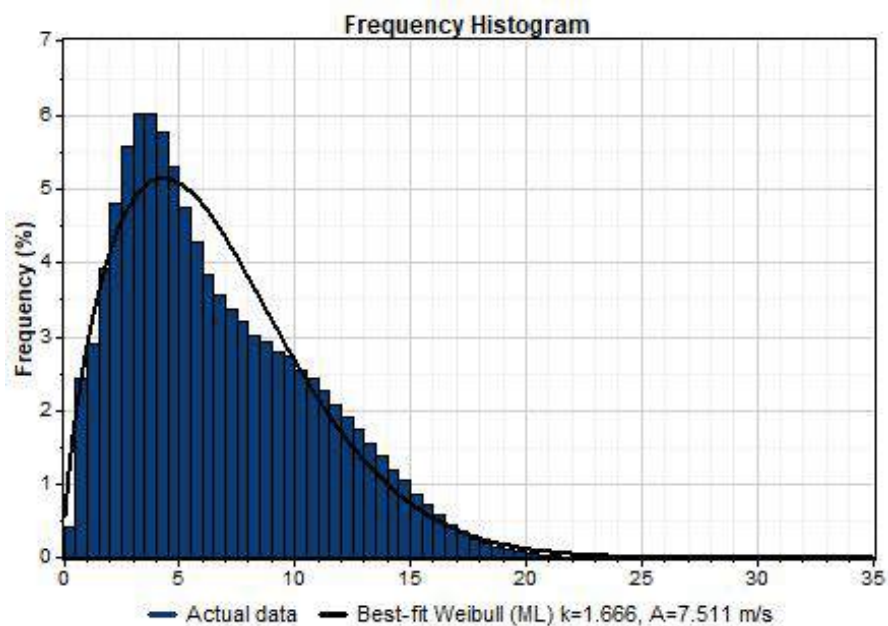
Τα εποχιακά προφίλ ανέμου στην ακριβή τοποθεσία του ιστού φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 7.2 : Εποχιακά προφίλ ανέμου στην τοποθεσία του ιστού



Σχήμα 7.3: Καθημερινή διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου



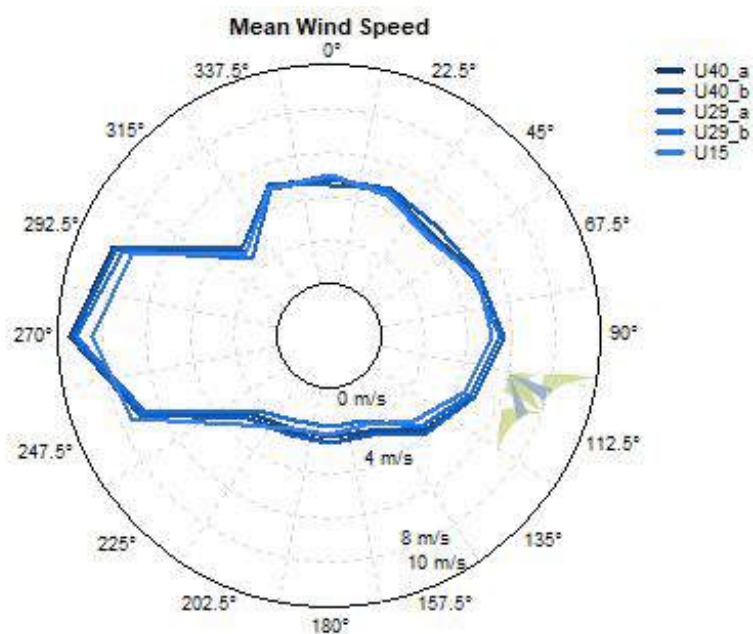
Σχήμα 7.4 : Ιστογράμμο συχνότητας

Η διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου μεταξύ δύο διαφορετικών υψών περιγράφεται χρησιμοποιώντας τη διάτμηση του ανέμου

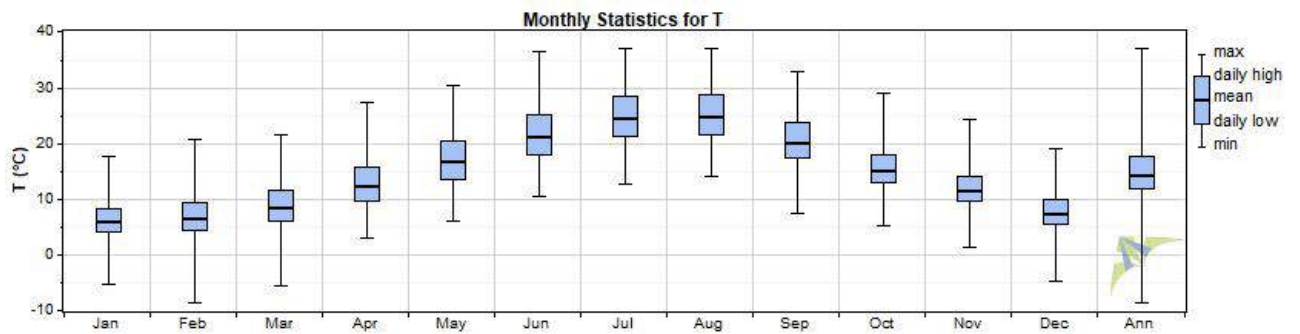
εκθέτης α στον παρακάτω τύπο:

$$V_1 = V_2 \times (h_1/h_2)^\alpha \quad \text{Όπου,}$$

Τα V_1 και V_2 είναι οι ταχύτητες ανέμου για τα ύψη h_1 και h_2 αντίστοιχα.

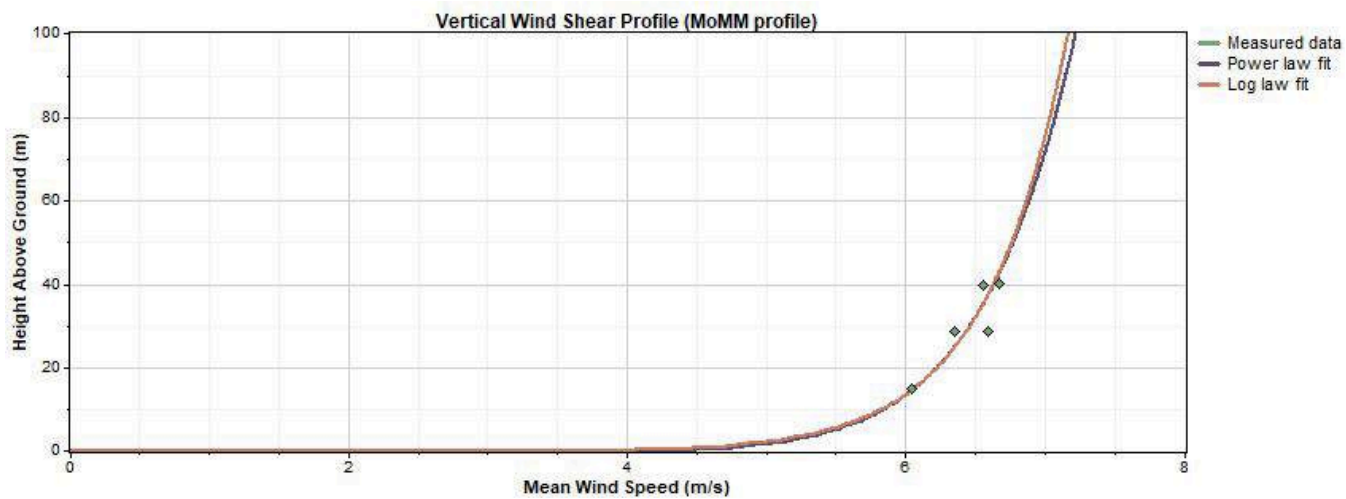


Σχήμα 7.5 Κατανομή ανέμου για όλες τις βασικές διευθύνσεις ανέμου για την περίοδο αναφοράς

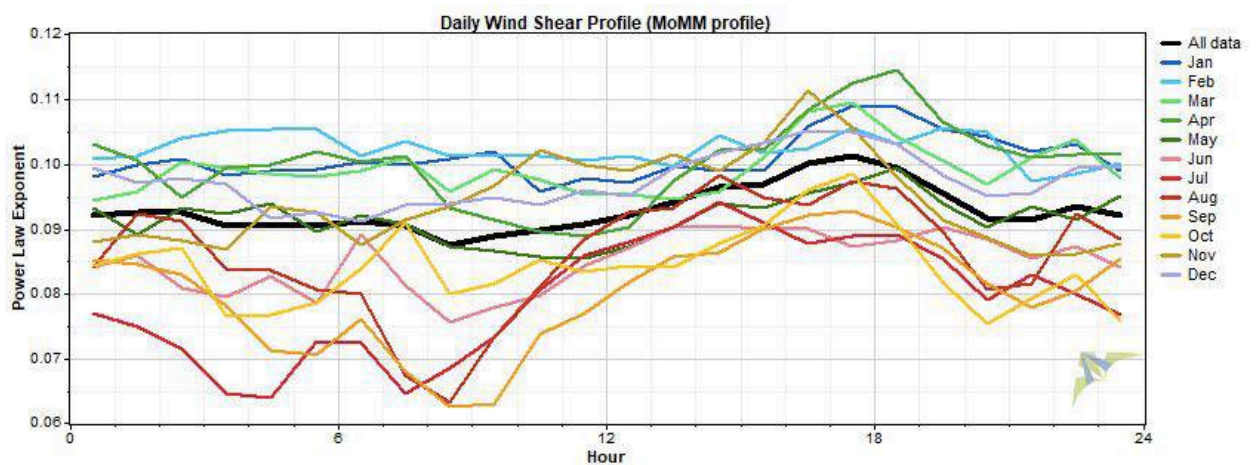


Σχήμα 7.6 Εποχιακές διακυμάνσεις θερμοκρασίας.

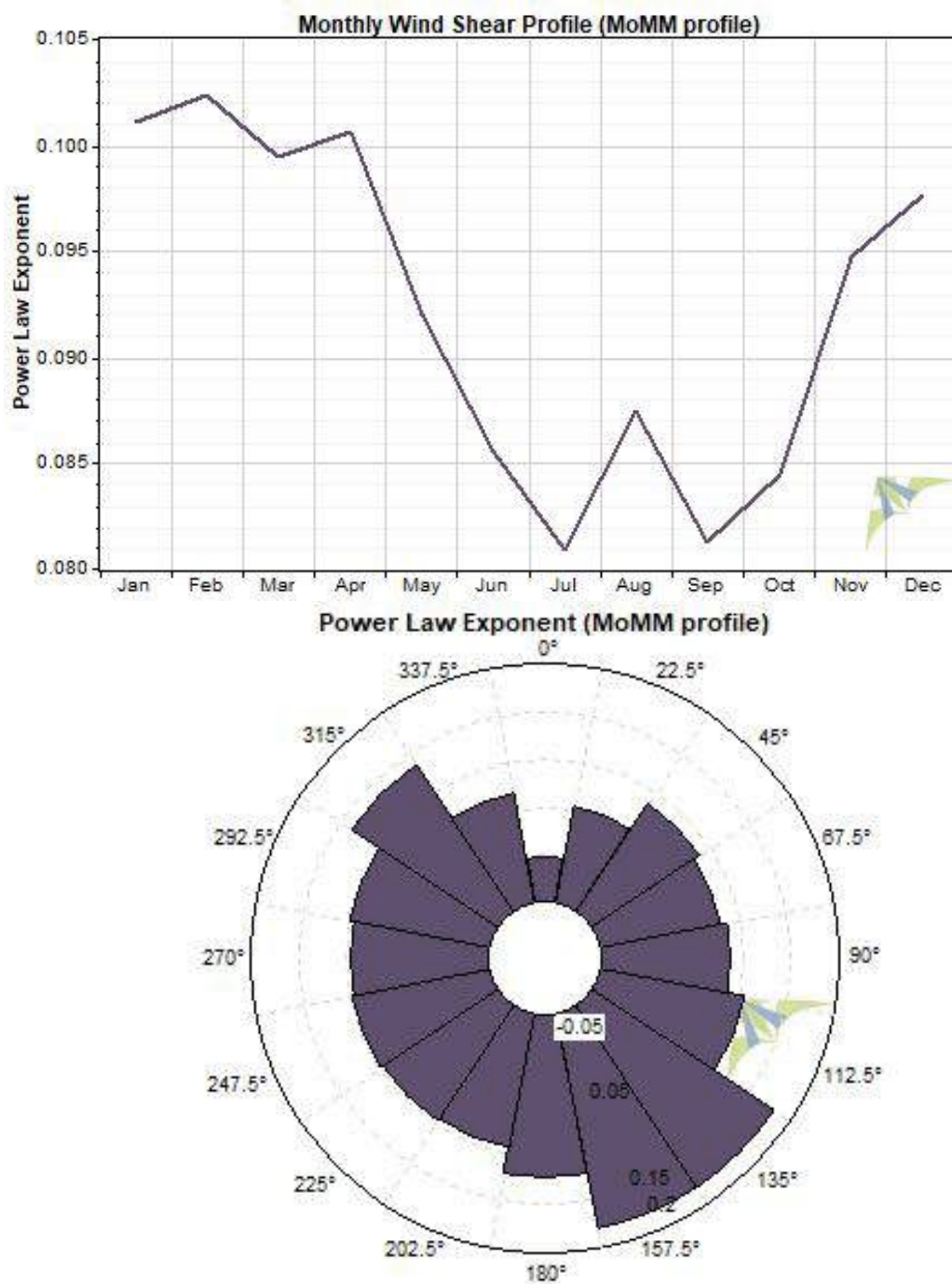
8.3.1.4 Διάτμηση ανέμου



Σχήμα 7.7 : κατακόρυφο προφίλ διάτμησης ανέμου



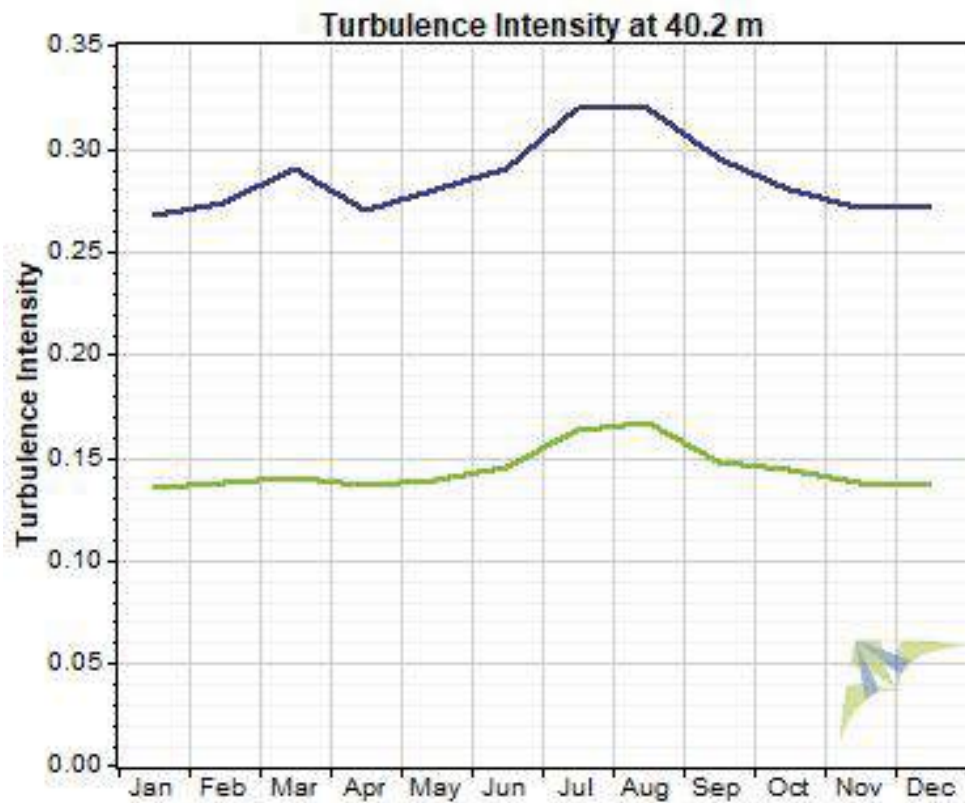
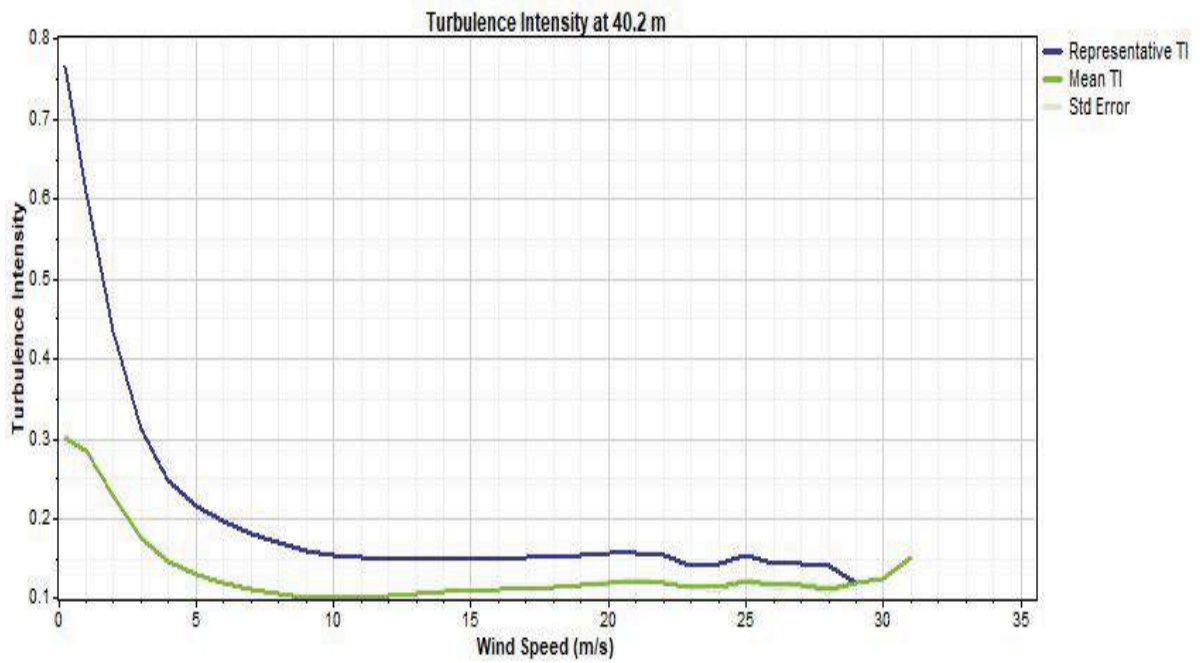
Σχήμα 7.8 : Καθημερινό προφίλ διάτμησης ανέμου

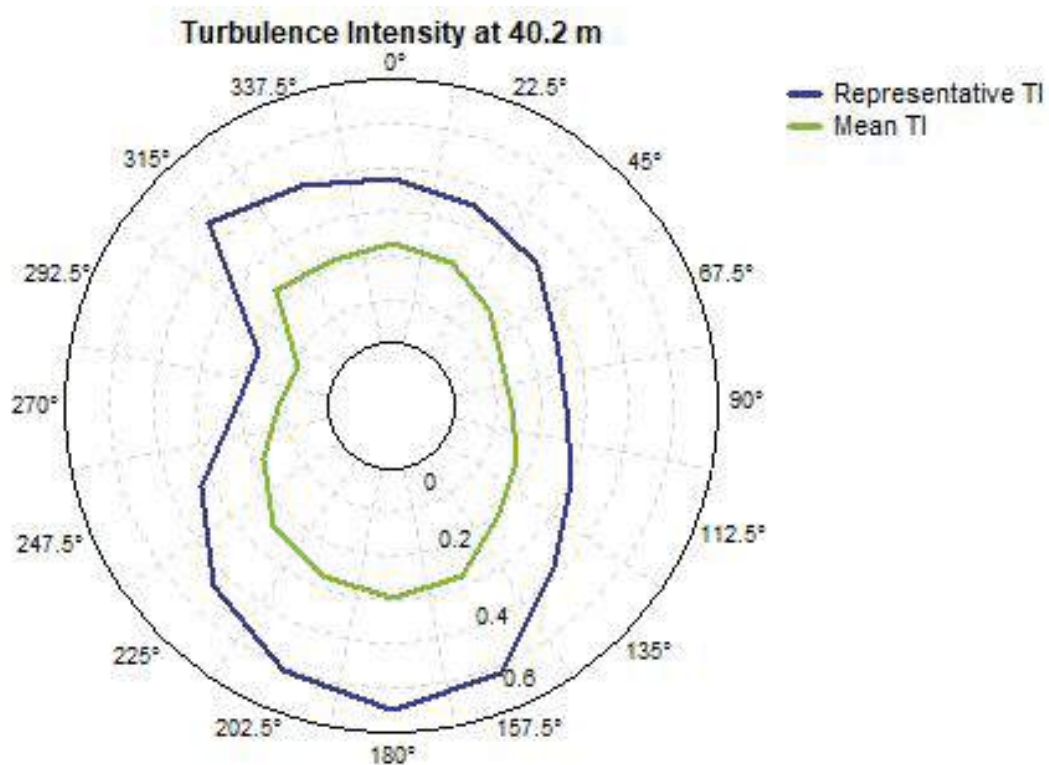


Σχήμα 7.9 : Εποχιακό προφίλ διάτμησης ανέμου

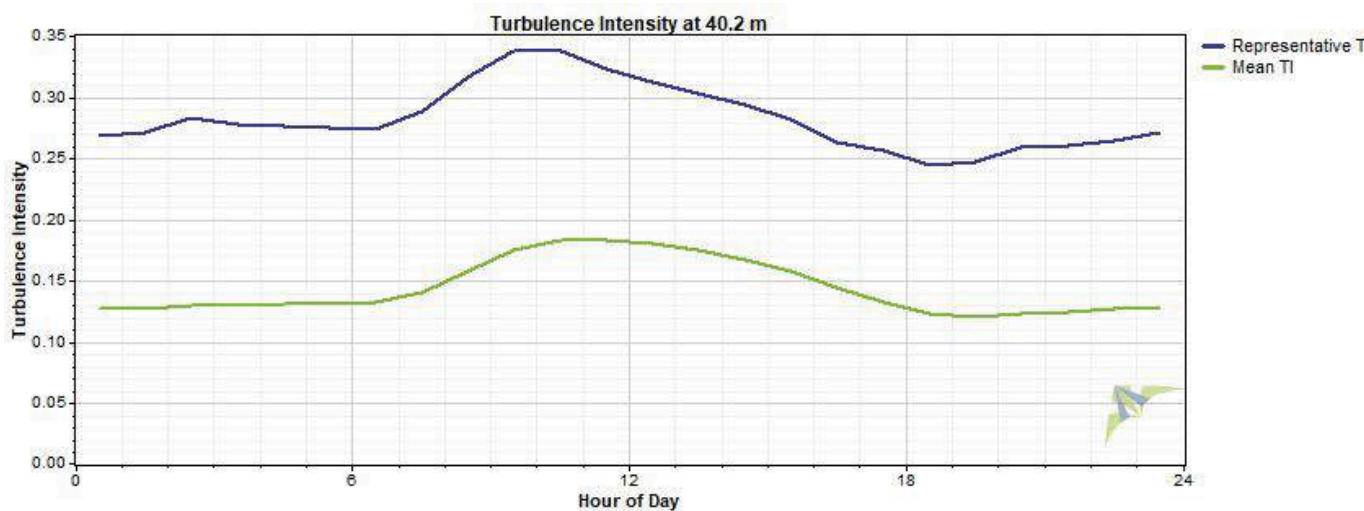
7.3.1.5 Ένταση στροβιλισμού (turbulence intensity, TI)

Η ένταση του στροβιλισμού (TI) υπολογίζεται ως ο λόγος της τυπικής απόκλισης ταχύτητας ανέμου προς τον ταχύτητα του ανέμου. Το TI χρησιμοποιείται στην μοντελοποίηση ομίχου και στην πρόβλεψη απώλειας απόδοσης στροβίλου.





Σχήμα 7.10 Ένταση στροβιλισμού σε σχέση με τη ταχύτητα του ανέμου στα 40.2μ



Σχήμα 7.11 : Ένταση στροβιλισμού στη διάρκεια της ημέρας

7.4 Μακροπρόθεσμη ανάλυση

Είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη σωστή εκτίμηση του συστήματος αιολικής ενέργειας στον ισότοπο να προσαρμόσει τα διαθέσιμα δεδομένα μέτρησης ισότοπου σε μακροπρόθεσμη περίοδο. Αυτό γίνεται για να εξαλειφθούν οι ετήσιες διακυμάνσεις της

βραχυπρόθεσμης περιόδου μέτρησης. Δεδομένα δέκα ετών θεωρήθηκε ότι είναι αντιπροσωπευτικά.

7.4.1 Δεδομένα αναφοράς

Πραγματοποιήθηκε εκτενής ανασκόπηση των διαθέσιμων μακροπρόθεσμων δεδομένων προκειμένου να βρεθούν τα περισσότερα κατάλληλα σύνολα δεδομένων για αυτήν την ανάλυση. Η ανάλυση λαμβάνει υπόψη την απόσταση από το έργο, το ποσοστό ανάκτησης, συνέπεια των δεδομένων, μακροπρόθεσμες τάσεις, κατανομή κατεύθυνσης και συσχέτιση μεταξύ δεδομένων αναφοράς και επιτόπου.

7.4.2 Μακροπρόθεσμη προσαρμογή

Προκειμένου να κατασκευαστεί μια χρονοσειρά που θα είναι αντιπροσωπευτική του μακροπρόθεσμου αιολικού πόρου στη τοποθεσία Λιβαδάκι για τη περίοδο ενός έτους η οποία κλιμακώθηκε για να είναι αντιπροσωπευτική του μακροπρόθεσμου ανέμου.

Η επιλογή της περιόδου βασίστηκε στη διαθεσιμότητα των δεδομένων επιτόπου και στην ομοιότητα της μέσης ταχύτητας ανέμου και της κατανομής των βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων περιόδων

7.5 Προσομοίωσης ροής ανέμου

Για την παρέκταση των δεδομένων από το σημείο του ιστού στις θέσεις της ανεμογεννήτριας και την ανάλυση του πεδίου ροής, λόγω της πολυπλοκότητας του εδάφους χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program). Το λογισμικό **WAsP** είναι κατάλληλο για την αξιολόγηση και την πρόβλεψη των αιολικών πόρων, τη χωροθέτηση και τον υπολογισμό της απόδοσης ενέργειας για ανεμογεννήτριες και αιολικά πάρκα. Χρησιμοποιείται για τοποθεσίες που βρίσκονται σε όλα τα είδη εδάφους σε όλο τον κόσμο. Οι προβλέψεις του προγράμματος είναι βασισμένες σε δεδομένα ανέμου που προκύπτουν από μετρήσεις σε μετεωρολογικούς σταθμούς ή σε κλίματα ανέμου που είναι αποτέλεσμα mesoscale μοντέλων.

Τυπικές εφαρμογές του λογισμικού WAsP είναι ο υπολογισμός της ενεργειακής απόδοσης για μεμονωμένες ανεμογεννήτριες και αιολικά πάρκα, ο υπολογισμός της απόδοσης των αιολικών πάρκων, η χαρτογράφηση αιολικών πόρων και αναταράξεων, η μικρο-θέτηση ανεμογεννητριών, ο υπολογισμός και η ανάλυση των συνθηκών ανέμου για την

98

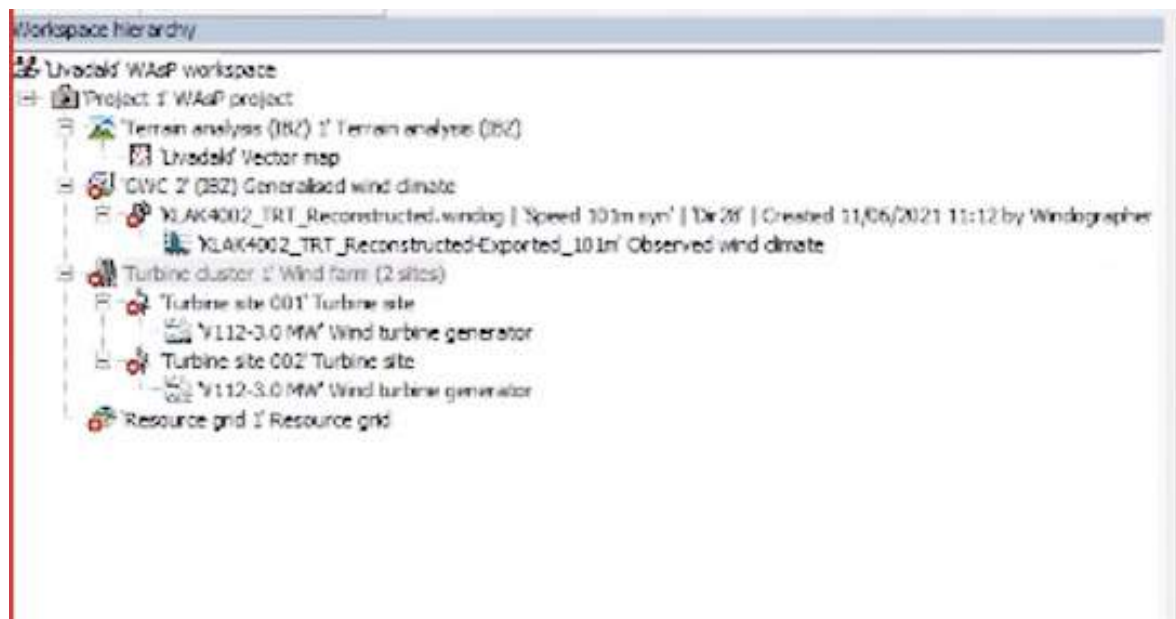
αξιολόγηση της θέσης IEC για μεμονωμένες ανεμογεννήτριες σε ένα αιολικό πάρκο, π.χ. μέση ταχύτητα ανέμου, διάτμηση αέρα, αναταραχή περιβάλλοντος, ακραία κλίση ανέμου και ροής ανέμου.

Το πρόγραμμα περιλαμβάνει επίσης ένα πολύπλοκο μοντέλο ροής εδάφους (WasP CFD), ένα μοντέλο αλλαγής τραχύτητας, ένα μοντέλο ωμώρου ανεμογεννήτριας, ένα μοντέλο αλλαγής τραχύτητας και ένα μοντέλο μέσες ατμοσφαιρικές συνθήκες σταθερότητας στη τοποθεσία. Επίσης για την δημιουργία ανεμοκλιματολογικών εισόδων περιλαμβάνει ένα Climate Analyst, έναν επεξεργαστή χαρτών για να δημιουργεί και να επεξεργάζεται τις εισόδους τοπογραφίας καθώς και ένα επεξεργαστή ανεμογεννητριών.

Για την ανάλυση των ανεμολογικών δεδομένων χρησιμοποιείται το πρόγραμμα windowgrapher. Αυτό το πρόγραμμα σε συνδυασμό με τα δεδομένα που έχουν ληφθεί από τον ιστό μέτρησης που είναι εγκατεστημένος στη περιοχή Λιβαδάκι παρέχονται όλες οι απαραίτητες πληροφορίες που αφορούν την ταχύτητα, τη διεύθυνση του ανέμου και άλλες σημαντικές παραμέτρους.

7.5.1 Ιεραρχία επιφάνειας εργασίας του WasP (Workspace hierarchy of WasP)

Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η επιφάνεια εργασίας του WasP για το έργο Λιβαδάκι και στη συνέχεια περιγράφεται και αναλύεται.



Εικόνα 7.4 : Ιεραρχία επιφάνειας εργασίας του WasP

Όταν ανοίγει για πρώτη φορά το WasP παρουσιάζεται ένα άδειο παράθυρο. Πρώτα θα πρέπει να εγκατασταθούν δείγματα δεδομένων επιλέγοντας open workspace (άνοιγμα επιφάνειας εργασίας) από το file menu (μενού αρχείων), ένα παράθυρο ζητά να εγκατασταθούν δείγματα δεδομένων. Στη συνέχεια πρέπει να εισαχθεί ο κατάλληλος φάκελος και να πατηθεί install (εγκατάσταση). Για να ξεκινήσει θα πρέπει να ανοιχθεί μία επιφάνεια εργασίας (workspace), όλες οι εργασίες εκτελούνται στο πλαίσιο της. Για να ανοιχθεί ένα workspace πρέπει να επιλεγεί New workspace (Νέος χώρος εργασίας) από το File menu (μενού αρχείων). Ένα λευκό παράθυρο εμφανίζεται στην αριστερή πλευρά από το βασικό παράθυρό. Αυτό το παράθυρο ονομάζεται Workspace hierarchy (ιεραρχία χώρου εργασίας. Η κορυφή του Workspace hierarchy περιέχει ένα μεμονωμένο εικονίδιο, που αντιπροσωπεύει τη ρίζα του χώρου εργασίας. αυτός ο χώρος εργασίας περιέχει επιπλέον ένα project (έργο) : project 1 (εικόνα 7.4). Για να γίνει εργασία με WasP, πρέπει να προστεθούν νέα στοιχεία στον χώρο εργασίας. τα στοιχεία είναι ταξινομημένα σε μια ιεραρχία και ονομάζονται μέλη ιεραρχίας ή απλά μέλη. Η ρίζα του χώρου εργασίας είναι στη κορυφή της ιεραρχίας. Τα περιβάλλοντα εργασίας του WasP αποθηκεύονται σαν μονά αρχεία που έχουν την κατάληξη wwh. Όλα τα μέλη είναι παιδιά της ρίζας του Workspace τα οποία προστίθενται κατά την ανάλυση και τοποθετούνται κάτω από τη ρίζα Project 1. Ένα νέο μέλος εισάγετε στην ιεραρχία κάνοντας κλικ με το ποντίκι στο εικονίδιο Workspace. Ένα μικρό 'pop-up' μενού εμφανίζεται και επιλέγεται Insert New, εμφανίζεται ένα νέο μενού και πρέπει να επιλεγεί Wasp Project.

Στη συνέχεια επιλέγεται Insert from file από το πρώτο pop up menu και επιλέγεται Vector map από το υπομενού εισαγωγής. Εμφανίζεται ένα μενού εισαγωγής και επιλέγεται Livadaki Vector map. Το WasP χρησιμοποιεί Vector χάρτες για να πάρει πληροφορίες σχετικά με τα υψομετρικά χαρακτηριστικά (ορογραφία) και τη κάλυψη εδάφους (τραχύτητα) του τοπίου στο οποίο γίνεται η μοντελοποίηση (Livadaki Vector map)

Η Μοντελοποίηση ροής WASP περιλαμβάνει την ανάλυση του κλίματος ανέμου OWC (Observed wind climate) για τον υπολογισμό γενικευμένων κλιμάτων ανέμου (άτλαντες ανέμου) και την εφαρμογή τους σε συγκεκριμένες τοποθεσίες ανεμογεννητριών για τον υπολογισμό και την εκτίμηση του κλίματος και της ενέργειας ανέμου.

Τα μέλη ανάλυσης εδάφους διακρίνονται σε δύο κατηγορίες (IBZ , CFD). Η ανάλυση εδάφους IBZ , που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη περίπτωση, ανταποκρίνεται στα κλασσικά μοντέλα WasP. Η ανάλυση εδάφους IBZ (terrain analysis) είναι προεπιλεγμένη κατά την εισαγωγή ενός νέου χάρτη στην ιεραρχία. Κάνοντας διπλό κλικ πάνω στην ανάλυση εδάφους IBZ ανοίγει ένα παράθυρο προβολής του χώρου. Στη συνέχεια ζητείται να επαληθευθεί η προβολή του χάρτη και να οριστεί η σωστή ζώνη. Απαιτείται σωστή προβολή χάρτη για την επιτυχή ανάκτηση βαρομετρικών δεδομένων αναφοράς για τον ιστό. Ο χάρτης είναι πλέον μέλος της ιεραρχίας, ως παιδί της ανάλυσης εδάφους [terrain analysis (IBZ)]. Για προβολή του χάρτη επιλέγεται Show σε νέα χωρική προβολή από το μενού δεξιού κλικ του εικονιδίου του χάρτη. Το παράθυρο του χάρτη εμφανίζεται στα δεξιά του βασικού παραθύρου.

Από δεδομένα μηχανικής είναι γνωστό πόση ισχύς θα παράγει μία ανεμογεννήτρια με δεδομένη ταχύτητα ανέμου. Θα ήταν πολύ απλό έργο αν η ανεμογεννήτρια ήταν να ανεγερθεί στο ακριβώς ίδιο σημείο όπου έχουν συλλεχθεί τα μετεωρολογικά δεδομένα. Πάρα τούτα είναι προφανές βλέποντας το χάρτη ότι η προτεινόμενη τοποθεσία στροβίλων είναι εντελώς διαφορετική από τον μετεωρολογικό σταθμό του οποίου οι ιδιότητες του θα επηρεάσουν τα δεδομένα του ανέμου που καταγράφονται εδώ. Επιπλέον η επιλογή της προτεινόμενης θέσης θα επηρεάσουν τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρεται ο άνεμος κοντά στην ανεμογεννήτρια. Είναι επίσης απίθανο το ύψος της πλήμνης της ανεμογεννήτριας να είναι το ίδιο με το ύψος του ανεμόμετρου. Το WasP καταγράφει το κλίμα ανέμου στο μετεωρολογικό σταθμό και το χρησιμοποιεί για να προβλέψει το κλίμα ανέμου στη περιοχή της ανεμογεννήτριας.

Ένας μετεωρολογικός σταθμός χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί ένα γενικευμένο κλίμα ανέμου που περιλαμβάνει μία συλλογή δεδομένων ανέμου της τοποθεσίας. Μία σύνοψη των δεδομένων ανέμου στο μετεωρολογικό σταθμό ονομάζεται (OWC) Observed wind climate και εμπεριέχει ένα ρόδο με τη κατανομή της συχνότητας του ανέμου και τις διάφορες κατανομές της συχνότητας του ανέμου ανά σέκτορα.

Κάνοντας δεξί κλικ στο project και επιλέγοντας Insert new και στη συνέχεια Observed wind climate εισάγεται ένα γενικευμένο κλίμα ανέμου σαν παιδί της εργασίας. Το γενικευμένο

κλίμα ανέμου θα γενικευθεί από τις μετρήσεις ανέμου στην ακριβή θέση του ιστού. Το WasP στη συνέχεια θα ζητήσει λεπτομέρειες για το μετεωρολογικό σταθμό (description , x co-ordinate , y co-ordinate). Στη συνέχεια το WasP θα ρωτήσει για το παρατηρούμενο κλίμα (Observed wind climate) στο μετεωρολογικό σταθμό. Για να προστεθούν παρατηρήσεις ανέμου θα πρέπει να επιλεγεί ο μετεωρολογικός σταθμός και να χρησιμοποιηθεί insert from file για να εισαχθεί το Observed wind climate.

Ο χάρτης και το γενικευμένο κλίμα ανέμου περιέχουν πληροφορίες που μπορούν να προβληθούν. Το καθένα έχει μία εντολή show που ανοίγει ένα παράθυρο σχετικό με το μέλος. Για να γενικευθεί το Observed wind climate κάνοντας δεξί κλικ επιλέγεται η εντολή Calculate the generalized wind climate. Για να προβληθούν τα αποτελέσματα των υπολογισμών επιλέγεται η εντολή show από το μενού του γενικευμένου κλίματος ανέμου. Το κλίμα ανέμου περιέχει πάνω από 5 στάνταρ ύψη και 5 στάνταρ κλάσεις τραχύτητας.

Στη συνέχεια τώρα που το Project περιέχει GWC και ανεξάρτητα δεδομένα για το κλίμα του ανέμου είναι δυνατόν να εφαρμοστούν αυτά τα δεδομένα στη προτεινόμενη τοποθεσία στροβίλων. Το λογισμικό θα προσαρμόσει τα δεδομένα για τη κατάσταση στη τοποθεσία της γεννήτριας και θα δημιουργήσει μία πρόβλεψη για το ίδιο το κλίμα ανέμου. Στη συνέχεια εισάγονται η τοποθεσία της ανεμογεννήτριας (description , x co-ordinate , y co-ordinate) . Πατώντας show turbine site 001 σε new spatial view από το μενού του turbine site. Το παράθυρο του χάρτη θα εμφανιστεί και η θέση της ανεμογεννήτριας θα είναι τονισμένη κοντά στη περιοχή του μετεωρολογικού σταθμού

Το turbine site χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της παραγωγής ενέργειας που θα πρόκυπτε από τον εντοπισμό ενός στροβίλου κάπου σε ένα σχετικό χάρτη. Ένα turbine site δεν έχει δεδομένα εκτός από τη θέση της στον χάρτη, το ύψος της πρύμνης και διορθώσεις που καθορίζεται από τον χρήστη. Επίσης μπορεί να συνδυαστεί με μια λίστα εμποδίων που περιβάλλουν τον σταθμό και μια περιγραφή της τοπογραφίας της γύρω περιοχής.

Προκειμένου να υπολογιστεί πόση ενέργεια παράγει η ανεμογεννήτρια το λογισμικό χρειάζεται να γνωρίζει τα χαρακτηριστικά παραγωγής ενέργειας της Α/Γ. Αυτά παρέχονται συνδέοντας μία γεννήτρια ανεμογεννητριών ως μέλος της ιεραρχίας με το turbine site.

Τα αιολικά πάρκα (turbine cluster 1' wind farm 2 sites) είναι συλλογή από turbine site. Προσφέρουν ένα βολικό τρόπο για δουλειά ανάμεσα σε διαφορετικού τύπου ανεμογεννήτριες. Εκτός από τον υπολογισμό της παραγωγής και του κλίματος ανέμου του αιολικού πάρκου και των ανεμογεννητριών μπορεί επίσης να κρατήσει πληροφορίες σχετικά με τις ομόρου στο αιολικό πάρκο.. Στη συνέχεια κάνοντας δεξί κλικ και show στο παράθυρο καμπύλης ισχύος παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας. (κατασκευαστής , διάμετρος ρότορα κ.λπ.).

Το WasP είναι έτοιμο να προβλέψει το κλίμα ανέμου στο turbine site από το μενού του κάνοντας δεξί κλικ και επιλέγοντας Calculate the AEP,predicted wind climate,site effects and delta-RIX.

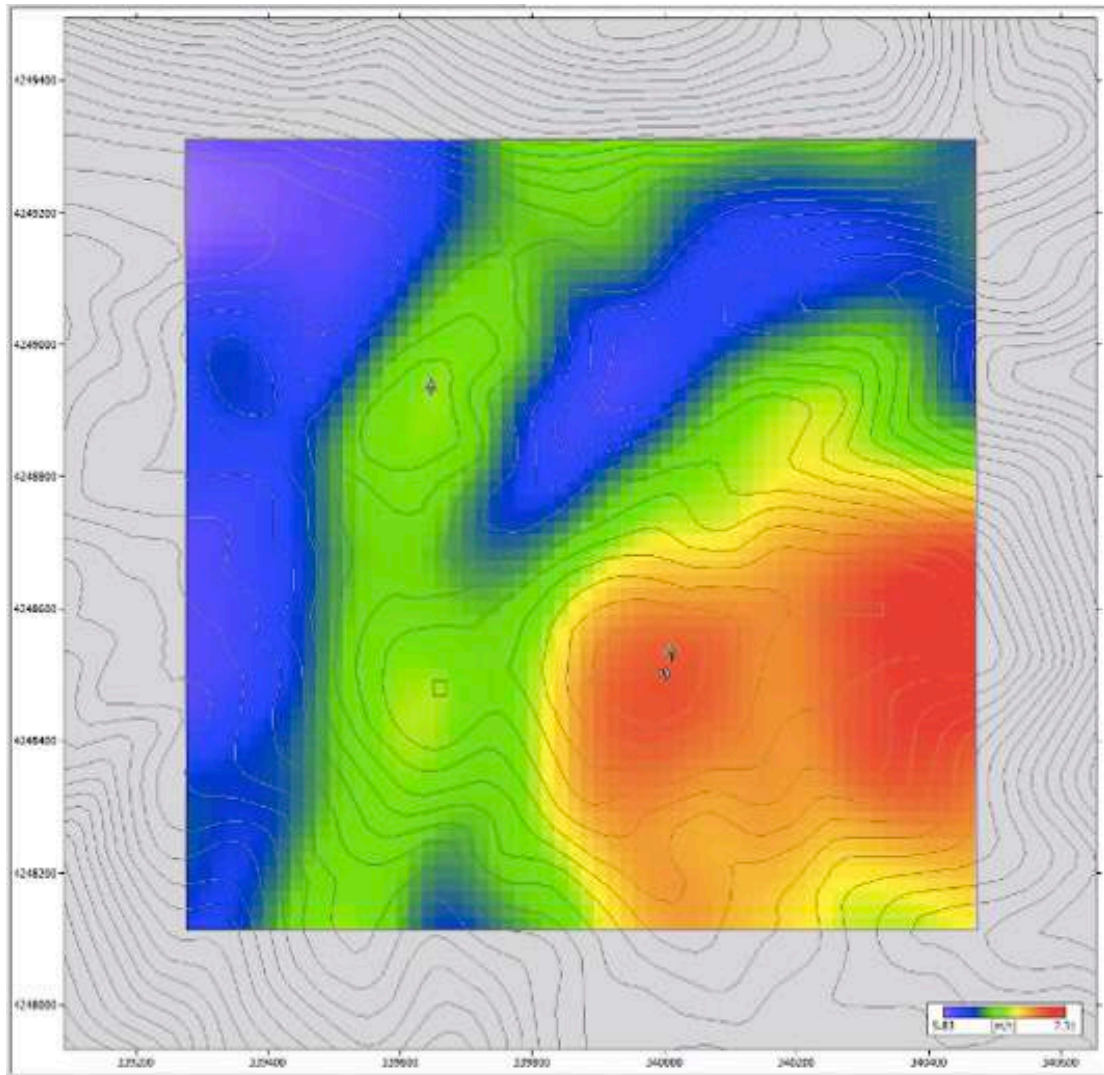
Προκειμένου να προβλεφθεί πόση ενέργεια θα παραχθεί από το αιολικό πάρκο , το λογισμικό πρέπει να γνωρίζει τα χαρακτηριστικά παραγωγής ενέργειας και καμπύλης ισχύος της κάθε ανεμογεννήτριας. Στην προκειμένη που χρησιμοποιούνται δύο ανεμογεννήτριες ίδιου τύπου, μπορεί να γίνει παροχή αυτής της πληροφορίας συνδέοντας μία wind turbine generator hierarchy member. Κάνοντας δεξί κλικ στο μενού του αιολικού πάρκου , επιλέγεται insert from file και μετά επιλέγεται 'General Electric 5.5MW.wtg'.

Το WasP είναι τώρα έτοιμο να προβλέψει τη παραγωγή ενέργειας του αιολικού πάρκου κάνοντας δεξί κλικ στο μενού του αιολικού πάρκου και επιλέγοντας Calculate the wake losses and summary statistics for wind farm 'crest'. Πατώντας show εμφανίζεται παράθυρο με τα αποτελέσματα. (πίνακας 8.12)

Το πλέγμα (resource grid) είναι συλλογή θέσεων ανεμογεννητριών ελαφρού βάρους που υπολογίζονται σε παρτίδα, αλλά οι τοποθεσίες είναι διατεταγμένες σε κανονικό πλέγμα που καλύπτει μια περιοχή. Η επέκταση του πλέγματος και το μέγεθος της κυψέλης του πλέγματος μπορεί να επιλεγούν για να χαρτογραφήσουν το κλίμα του ανέμου ή τους αιολικούς πόρους οπουδήποτε στον χάρτη και με όσες λεπτομέρειες απαιτούνται. Τα πλέγματα πόρων μπορούν να καλυφθούν προκειμένου να μειωθεί ο χρόνος υπολογισμού.

7.6 Δεδομένα πλέγματος σε χωρική προβολή (recourse grid)

Τα αποτελέσματα μοντελοποίησης που υπολογίζονται με τα μέλη του πλέγματος πόρων μπορούν επίσης να εμφανιστούν στην προβολή χωροταξίας μαζί με τον χάρτη και τον ιστότοπο. Στην εικόνα 7.5 παρουσιάζεται η χωρική προβολή για τη μέση ταχύτητα του ανέμου.



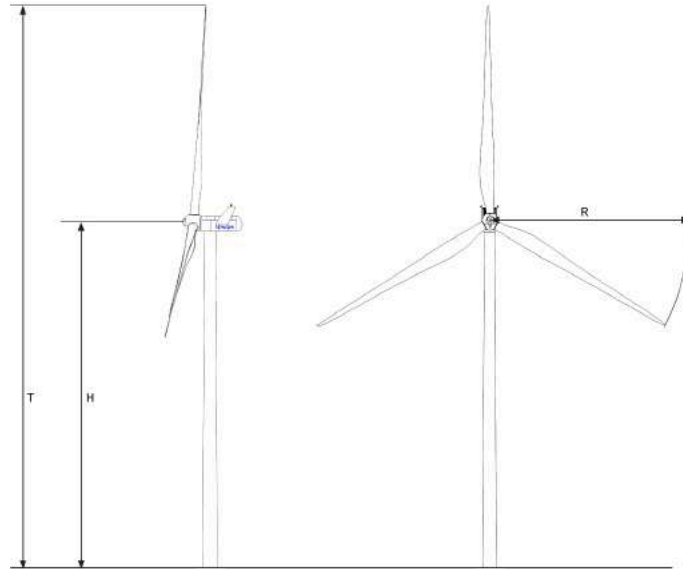
Εικόνα 7.5 : Χάρτης κλίσης

7.7 Απόδοση ενέργειας

Η προσομοίωση ροής ανέμου που έχει δημιουργηθεί με το WasP μαζί με τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας των επιτόπιων κλιματολογικών συνθηκών και των εκτιμώμενων απώλειες συνδυάζονται προκειμένου να παραχθεί το εκτιμώμενο ΑΕΡ.

Για τους σκοπούς αυτής της μελέτης, υπήρξε μια ενιαία διάταξη με δύο ανεμογεννήτριες ίδιου τύπου.

2 ανεμογεννήτριες Vestas V112-3-0MW.223



T	Tip Height	H	Hub Height
R	Radius		

Εικόνα 7.6 : Ανεμογεννήτρια Vestas V112-3-0MW.



Εικόνα 7.7 : Ανεμογεννήτρια Vestas V112-3-0MW.

Πίνακας 7.5 : Δεδομένα γεννήτριας.

Item	Description
Type	V-112 3.0 MW IEC class II A
Tip Heights	140m /150 m / 175 m
Hub Heights (HHs)	84 m /94 m/ 119 m
Radius	56 m
Nominal Output	3.0 MW

Η ανεμογεννήτρια V112-3-0MW που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση του έργου Λιβαδάκι, θεωρείται Wind Class IEC IIA από τον κατασκευαστή, είναι ανεμογεννήτρια τριών λεπίδων οριζοντίου άξονα με διάμετρο ρότορα 112 μέτρων, επιφάνεια σάρωσης 9852 τετραγωνικά μέτρα, συχνότητα δικτύου είναι 50-60Hz και ονομαστική γεννήτρια 3-0MW .Τα ύψη πρήμνης της είναι 84μ/94/119μ. Ο ρότορας της ανεμογεννήτριας και το κέλυφος είναι τοποθετημένα στην κορυφή ενός σωληνοειδούς ατσάλινου πύργου με ύψος πλήμνης 101. Η γεννήτρια χρησιμοποιεί ένα pitch control σύστημα μικροεπεξεργαστή που ονομάζεται OptiTip και η μετατροπή πλήρους κλίμακας GridStreamer για έννοιες λειτουργίας μεταβλητής ταχύτητας που κάνει την γεννήτρια να είναι σε θέση να λειτουργεί τον ρότορα με μεταβλητή ταχύτητα (RPM), βοηθώντας στη διατήρηση την έξοδο στην ονομαστική ισχύ ή κοντά σε αυτή.

Στο παρακάτω πίνακα αναγράφονται οι συντεταγμένες των δύο ανεμογεννητριών του αιολικού πάρκου.

Πίνακας 7.6: Συντεταγμένες ανεμογεννητριών.

A/A	ΧΕΓΣΑ	ΥΕΓΣΑ	A/A	ΧΕΓΣΑ	ΥΕΓΣΑ	ΛΕΓΣΑ	ΦΕΓΣΑ	ΛWGS84	ΦWGS84	Z(m)
1	39138.12	48952.55	A/Γ 1	339648	4248926	22°09'51.54"	38°22'27.00"	22°09'57.47"	38°22'36.42"	668
2	39985.44	248012.1	A/Γ 2	340012	4248522	22°10'06.86"	38°22'14.13"	22°10'12.79"	38°22'23.55"	708
3	40521.82	48495.44								
4	39674.55	249435.8								

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά για τις ανεμογεννήτριες Vestas V112-3-0MW.

Πίνακας 7.7 : Δεδομένα ρότορα της V112-3-0MW ανεμογεννήτριας.

Rotor	
Diameter	112 m
Swept Area	9852 m ²
Rotational Speed Static, Rotor	12.8 rpm
Speed, Dynamic Operation Range	6.2 – 17.7
Rotational Direction	Clockwise (front view)
Orientation	Upwind
Tilt	6°
Blade Coning	4°
Number of Blades	3
Aerodynamic Brakes	Full feathering

Η γεννήτρια είναι πιστοποιημένη σύμφωνα με τα πρότυπα πιστοποίησης που αναφέρονται παρακάτω:

Πίνακας 7.8 : Αποδεκτοί τύποι δεδομένων της V112-3-0MW ανεμογεννήτριας.

Standard	Conditions	Hub Height
IEC61400-22	IEC Class IIA	84 m / 94 m
	IEC Class IIIA	119 m
DIBt Anlage 2.7/10	DIBt 2	94 m / 119 m
UL 6140 (Construction Only)	60 Hz Variant Only	NA

Οι λεπίδες είναι κατασκευασμένες από ανθρακονήματα και γυαλί από ίνες και αποτελούνται από δύο αεροστεγή κελύφη που συνδέονται με ένα δοκός στήριξης.

Πίνακας 7.9 : Δεδομένα λεπίδων.

Blades	
Type Description	Airfoil shells bonded to supporting beam
Blade Length	54.65 m
Material	Fibre glass reinforced epoxy and carbon fibres
Blade Connection	Steel roots inserted
Air Foils	High-lift profile
Largest Chord	4.0 m

Πίνακας 7.9 : Δεδομένα λεπίδων.

Η γεννήτρια είναι μια σύγχρονη γεννήτρια 3 φάσεων με ρότορα μόνιμου μαγνήτη συνδεδεμένο στο δίκτυο μέσω του μετατροπέα πλήρους κλίμακας Grid StreamerTM.

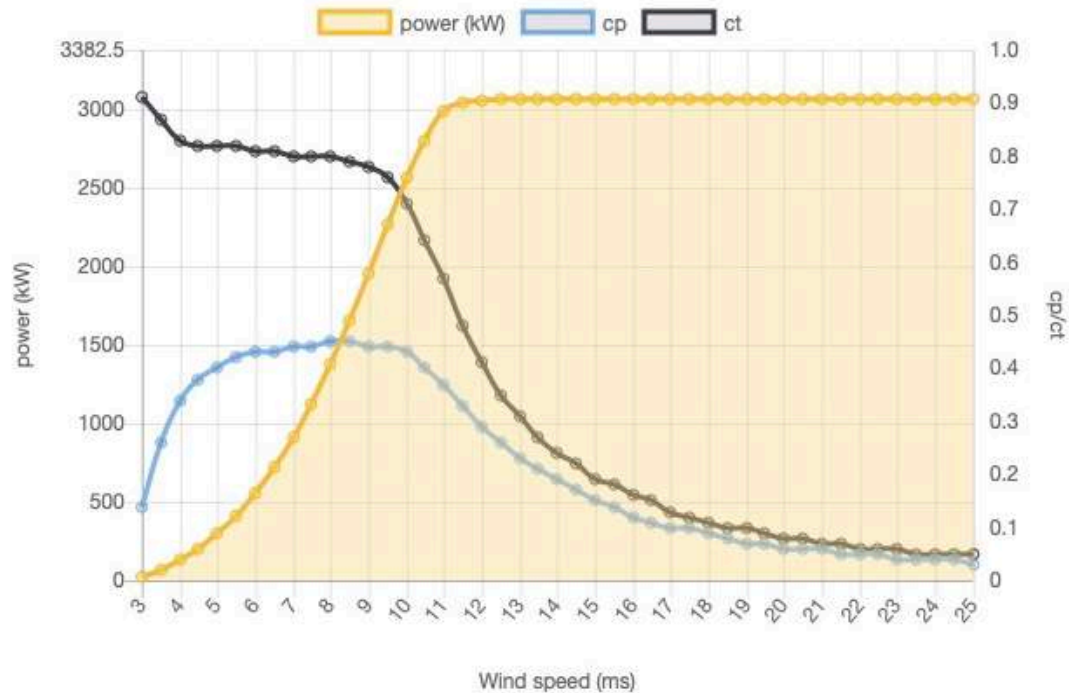
Πίνακας 7.10 : Δεδομένα γεννήτριας

Generator	
Type Description	Synchronous with permanent magnets
Rated Power [P_N]	3.3 MW
Rated Apparent Power [S_N]	3880 kVA ($\cos\phi = 0.85$)
Frequency [f_N]	145 Hz
Voltage, Stator [U_{Ns}]	3 x 710 V (@ 1450 RPM)
Number of Poles	12
Winding Type	Form with VPI (Vacuum Pressurized Impregnation)
Winding Connection	Star
Rated Efficiency (Generator only)	98 %
Rated RPM / Rated Slip	1450 RPM
Over Speed Limit acc. to IEC (2 min.)	2400 RPM
Vibration Level	≤ 1.8 mm/s
Generator Bearing	Hybrid/Ceramic
Temperature sensors, Stator	3 Pt100 sensors placed at hot spots and 3 as back-up
Temperature sensors, Bearings	1 per bearing and 1 back-up per bearing
Insulation Class	H (3 kV)
Enclosure	IP54

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι υπολογισμένες καμπύλες ισχύος της V112-3-0MW ανεμογεννήτριας, για διάφορες τιμές της πυκνότητας του αέρα.

Πίνακας 7.11 : Καμπύλες ισχύος της V112-3-0MW ανεμογεννήτριας.

Wind speed [m/s]	Air density [kg/m ³]													
	Standard 1.225	0.95	0.975	1	1.025	1.05	1.075	1.1	1.125	1.15	1.175	1.2	1.25	1.275
3	23	13	14	14	15	16	17	18	19	20	21	22	24	25
3.5	68	41	44	46	48	51	53	56	58	61	63	66	71	73
4	130	88	92	96	100	104	107	111	115	119	123	126	134	138
4.5	206	148	153	158	164	169	174	180	185	190	196	201	212	217
5	301	221	228	236	243	250	258	265	272	279	287	294	308	316
5.5	418	311	321	330	340	350	359	369	379	389	398	408	427	437
6	557	419	432	444	457	469	482	494	507	519	532	544	569	582
6.5	720	546	562	578	594	610	626	641	657	673	689	705	736	752
7	912	695	715	734	754	774	793	813	833	853	872	892	931	951
7.5	1130	865	889	913	938	962	986	1010	1034	1058	1082	1106	1154	1178
8	1377	1058	1087	1116	1145	1175	1204	1233	1262	1291	1320	1349	1406	1435
8.5	1654	1273	1308	1343	1377	1412	1447	1481	1516	1550	1585	1619	1688	1722
9	1954	1509	1549	1590	1631	1671	1712	1752	1793	1833	1873	1914	1994	2034
9.5	2272	1762	1809	1856	1903	1950	1997	2043	2090	2136	2181	2226	2315	2358
10	2572	2014	2067	2120	2173	2226	2277	2328	2379	2430	2477	2524	2611	2650
10.5	2808	2257	2315	2373	2430	2488	2539	2590	2642	2693	2731	2770	2835	2863
11	2988	2483	2544	2606	2667	2729	2773	2818	2863	2908	2934	2961	3000	3012
11.5	3046	2682	2738	2793	2848	2904	2931	2959	2987	3015	3025	3035	3050	3054
12	3065	2847	2886	2926	2965	3004	3017	3029	3041	3054	3057	3061	3067	3069
12.5	3073	2960	2982	3004	3026	3048	3052	3057	3062	3067	3069	3071	3073	3074
13	3075	3023	3033	3044	3054	3065	3067	3069	3071	3073	3074	3074	3075	3075
13.5	3075	3052	3057	3062	3068	3073	3073	3074	3074	3075	3075	3075	3075	3075
14	3075	3069	3070	3072	3073	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
14.5	3075	3073	3073	3074	3074	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
15	3075	3074	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
15.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
16	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
16.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
17	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
17.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
18	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
18.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
19	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
19.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
20	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
20.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
21	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
21.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
22	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
22.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
23	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
23.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
24	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
24.5	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075
25	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075	3075



Εικόνα 7.8 : Καμπύλες ισχύος της V112-3-0MW ανεμογεννήτριας. (πηγή : wind-europe-models.com)

Πίνακας 7.12 : Επίπεδα ήχου στο ύψος πρήμνης της ανεμογεννήτριας.

Conditions: Measurement standard IEC 61400-11 ed. 2 2002 Wind shear: 0.16 Max. turbulence at 10 meter height: 16% Inflow angle (vertical): $0 \pm 2^\circ$ Air density: 1.225 kg/m^3			
Hub Height	84 m	94 m	119 m
LwA @ 3 m/s (10 m above ground) [dBA]	94.7	94.7	94.7
Wind speed at hub height [m/s]	4.2	4.3	4.5
LwA @ 4 m/s (10 m above ground) [dBA]	97.3	97.5	98.1
Wind speed at hub height [m/s]	5.6	5.7	5.9
LwA @ 5 m/s (10 m above ground) [dBA]	100.9	101.2	101.9
Wind speed at hub height [m/s]	7.0	7.2	7.4
LwA @ 6 m/s (10 m above ground) [dBA]	104.5	104.5	104.5
Wind speed at hub height [m/s]	8.4	8.6	8.9
LwA @ 7 m/s (10 m above ground) [dBA]	104.5	104.5	104.5
Wind speed at hub height [m/s]	9.8	10.0	10.4
LwA @ 8 m/s (10 m above ground) [dBA]	104.5	104.5	104.5
Wind speed at hub height [m/s]	11.2	11.4	11.9
LwA @ 9 m/s (10 m above ground) [dBA]	104.5	104.5	104.5
Wind speed at hub height [m/s]	12.7	12.9	13.4
LwA @ 10 m/s (10 m above ground) [dBA]	104.5	104.5	104.5
Wind speed at hub height [m/s]	14.1	14.3	14.9
LwA @ 11 m/s (10 m above ground) [dBA]	104.5	104.5	104.5
Wind speed at hub height [m/s]	15.5	15.7	16.3
LwA @ 12 m/s (10 m above ground) [dBA]	104.5	104.5	104.5
Wind speed at hub height [m/s]	16.9	17.2	17.8
LwA @ 13 m/s (10 m above ground) [dBA]	104.5	104.5	104.5
Wind speed at hub height [m/s]	18.3	18.6	19.3

Παρακάτω παρατίθενται οι τιμές του συντελεστή C_p της V112-3-0MW ανεμογεννήτριας.

Wind speed [m/s]	Air density [kg/m ³]													
	Standard 1.225	0.95	0.975	1	1.025	1.05	1.075	1.1	1.125	1.15	1.175	1.2	1.25	1.275
3	0.913	0.916	0.915	0.915	0.915	0.915	0.914	0.914	0.914	0.914	0.913	0.913	0.913	0.913
3.5	0.865	0.867	0.867	0.867	0.867	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.866	0.865	0.865	0.865
4	0.826	0.827	0.827	0.827	0.827	0.827	0.827	0.827	0.826	0.826	0.826	0.826	0.826	0.825
4.5	0.808	0.810	0.810	0.810	0.810	0.809	0.809	0.809	0.809	0.809	0.808	0.808	0.808	0.808
5	0.802	0.805	0.804	0.804	0.804	0.804	0.803	0.803	0.803	0.803	0.802	0.802	0.802	0.802
5.5	0.798	0.800	0.800	0.800	0.799	0.799	0.799	0.799	0.798	0.798	0.798	0.798	0.797	0.797
6	0.795	0.799	0.798	0.798	0.798	0.797	0.797	0.797	0.796	0.796	0.796	0.795	0.795	0.794
6.5	0.792	0.797	0.796	0.796	0.795	0.795	0.794	0.794	0.794	0.793	0.793	0.792	0.791	0.791
7	0.789	0.794	0.794	0.793	0.793	0.792	0.792	0.791	0.791	0.790	0.790	0.789	0.788	0.787
7.5	0.782	0.789	0.789	0.788	0.787	0.787	0.786	0.786	0.785	0.784	0.784	0.783	0.782	0.781
8	0.771	0.779	0.778	0.777	0.777	0.776	0.775	0.775	0.774	0.773	0.773	0.772	0.770	0.770
8.5	0.751	0.758	0.758	0.757	0.756	0.756	0.755	0.754	0.754	0.753	0.752	0.751	0.750	0.749
9	0.719	0.727	0.726	0.725	0.725	0.724	0.723	0.722	0.722	0.721	0.720	0.720	0.718	0.717
9.5	0.678	0.685	0.685	0.684	0.683	0.683	0.682	0.681	0.681	0.680	0.679	0.678	0.676	0.675
10	0.629	0.638	0.637	0.637	0.636	0.636	0.635	0.634	0.633	0.633	0.631	0.630	0.627	0.624
10.5	0.575	0.588	0.588	0.587	0.587	0.586	0.585	0.584	0.583	0.582	0.580	0.577	0.570	0.565
11	0.517	0.541	0.541	0.540	0.539	0.538	0.536	0.535	0.533	0.531	0.526	0.522	0.509	0.501
11.5	0.455	0.497	0.496	0.495	0.494	0.492	0.489	0.485	0.481	0.477	0.470	0.462	0.446	0.438
12	0.398	0.459	0.456	0.453	0.450	0.448	0.441	0.435	0.429	0.423	0.414	0.406	0.389	0.381
12.5	0.348	0.423	0.418	0.413	0.409	0.404	0.396	0.388	0.380	0.372	0.364	0.356	0.341	0.333
13	0.306	0.388	0.381	0.374	0.367	0.360	0.352	0.344	0.336	0.328	0.320	0.313	0.299	0.293
13.5	0.271	0.350	0.343	0.335	0.327	0.320	0.312	0.305	0.298	0.290	0.284	0.277	0.265	0.260
14	0.241	0.315	0.308	0.300	0.292	0.285	0.278	0.271	0.265	0.258	0.252	0.247	0.236	0.231
14.5	0.216	0.283	0.276	0.269	0.261	0.254	0.248	0.242	0.236	0.230	0.226	0.221	0.211	0.207
15	0.194	0.254	0.247	0.241	0.234	0.228	0.223	0.217	0.212	0.207	0.202	0.198	0.190	0.186
15.5	0.175	0.229	0.223	0.217	0.211	0.205	0.201	0.196	0.191	0.187	0.183	0.179	0.172	0.168
16	0.159	0.207	0.202	0.196	0.191	0.186	0.182	0.178	0.174	0.169	0.166	0.162	0.156	0.153
16.5	0.145	0.188	0.183	0.179	0.174	0.169	0.165	0.162	0.158	0.154	0.151	0.148	0.142	0.140
17	0.133	0.171	0.167	0.163	0.159	0.154	0.151	0.148	0.144	0.141	0.138	0.135	0.130	0.128
17.5	0.122	0.156	0.153	0.149	0.145	0.141	0.138	0.135	0.132	0.129	0.127	0.124	0.119	0.117
18	0.112	0.144	0.140	0.137	0.133	0.130	0.127	0.124	0.122	0.119	0.117	0.114	0.110	0.108
18.5	0.103	0.132	0.129	0.126	0.123	0.120	0.117	0.115	0.112	0.110	0.108	0.106	0.102	0.100
19	0.096	0.122	0.120	0.117	0.114	0.111	0.109	0.106	0.104	0.102	0.100	0.098	0.094	0.093
19.5	0.089	0.113	0.111	0.108	0.106	0.103	0.101	0.099	0.097	0.094	0.093	0.091	0.088	0.086
20	0.083	0.105	0.103	0.101	0.098	0.096	0.094	0.092	0.090	0.088	0.086	0.085	0.082	0.080
20.5	0.077	0.098	0.096	0.094	0.091	0.089	0.087	0.086	0.084	0.082	0.080	0.079	0.076	0.075
21	0.072	0.091	0.089	0.087	0.085	0.083	0.082	0.080	0.078	0.077	0.075	0.074	0.071	0.070
21.5	0.068	0.086	0.084	0.082	0.080	0.078	0.077	0.075	0.073	0.072	0.071	0.069	0.067	0.066
22	0.064	0.080	0.079	0.077	0.075	0.073	0.072	0.070	0.069	0.067	0.066	0.065	0.063	0.062
22.5	0.060	0.075	0.074	0.072	0.070	0.069	0.067	0.066	0.065	0.063	0.062	0.061	0.059	0.058
23	0.056	0.071	0.069	0.068	0.066	0.065	0.063	0.062	0.061	0.060	0.059	0.057	0.056	0.055
23.5	0.053	0.067	0.065	0.064	0.062	0.061	0.060	0.059	0.057	0.056	0.055	0.054	0.052	0.052
24	0.050	0.063	0.061	0.060	0.059	0.057	0.056	0.055	0.054	0.053	0.052	0.051	0.049	0.049
24.5	0.048	0.059	0.058	0.057	0.056	0.054	0.053	0.052	0.051	0.050	0.049	0.048	0.047	0.046
25	0.045	0.056	0.055	0.054	0.053	0.051	0.050	0.049	0.048	0.048	0.047	0.046	0.044	0.044

Πίνακας 7.13 : Τιμές συντελεστή C_p της V112-3-0MW ανεμογεννήτριας.

Πίνακας 7.14 : Συνθήκες για καμπύλη ισχύος, τιμές C_t και επίπεδα ήχου.

Conditions for Power Curve, Noise Levels, C_t Values (at Hub Height)	
Wind Shear	0.10 - 0.16 (10 min. average)
Turbulence Intensity	8 - 12% (10 min. average)
Blades	Clean
Rain	No
Ice/Snow on Blades	No
Leading Edge	No damage
Terrain	IEC 61400-12-1
Inflow Angle (Vertical)	$0 \pm 2^\circ$
Grid Frequency	Nominal Frequency ± 0.5 Hz

7.7.1 Πυκνότητα αέρα

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η καμπύλη ισχύος που χρησιμοποιείται, πρέπει να προσαρμοστεί στην αναμενόμενη πυκνότητα αέρα επί τόπου στο ύψος πλήμνης ανεμογεννητριών. Ο υπολογισμός της επιτόπιας πυκνότητας αέρα πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα από τον ιστό KLA4002 και μετρήθηκε με βάση τη θερμοκρασία ίσος με $1,125\text{kg/m}^3$.

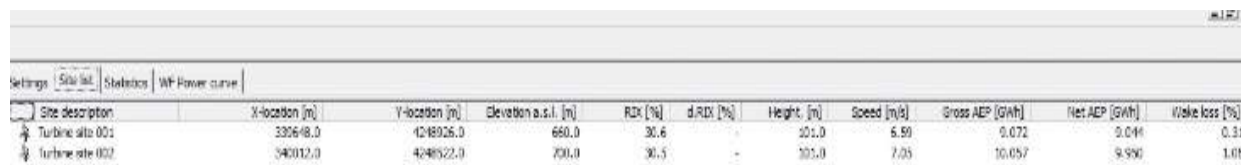
Πίνακας 7.15 Αποτελέσματα θερμοκρασίας, πίεσης και πυκνότητας αέρα.

Variable	Mean	MoMM	Min	Max
Temperature @ 2m ($^\circ\text{C}$)	14.50	14.76	-8.56	37.20
Pressure @ 0m (kPa)				
Air Density @ 2m (kg/m^3)	1.125	1.123	1.031	1.225
Energy-Weighted Air Density @ 2m (kg/m^3)	1.133	1.119	0.000	50.189

7.8 Απώλειες ομόρου

Όταν ο στρόβιλος εξάγει ενέργεια από τον άνεμο, ένας όμορος εξελίσσεται κατάντη του στροβίλου. Αν μια άλλη κοντινή τουρμπίνα λειτουργεί σε αυτή το όμορο, η έξοδος ισχύος για αυτήν την γεννήτρια μειώνεται σε σύγκριση με την τουρμπίνα που λειτουργεί με τον ελεύθερο άνεμο. Αυτή η μείωση της παραγωγής ισχύος εξαρτάται από την κατανομή του ανέμου, τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας και τη γεωμετρία του αιολικό πάρκο.

Οι ανεμογεννήτριες που λειτουργούν στην αφύπνιση δεν υπόκεινται μόνο σε μειωμένη ταχύτητα ανέμου αλλά και αυξημένη δυναμική φόρτιση που προκύπτει από την αυξημένη αναταραχή που προκαλείται από τους ανάντη στροβίλους.



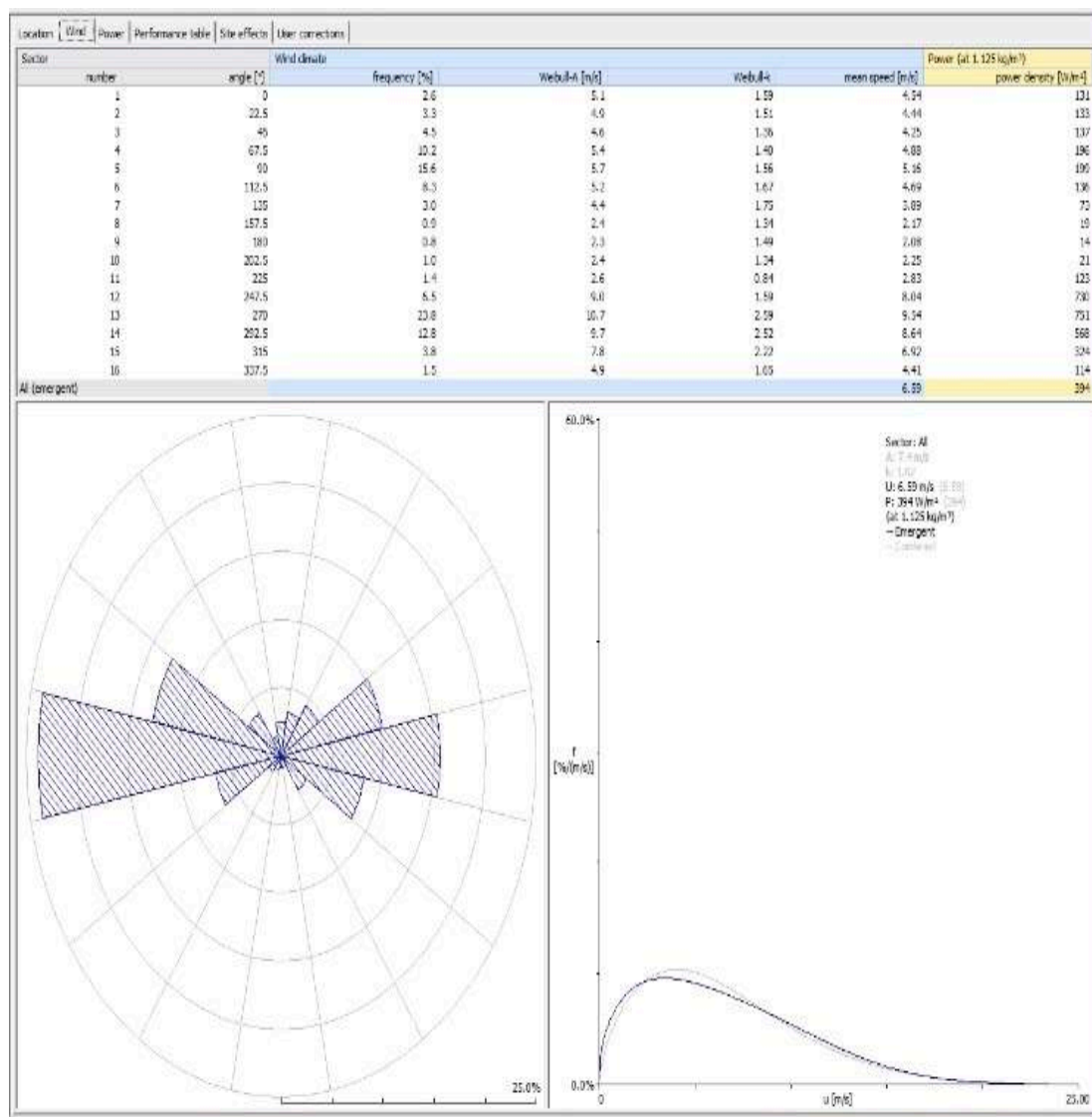
Site description	X-location [m]	Y-location [m]	Elevation a.s.l. [m]	RIX [%]	d.RIX [%]	Height [m]	Speed [m/s]	Gross AEP [GWh]	Net AEP [GWh]	Wake loss [%]
Turbine site 001	330648.0	4248926.0	660.0	30.6	-	101.0	6.59	9.072	9.044	0.31
Turbine site 002	340312.0	4248522.0	700.0	30.5	-	101.0	7.05	10.057	9.990	1.01

Εικόνα 7.9 : Συντεταγμένες ανεμογεννητριών αιολικού πάρκου Λιβαδάκι

Στο παραπάνω πίνακα παρατίθενται οι θέσεις (συντεταγμένες) των ανεμογεννητριών, η μέση ταχύτητα ανέμου για την κάθε ανεμογεννήτρια (6,5m/s για την Α/Γ 001 και 7,05m/s για την Α/Γ 002) το Gross και Net AEP για την κάθε ανεμογεννήτρια καθώς και ο δείκτης ανθεκτικότητα RIX για κάθε ανεμογεννήτρια.

Τέλος οι απώλειες όμορου για κάθε ανεμογεννήτρια υπολογίζονται ίσες με 0,31% για την ανεμογεννήτρια 001 και 1,06% για την ανεμογεννήτρια 002.

Το προβλεπόμενο κλίμα ανέμου περιέχει τα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς του WasP όπως το υπολογισμένο κλίμα ανέμου και τη παραγωγή ενέργειας για μία θέση ανεμογεννήτριας. Τα αποτελέσματα υπολογίζονται από μοντέλα του λογισμικού και βασίζονται στον υπολογισμό του γενικευμένου κλίματος ανέμου. Το παράθυρο έχει τρεις εμφανίσεις δεδομένων, το πλέγμα, το ροδόγραμμα και το γράφημα. (εικόνα 7.10). Το πλέγμα δείχνει τη μέση ταχύτητα ανέμου και τη μέση πυκνότητα ισχύος του ανέμου για διαφορετικά μήκη τραχύτητας (τάξεις) και τυπικά ύψη, η στήλη ρ του πλέγματος δείχνει τη συμβολή ανά τομέα στη συνολική πυκνότητα ισχύος, λαμβάνοντας υπόψη τη συχνότητα του ανέμου. Το τριαντάφυλλο (ροδόγραμμα συχνοτήτων) εμφανίζει τις τομεακές συχνότητες (%) της κατεύθυνσης του ανέμου σε σχέση με το σύνολο των παρατηρήσεων που διατίθενται για κάθε ένα από τους 16 κυκλικούς τομείς (σέκτορες) που χωρίζεται ανάλογα από που πνέει ο άνεμος. Τέλος το γράφημα δείχνει την κατανομή συχνότητας των ταχυτήτων του ανέμου και τις παραμέτρους A και k της κατανομής Weibull για κάθε τομέα (sector).

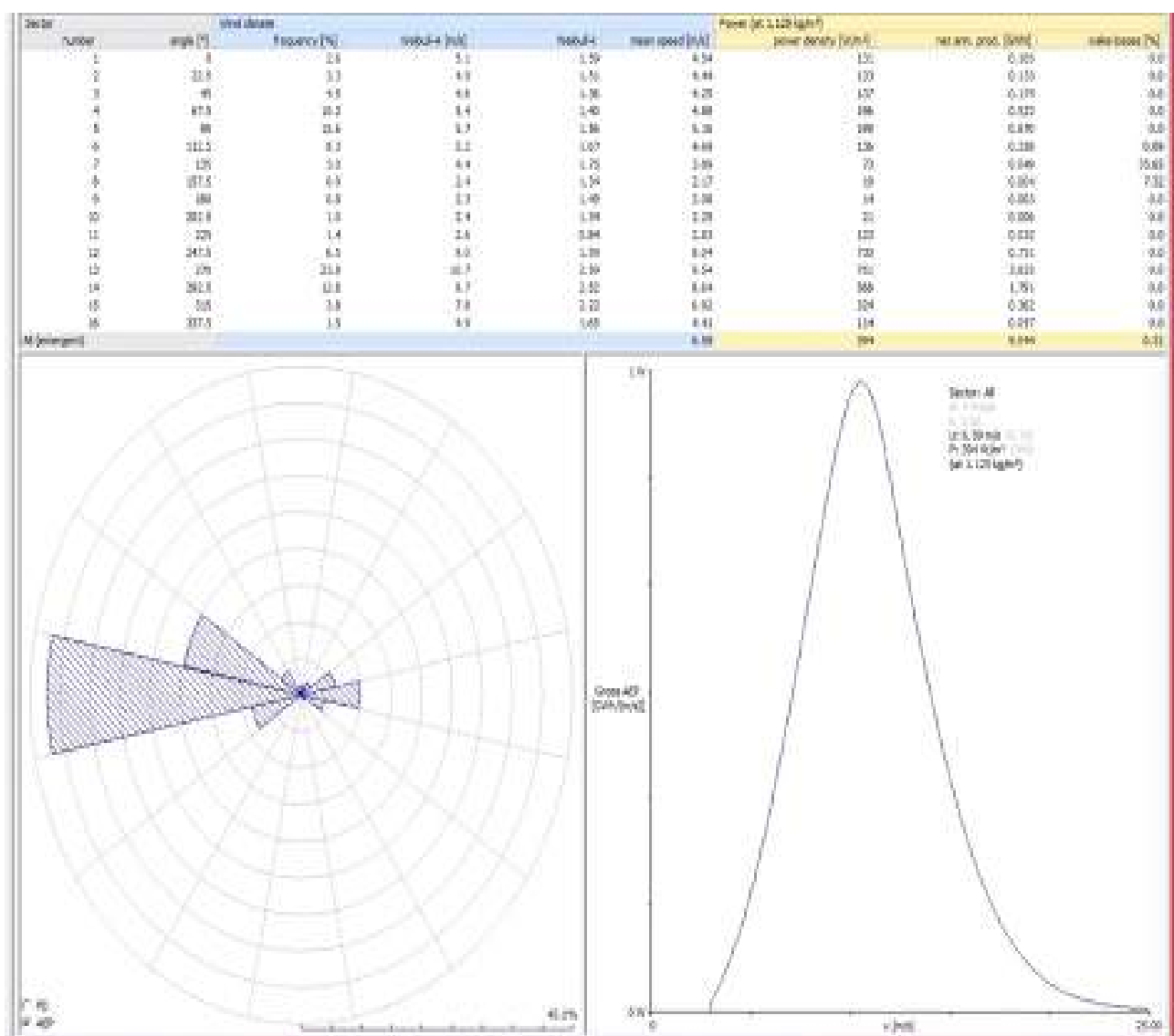


Εικόνα 7.10 : Εκτιμήσεις ανά ανεμογεννήτρια

Στην εικόνα 7.11 το παράθυρο ισχύος εμφανίζει το ροδόγραμμα και το γράφημα για την προβλεπόμενη πυκνότητα ισχύος ή ετήσια παραγωγή ενέργειας στη θέση του στροβίλου, με βάση το γενικευμένο κλίμα ανέμου στη περιοχή. Το δίκτυο είναι το ίδιο όπως στο προβλεπόμενο παράθυρο κλίματος ανέμου.

Το σύνολο της παραγωγής ενέργειας που παρέχεται στο κάτω μέρος του δικτύου υπολογίζεται από το άθροισμα των τομεακών παραγωγών. Η αύξηση της πυκνότητας της αιολικής ενέργειας (ή ΑΕΡ) δείχνει τη συνεισφορά (%) στη συνολική πυκνότητα ισχύος (ή ΑΕΡ) από τους διάφορους τομείς. Για μια τοποθεσία ανεμογεννητριών σε ένα αιολικό πάρκο, το ροδόγραμμα μπορεί να εμφανίσει περαιτέρω

τις απώλειες ομόρου ως κόκκινες λωρίδες στο ροδόγραμμα. Το ροδόγραμμα δείχνει την κατανομή του Gross AEP και NET AEP.



Εικόνα 7.11 : Παραγωγή ενέργειας σε γιγαβατώρες

7.9 Ηλεκτρική απόδοση

Οι απώλειες διαθεσιμότητας περιγράφουν το ποσοστό χρόνου που η υποδομή αιολικού πάρκου συμπεριλαμβανομένων των ανεμογεννήτριες και του εξωτερικού πλέγματος δεν λειτουργεί (μη διαθέσιμη) λόγω βλαβών, εξαρτήματος δυσλειτουργία, προγραμματισμένη συντήρηση κ.λπ.

Χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες:

- Διαθεσιμότητα ανεμογεννητριών, που βασίζεται στο ιστορικό της ανεμογεννήτριας και στον κατασκευαστή ή / και διαθεσιμότητα εγγυημένη από τη λειτουργία και τη συντήρηση του προμηθευτή. Στην περίπτωση του αιολικού πάρκου Λιβαδάκι έχει ληφθεί υπόψη ένας συντελεστής 96,9% για τα V112 βάσει των συμφωνιών FSA που παρέχονται από τον κατασκευαστή.
- Η διαθεσιμότητα BoP περιλαμβάνει όλα τα εξαρτήματα μεταξύ του διακόπτη προστασίας ανεμογεννητριών και του σημείου διασύνδεσης δικτύου συμπεριλαμβανομένου του μετασχηματιστή υποσταθμού και του εσωτερικού δικτύου μετάδοσης. Θεωρήθηκε θεωρητική τιμή 99,8%.
- Η διαθεσιμότητα δικτύου αναφέρεται σε περιόδους κατά τις οποίες το δίκτυο βρίσκεται εκτός εύρους λειτουργίας των ανεμογεννητριών και σε πραγματικές περιόδους αστοχίας δικτύου. Η τιμή εξαρτάται από την κατάσταση του πλέγματος με το οποίο συνδέεται το αιολικό πάρκο. Θεωρήθηκε θεωρητική τιμή 99,5%.

Όλες οι απώλειες μεταξύ των ανεμογεννητριών και του σημείου μέτρησης, συμπεριλαμβανομένων εσωτερικών και εξωτερικών συστημάτων μετάδοσης και μετασχηματιστές εμπίπτουν σε αυτήν την κατηγορία. Μια μελέτη έχει πραγματοποιηθεί από την Nostira εκτιμώντας αποδοτικότητα ίση με 97,7% για τη διάταξη V112.

7.10 Απόδοση ανεμογεννητριών.

Αυτό εξηγεί τις διαφορές μεταξύ της καμπύλης ισχύος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης και της πραγματικής απόδοσης των ανεμογεννητριών επί τόπου και μπορούν να καταρριφθούν για τους εξής λόγους.

Η καμπύλη ισχύος δεν παράγεται στην υπολογισμένη καμπύλη ισχύος αναφοράς. Θεωρητική τιμή εξετάστηκε το 99,0%.

Υστέρηση υψηλού ανέμου που προκαλείται από την επανεκκίνηση των ανεμογεννητριών σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου από τις ταχύτητες αποκοπής ανέμου. Έτσι η αλγόριθμοι ελέγχου της τους αποτρέπουν από επαναλαμβανόμενες εκκινήσεις / διακοπές, όταν είναι η ανεμογεννήτρια λειτουργεί κοντά στο όριο αποκοπής, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα φορτία κόπωσης που προκαλούνται από την αποκοπή. Η

ακόλουθη τιμή έχει υπολογιστεί με βάση τις χρονοσειρές του ιστού ίση με 99.7% για τη διάταξη V112.

1. Συνθήκες ροής ανέμου στον χώρο διαφορετικοί από τους χώρους δοκιμών IEC,, αναμένεται ένταση αναταραχής με αποτέλεσμα να εφαρμοστεί ένας θεωρητικός παράγοντας 99,0%.
2. Άλλες απώλειες συνίστανται σε απώλειες λόγω υποβάθμισης των κινούμενων μερών της ανεμογεννήτριας. Εξετάστηκε μια γενική τιμή 99,0%.

7.11 Περιβαλλοντικές συνθήκες

Οι περιβαλλοντικές συνθήκες μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση των ανεμογεννητριών. Οι παράγοντες που θεωρούνται σημαντικοί για τον αιολικό πάρκο Λιβαδάκι είναι οι ακόλουθοι:

- Αποικοδόμηση λεπίδων λόγω συσσωρευμένης βρωμιάς στις λεπίδες των ανεμογεννητριών που μπορούν να μετριαστούν με καθίζηση ή καθαρισμό και φυσική υποβάθμιση με την πάροδο του χρόνου λόγω χρήσης. Έχει υπολογιστεί μια θεωρητική τιμή 99,5%.
- Πρόσβαση στην τοποθεσία και εξωτερικές καιρικές συνθήκες που ενδέχεται να προκαλέσουν τις ανεμογεννήτριες είτε να σταματήσουν είτε να έχουν μια χαμηλή βέλτιστη απόδοση ή για προβλήματα πρόσβασης στο χώρο. Έχει υπολογιστεί μια θεωρητική τιμή 99,5%.

7.12 Αποτελέσματα

Στο πίνακα 7.16 παρουσιάζεται η ολική, μέση, ελάχιστη και μέγιστη τιμή για τη καθαρή και ακαθάριστη ενεργειακή απόδοση, τις απώλειες ορόρου, την πυκνότητα αέρα τη μέση ταχύτητα τη πυκνότητα αέρα, τον εκθέτη διάτμησης και το δείκτη ανθεκτικότητας RIX. Με βάση τους υπολογισμούς ο συντελεστής ισχύος (Capacity Factor) είναι ίσος με 27.73%.

Με βάση τους υπολογισμούς ο συντελεστής ισχύος είναι ίσος με 27.73%.

$$\text{Capacity Factor} = \frac{\text{Annual Energy}}{\text{Nominal Power}} * 8760 = \frac{17.3185148}{6} 8760 = 25,285\%.$$

Εάν λάβουμε υπόψη ότι η ενέργεια πωλείται προς περίπου 6cents/kWh αναμένονται έσοδα 15.171 ευρώ/ετησίως. Η κάθε εταιρεία καταστρώνει συγκεκριμένο και αναλυτικό Business Plan προκειμένου να διαπιστώσει εάν το συνολικό κόστος του έργου (αγορά εξοπλισμού, κόστος εγκατάστασης, διασύνδεση με δίκτυο, Οικίσκος ελέγχου, διάνοιξη δρόμων και πλατειών, επιτόκιο δανεισμού, κ.λπ.) είναι τέτοιο που να οδηγεί σε ένα IRR τέτοιο που να επιτρέπει στην εταιρεία να πάρει την απόφαση υλοποίησης του έργου. Επιτρεπτά IRR (Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης, Εσωτερική αποδοτικότητα για μια επένδυση είναι της τάξης >10%.

Πίνακας 7.16 : Στατιστικά για το GE158 layout στο ύψος της πρύμνης (101μ).

		TOTAL	MEAN	MIN	MAX
Total Gross AEP [GWh]		19.128	9.364	9.072	10.057
Total Net AEP [GWh]		18.994	9.497	9.044	9.990
Proportional wake loss [%]		0.7	-	0.31	1.06
Mean speed [m/s]		-	6.82	6.50	7.05
Air density [kg/m³]		-	1.123	1.121	1.125
Power density [W/m³]		-	430	394	467
RIX [%]		-	-	30.5	30.6

Στο παρακάτω πίνακα γίνεται μία σύνοψη όλων των απωλειών και αποτελεσμάτων.

Πίνακας 7.17 : Σύνοψη απωλειών και καθαρής ενεργειακής απόδοσης για το V1layout στο ύψος της πρύμνης (101μ).

Wind farm capacity	6MW	
Gross energy production	18.994GWh/y	
Wake effects	0.7%	calculated
Availability	3.8%	
Turbine	3.1%	theoretical
BoP	0.2%	calculated
Grid	0.5%	theoretical
Turbine performance	3.2%	
Power curve	1.0%	theoretical
High wind hysteresis	0.2%	calculated
Wind flow	1.0%	theoretical
Other losses	1.0%	theoretical
Electrical		
Environmental	1.0%	
Blade degradation	0.5%	theoretical
Site access and weather conditions	0.5%	theoretical
Grid curtailment	0.4%	
Total losses	9.1%	
Net energy production	17,3185148GWh/y	

Πίνακας 7.17 : Σύνοψη απωλειών και καθαρής ενεργειακής απόδοσης για το GE158 layout στο ύψος της πρύμνης (101μ).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την αιολική ενέργεια και τους τρόπους με τους οποίους αυτή αξιοποιείται. Συγκεκριμένα αρχικά αποτυπώνονται τα στατιστικά της αιολικής ενέργειας στην Ελληνική, Ευρωπαϊκή και παγκόσμια αγορά ενέργειας από το παρελθόν μέχρι και σήμερα και αναφέρονται τεχνικές λύσεις με στόχο την ανάπτυξη της αιολικής αγοράς(υβριδισμός, υδρογόνο). Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο όρος αιολικά πάρκα, διακρίνονται και αναλύονται οι κατηγορίες τους (χερσαία, παράκτια και υπεράκτια). Ακολουθεί ανάλυση των ανεμογεννητριών και των τεχνικών χαρακτηριστικών τους (κατηγορίες, βασική δομή, αρχή λειτουργίας, είδη γεννητριών, αιολικό δυναμικό κ.λπ.) Αναλύονται τα στάδια της ενεργειακής μελέτης που πραγματοποιούνται σε μία περιοχή (μετρήσεις, αξιολόγηση, παρέκταση των δεδομένων, εξαγωγή αποτελεσμάτων). Τέλος, στην εργασία αυτή επιλέγεται το αιολικό πάρκο Λιβαδάκι στη Φωκίδα, δεδομένα για το συγκεκριμένο αιολικό πάρκο υπήρξαν από την εταιρεία NOSTIRA S.A . Εξάχθηκαν δεδομένα σχετικά με τον άνεμο (ταχύτητα , διεύθυνση στη θέση του ιστού κ.λπ.) από το windowgrapher και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε μοντελοποίηση με τη χρήση του λογισμικού WasP για εξαγωγή ποιοτικών συμπερασμάτων και πλήρης τεχνική μελέτη υλοποίησης ενός πραγματικού αιολικού έργου με πραγματικά δεδομένα. Από την ανάλυση προέκυψε πως η περιοχή αυτή παρουσιάζει ικανοποιητικό αιολικό δυναμικό. Επιλέχθηκαν 2 ανεμογεννήτριες VESTAS V112-3MW και η ετήσια παραγόμενη ενέργεια υπολογίστηκε ίση με 18.994GWh.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Βασίλειος Δ. Μπιτζιώνης Δημήτριος Β. Μπιτζίωνης, (2010), Εναλλακτικές μορφές ενέργειας, εκδόσεις τζίολα.
2. www.wasp.com .The Wind Atlas Analysis and Application Program.
3. www.eletaen.gr, Ελληνική Ένωση Αιολικής Ενέργειας.
4. www.cres.gr/kape, Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ).
5. www.rae.gr, Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ).
6. www.earthtools.org
7. www.wasp.dk, The Wind Atlas Analysis and Application Program.
8. www.retscreen.net, RETScreen Clean Energy Project Analysis Software.
9. www.vestas.com
10. www.ewea.org, The European Wind Energy Association
11. www.ypeka.gr
12. - www.GWEC.net
13. - www.vestas.com
14. Διερεύνηση λειτουργίας/ελέγχου και προσομοίωση αιολικού συστήματος επαγωγικής γεννήτριας με STATCOM, διπλωματική εργασία Νικολάου Βεντούρη, Ιούνιος 2013
15. Αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας αιολικού πάρκου στις χαμηλές ταχύτητες ανέμου με τη χρήση γενετικού αλγόριθμου, διπλωματική εργασία Κατσαρός Νικόλας .2019
16. Αιολική ενέργεια και κατασκευή ανεμογεννητριών – μελέτη υλικών κατασκευής διπλωματική εργασία Φώτης τσαντίλας
17. Υπεράκτιες ανεμογεννήτριες ζητήματα διασύνδεσης με το δίκτυο
18. Αιολική ενέργεια Δρ. Ηλίας Κυριακίδης, επίκουρος καθηγητής πανεπιστήμιο Κύπρου
19. www.windowgrapher.com
20. Technical Documentation Wind Turbine Generator Systems 4.2/4.5/4.8/5.0/5.2/5.3/5.5-158 -50 Hz
21. Technical Documentation Wind Turbine Generator Systems5.5-158 - 50 Hz
22. ΕΛΟΤ ελληνικό πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝΑ 61400-12-1 2η Έκδοση
23. MEANEST evaluation of site-specific wind conditions version
24. Αιολική ενέργεια στην Ελλάδα και οικονομική αξιολόγηση, πτυχιακή εργασία Ιωάννης Χριστάκης, Ιωάννης Αθανασόπουλος,2016
25. Αξιολόγηση παραμέτρων απόδοσης αιολικού πάρκου, διπλωματική εργασία Μακρίδης Ιωάννης 2013.
26. Οικονομοτεχνική ανάλυση αιολικού πάρκου σε διασυνδεδεμένα αυτόνομα συστήματα ,διπλωματική εργασία, Νικόλαος Παπαδάκης ,2012.
27. Αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα, διπλωματική εργασία Σωκράτης Μηλάρας,2008.
28. Ανάλυση και διαχείριση ρίσκου σε έργα ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, διπλωματική εργασία Μηλιώνης Αλέξανδρος , 2014

29. Οικονομετρική μελέτη και αξιολόγηση κατασκευής αιολικών πάρκων στην Ελληνική Επικράτεια, διπλωματική εργασία Νικόλας Αργυρός , 2011.
30. Μελέτη αιολικού πάρκου ισχύος 2,4MW. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία Μπαϊρακτάρης Κωνσταντίνος ,2018.
31. Ενεργειακή Οικονομική και Περιβαλλοντική ανάλυση αιολικού πάρκου με χρήση του προγράμματος retscreen , διπλωματική εργασία Σαραφόπουλος Νικόλαος, 2017.
32. Wind Energy in Europe in 2019, Trends and statistics, February 2020 , www.windeurope.org
33. Οικονομοτεχνική μελέτη αιολικού πάρκου στη Δυτική Κρήτη με τη χρήση των λογισμικών Wasp και Retscreen, διπλωματική εργασία Μπαρμπαρήγου Μυρτώ , 2011.
34. Evolution of the HVDC Link Connecting Offshore Wind Farms to Onshore Power Systems, Roland Ryzndzonek , Lukasz Steklewicz, 14 April 2020.
35. Power Control of the Wind Turbine for Low Wind Speed, Abderrahmen MECHTER, Karim KEMIH, Malek GHANES.
36. WIND TURBINE DESIGN AND ANALYSIS, Yunus Emre ÖZTÜRK, Oğuz KILIÇ, Undergraduate Thesis, Mechanical Engineering Department June, 2020.
37. https://el.wikipedia.org/wiki/Αιολική_ενέργεια
38. <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/667-vestas-v112-offshore>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

