

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΠΟ ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ
ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ Α/Π ΤΡΙΚΟΡΦΑ**



ΡΑΥΤΟΠΟΥΛΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΠΑΤΡΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2022



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ - ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στο σημείο αυτό ευχαριστώ θερμά τον προϊστάμενό μου κ.Νικολόπουλο (Προϊστάμενος ανάπτυξης και λειτουργίας ΑΠΕ) της εταιρείας που εργάζομαι, για την βοήθεια και την υποστήριξη στην εκπόνηση της εργασίας και συνολικότερα στην περάτωση των σπουδών μου

Επίσης από αυτή τη θέση θα ήθελα να ευχαριστήσω τη σύζυγό μου Χρύσα και την οικογένειά μου για την κατανόηση και τη στήριξή τους στο εγχείρημα ολοκλήρωσης του πενταετούς κύκλου σπουδών στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου πλέον.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Βούρο του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών για την ανάθεση του θέματος και την εμπιστοσύνη του κατά τη διάρκεια υλοποίησης της διπλωματικής εργασίας.

Ραυτόπουλος Κωνσταντίνος
Σεπτέμβριος 2022

Υπεύθυνη Δήλωση Φοιτητή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Φοιτητής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Διπλωματικής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο Φοιτητής
(Ονοματεπώνυμο)

.....

(Υπογραφή)



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διπλωματική εργασία διαπραγματεύεται την ενεργειακή ανάλυση του αιολικού πάρκου (Α/Π) Τρίκορφα το οποίο απαρτίζεται από 7 ανεμογεννήτριες (Α/Γ) ονομαστικής ισχύος 2MW. Συνολικά το Α/Π είναι ονομαστικής ισχύος 14MW. Πρόκειται για Α/Π που είναι ήδη εγκατεστημένο και συνεισφέρει στο διασυνδεδεμένο δίκτυο με παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η διαρρύθμιση της εργασίας έχει ως ακολούθως:

Στο 1^ο κεφάλαιο συζητούνται γενικότερα οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), δίνοντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών. Στη συνέχεια το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην Αιολική Ενέργεια ως μορφή ΑΠΕ γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή και ειδικότερα περιγράφεται η κατάσταση στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια μέσα από στατιστικά στοιχεία. Το κεφάλαιο κλείνει με την ταξινόμηση των Α/Γ με την επικρατέστερη τοπολογία που εφαρμόζεται σήμερα.

Στο 2^ο κεφάλαιο περιγράφονται τα εξαρτήματα των Α/Γ δίνοντας καταρχήν αναλυτικές πληροφορίες ως προς το δρομέα. Περιγράφονται οι διάφορες κατηγορίες των συστημάτων και καταγράφονται τα είδη και οι τεχνολογίες των γεννητριών που αναμφίβολα είναι από τα πιο σημαντικά μέρη του όλου συστήματος μιας Α/Γ αφού είναι υπεύθυνη για τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφονται τα χαρακτηριστικά στοιχεία που συνθέτουν το αιολικό δυναμικό η γνώση του οποίου είναι απαραίτητη για την απόφαση της χωροθέτησης ενός αιολικού πάρκου (Α/Π). Δίνονται επίσης τα όργανα μέτρησης που χρησιμοποιούνται για την καταγραφή των ιδιοτήτων του ανέμου. Η ορθή χωροθέτηση Α/Γ σε συστοιχία Α/Π σύμφωνα και με το αιολικό δυναμικό μια περιοχής είναι αποφασιστικής σημασίας για την μετέπειτα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πέρα από τα ανεμολογικά δεδομένα απαραίτητη είναι και η καταγραφή του γεωγραφικού ανάγλυφου δηλ. η γεωμορφολογία του εδάφους ή της περιοχής στην οποία θα τοποθετηθούν οι Α/Γ. Το κεφάλαιο κλείνει με στοιχεία ταξινόμησης των κατά IEC.

Στο 4^ο κεφάλαιο συζητούνται στοιχεία αεροδυναμικής με τα χαρακτηριστικά ισχύος του ανέμου και τα στατιστικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται (κατανομή Weibull) για τον υπολογισμό της ισχύος του ανέμου σε ένα δεδομένο τόπο. Αναλύονται οι περιορισμοί εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας που τίθενται από την αεροδυναμική σύμφωνα με τη θεωρία μονοδιάστατης ορμής (όριο Betz).

Στο 5^ο κεφάλαιο δίνεται το μαθηματικό υπόβαθρο και οι σχέσεις υπολογισμού της ισχύος του ανέμου και οι απαραίτητες διορθώσεις ως προς την πυκνότητα του ανέμου ώστε να καταγραφεί η πραγματική καμπύλη ισχύος.

Στο 6^ο κεφάλαιο τα παραπάνω αναφερόμενα στοιχεία σχεδιασμού εξειδικεύονται στη χωροθέτηση του συγκεκριμένου υπό μελέτη Α/Π με τα ανεμολογικά δεδομένα της συγκεκριμένης περιοχής που αυτό είναι χωροθετημένο. Δίνεται η κατανομή Weibull που περιγράφει την περιοχή ενώ υπολογίζεται η θεωρητική και η πραγματική ισχύς του ανέμου. Επίσης υπολογίζεται η πραγματική ισχύς του ανέμου στη δεδομένη περιοχή μελέτης με τους περιορισμούς που τίθενται ενώ παράλληλα γίνεται και ο υπολογισμός των ενεργειακών απωλειών.



Στο 7^ο κεφάλαιο γίνεται η οικονομοτεχνική μελέτη με την αναλυτική κοστολόγηση του έργου σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες της τεχνικής έκθεσης Technical Report NREL/TP-500-40566 December 2006. Στο συγκεκριμένο εγχειρίδιο δίνονται οι σχέσεις υπολογισμού κόστους των επιμέρους τμημάτων – υποσυστημάτων μιας Α/Γ καταρχήν. Η μελέτη συμπληρώνεται από τα κόστη διασύνδεσης και υπόλοιπου ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού υδραυλικών και συστημάτων ψύξης έως και το κόστος θεμελίωσης. Η μελέτη φθάνει μέχρι και την κοστολόγηση των αδειών μηχανικού.

Στο 8^ο κεφάλαιο συζητούνται ενδεικτικά αποτελέσματα παραμέτρων λειτουργίας του Α/Π και δίνονται διαγράμματα σχετικά με την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του Α/Π.



Πίνακας Περιεχομένων

Πίνακας Περιεχομένων.....	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	6
Εισαγωγή.....	8
1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	9
1.1 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα των ΑΠΕ.....	10
1.2 Η Αιολική Ενέργεια.....	11
1.3 Σύντομη Ιστορική Αναδρομή.....	12
1.4 Η Κατάσταση στην Ελλάδα.....	13
1.5 Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών (Α/Γ).....	16
2. Κατασκευαστικά Τμήματα Α/Γ.....	20
2.1 Το Τμήμα του Ρότορα.....	20
2.2 Τα Πτερύγια του Δρομέα.....	21
2.3 Σύστημα Ελέγχου Στροφών των Πτερυγίων Α/Γ.....	22
2.3 Κατηγορίες Συστημάτων Ηλεκτρικής Γεννήτριας.....	23
3. Αιολικό Δυναμικό – Χωροθέτηση Α/Γ.....	29
3.1 Μετεωρολογικά Δεδομένα.....	29
3.2 Όργανα Μέτρησης Ισχύος του Ανέμου.....	31
3.3 Θερμοκρασία και Υψόμετρο - Διόρθωση της Πυκνότητας Αέρα.....	32
3.4 Μορφολογία Εδάφους.....	32
3.4 Τύρβη – Τραχύτητα Εδάφους - Διάτμηση.....	35
3.5 Χωροθέτηση Α/Γ.....	36
3.5 Ταξινόμηση Α/Π κατά IEC.....	38
3.6 Χερσαίο Αιολικό Δυναμικό.....	38
3.7 Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα.....	40
3.7 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις Α/Γ.....	42
4. Στοιχεία Αεροδυναμικής της Α/Γ.....	44
4.1 Θεωρίες Υπολογισμού Ισχύος Α/Γ.....	44
4.2 Θεωρία Μονοδιάστατης Ορμής – Όριο Betz.....	45
4.3 Το Τμήμα των Πτερυγίων - Αεροτομών.....	54
4.4 Αεροδυναμικοί Συντελεστές.....	55
5. Χαρακτηριστικά Ισχύος του Ανέμου.....	58
5.1 Ισχύς του Ανέμου.....	58
5.2 Ιδεατή Καμπύλη Ισχύος Ανεμογεννήτριας.....	59
5.3 Επίδραση ταχύτητας από το Υψόμετρο.....	61
5.4 Διόρθωση Ισχύος ως προς την Πυκνότητα του Αέρα.....	63
5.5 Κατανομή Weibull.....	64
5.6 Καμπύλες Πραγματικής Ισχύος.....	68
6. Χαρακτηριστικά Αιολικού Πάρκου (Α/Π Τρίκορφα).....	70
6.1 Χωροθέτηση Α/Π Τρίκορφα – Επιλογή Α/Γ.....	70
6.2 Ανεμολογικά – Κλιματικά Δεδομένα Α/Π Τρίκορφα.....	72
6.3 Κατανομή Weibull για το Α/Π Τρίκορφα.....	75
6.4 Υπολογισμός Πραγματικής Δεσμευόμενης Ισχύος Ανέμου.....	78



6.5	Υπολογισμός Ενεργειακών Απωλειών.....	80
6.6	Τεχνικά Χαρακτηριστικά των Α/Γ του Α/Π.....	81
7.	Οικονομοτεχνική Ανάλυση του Α/Π.....	82
7.1	Υπολογισμός κόστους Υποσυστημάτων Α/Γ.....	82
7.1.1.	Υπολογισμός κόστους Πτερυγίων.....	82
7.1.2.	Υπολογισμός κόστους Πλήμνης.....	83
7.1.3.	Υπολογισμός κόστους Βηματικών Μηχανισμών – Ρουλεμάν.....	83
7.1.4.	Υπολογισμός κόστους – Κώνου μύτης (Nose cone).....	84
7.1.5.	Υπολογισμός κόστους Άξονα Χαμηλής Ταχύτητας (Low –Speed Shaft).....	84
7.1.6.	Υπολογισμός κόστους Κύριων Εδράνων (Main Bearings).....	84
7.1.7.	Υπολογισμός κόστους Κιβωτίου Ταχυτήτων (Gear Box).....	85
7.1.8.	Υπολογισμός κόστους Μηχανικού Φρένου – Συνδέσεων (High Speed Coupling).....	85
7.1.9.	Υπολογισμός κόστους Γεννήτριας (Generator).....	85
7.1.10.	Υπολογισμός κόστους Ηλεκτρονικών Μεταβλητής Ταχύτητας.....	86
7.1.11.	Υπολογισμός κόστους Συστήματος προσανατολισμού (Yaw).....	86
7.1.12.	Υπολογισμός κόστους Κεντρικής Μονάδας Ελέγχου (Mainframe).....	86
7.1.13.	Υπολογισμός κόστους για Εξέδρες – Κιγκλιδώματα (Platforms – Railings).....	88
7.1.14.	Υπολογισμός κόστους Ηλεκτρικών Συνδέσεων.....	88
7.1.15.	Υπολογισμός κόστους Υδραυλικών και Συστημάτων Ψύξης.....	88
7.1.16.	Υπολογισμός καλύμματος Νασέλας (Nacelle cover).....	88
7.1.17.	Υπολογισμός κόστους Πύργου (Tower).....	89
7.1.18.	Υπολογισμός κόστους Θεμελίωσης (Foundation).....	89
7.1.19.	Υπολογισμός κόστους Ελέγχου, Ασφάλειας, Παρακολούθησης Συνθηκών Λειτουργίας του Συστήματος.....	90
	Πίνακας 7.1.....	90
	Πίνακας 7.2.....	91
7.2	Υπολογισμός κόστους υπόλοιπων έργων Α/Π.....	92
7.2.1.	Υπολογισμός κόστους Μεταφοράς Εξοπλισμού.....	92
7.2.2.	Υπολογισμός κόστους Παρεμβάσεων Οδικού Δικτύου.....	92
7.2.3.	Υπολογισμός κόστους Συναρμογής & Εγκατάστασης.....	92
7.2.4.	Υπολογισμός κόστους Ηλεκτρικών Συνδέσεων με το Δίκτυο Χαμηλής Τάσης.....	93
7.2.5.	Υπολογισμός κόστους Αδειών Μηχανικών.....	93
	Πίνακας 7.3.....	94
8.	Σενάριο λειτουργίας Α/Π.....	95
9	Συμπεράσματα.....	103
	Βιβλιογραφία.....	105



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας https://www.green-innovation.gr/wp-content/uploads/2014/02/18_Fot_netzs_330x330.jpg	10
Εικόνα 2 Πρώτες ανεμογεννήτριες του Roul la Cour (διαδίκτυο).....	13
Εικόνα 3: Χωρητικότητα στο διασυνδεδεμένο δίκτυο σύμφωνα με τους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας σε MWh κατά την περίοδο 1999 - 2021. (ΕΛΕΤΑΕΝ).....	14
Εικόνα 4: Κατανομή ηλεκτροπαραγωγής ανά περιοχή της Ελλάδας και εταιρείες παραγωγής (ΕΛΕΤΑΕΝ).	15
Εικόνα 5: Στατιστικά στοιχεία εγκατάστασης νέων Α/Γ στη χώρα (1997 - 2021) και εγκατεστημένη ισχύς κατά το 2021 ως προς τις κατασκευάστριες εταιρίες (ΕΛΕΤΑΕΝ)	16
Εικόνα 6: Ταξινόμηση Α/Γ ως προς τον άξονα περιστροφής.....	17
Εικόνα 7: Είδη Α/Γ κατακορύφου άξονα (Savonius, Darrieus, H).	19
Εικόνα 8: Τυπική Διάταξη Α/Γ (Αποστολόπουλος 2016).....	20
Εικόνα 9: Διανύσματα δυνάμεων και κυκλοφορία αέρα γύρω από πτερύγιο (Τσαουσάνιδης 2018).	21
Εικόνα 10 Κατηγοριοποίηση συστημάτων αιολικής ενέργειας (Ασλάνης 2020).	24
Εικόνα 11 Κύρια εξαρτήματα ανεμογεννητριών.	24
Εικόνα 12: Μετεωρολογικός Σταθμός (Μαρνέλλος 2018).	29
Εικόνα 13: Μετεωρολογικός Ιστός ύψους 40m.(http://www.aiolikigi.gr/el/e-learning/wind-potential-evaluation/)	30
Εικόνα 14. Επίπεδο έδαφος με εμπόδια (Μάρης 2022)	32
Εικόνα 15. Παράδειγμα προσπίπτουσας ροής ανέμου σε οξεία γωνία κτηρίου (Μάρης 2022)	33
Εικόνα 16. Κτηριακό εμπόδιο στο ρεύμα αέρα (wiki)	33
Εικόνα 17. Παράδειγμα τυπικής λοφοσειράς – Κατανομή ταχύτητας ανέμου πάνω από λόφο.....	34
Εικόνα 18. Παράδειγμα τύπου περασμάτων και διάσελων (Μάρης 2022).	34
Εικόνα 19: Κατανομή ταχύτητας πάνω από υψίπεδο.	35
Εικόνα 20: Θεωρητικές Αποστάσεις μεταξύ Α/Γ (Ασλάνης Κυριακόπουλος 2020).	37
Εικόνα 21: Χερσαίο Α/Π με στοιχισμένες Α/Γ.	37
Εικόνα 22: Χερσαίο Α/Π με άτακτη διάταξη Α/Γ (Παναχαϊκό)	37
Εικόνα 23 Χερσαίο αιολικό πάρκο με άτακτη διάταξη των ανεμογεννητριών.	38
Εικόνα 24: Α/Γ από το Α/Π Παναχαϊκού (Ασπρομάλης Ροϊδης 2020).	39
Εικόνα 25: Υπεράκτια Α/Π.....	40
Εικόνα 26 Τρόποι υποθαλάσσιας έδρασης.	41
Εικόνα 27: Μοντέλο δίσκου ενεργοποίησης (Λευθεριώτης 2015).	45
Εικόνα 28: Θέσεις ενδιαφέροντος ανάλυσης δίσκου ενεργοποίησης.	46
Εικόνα 29: Κατανομές πίεσης και ταχύτητας γύρω από το δίσκο ενεργοποίησης (Λευθεριώτης 2015).	47
Εικόνα 30: Χαρακτηριστικά μεγέθη - παράμετροι δίσκου ενεργοποίησης (ταχύτητες ανέμου, συντελεστής ισχύος C_p , συντελεστής ώσης C_T)	50
Εικόνα 31: Απόδοση δρομέα ως προς το λόγο ταχυστροφίας TSR.	51
Εικόνα 32 Καμπύλες απόδοσης – συντελεστή ισχύος για διάφορους τύπους Α/Γ και αριθμούς πτερυγίων, ως προς το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου TSR.....	52



Εικόνα 33: Τυπικό διάγραμμα C_{pr} ως προς το συντελεστή ταχυστροφίας λ , για Α/Γ οριζοντίου άξονα με τα πτερύγια σε συγκεκριμένη γωνίας κλίσης (pitch).....	53
Εικόνα 34: Βασικά Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Αεροτομής.....	54
Εικόνα 35: Ορισμός γωνίας προσβολής πτερυγίου.....	54
Εικόνα 36: Ανάλυση δύναμης αντίδρασης.....	55
Εικόνα 37: Πεδίο πίεσης γύρω από πτέρυγα.....	57
Εικόνα 38: Διαθέσιμη Ισχύς Ανέμου.....	59
Εικόνα 39 Ιδεατή καμπύλη ισχύος. Σημεία εκκίνησης και διακοπής λειτουργίας.....	60
Εικόνα 40: Σύγκριση καμπυλών ισχύος μοντέλων Α/Γ εταιρίας GAMESA.....	61
Εικόνα 41: Ισχύς ανέμου ως προς το ύψος του πύργου της Α/Γ.....	62
Εικόνα 42: Ισχύς – ταχύτητα ανέμου ως συνάρτηση του ύψους πύργου της Α/Γ.....	63
Εικόνα 43: Κατανομή Weibull χαμηλού αιολικού δυναμικού (Ασλάνης Κυριακόπουλος 2020).....	66
Εικόνα 44: Κατανομή Weibull μετρίου αιολικού δυναμικού(Ασλάνης Κυριακόπουλος 2020).....	67
Εικόνα 45: Κατανομή Weibull υψηλού αιολικού δυναμικού (Ασλάνης Κυριακόπουλος 2020).....	67
Εικόνα 46. Παράδειγμα ροδογράμματος.....	68
Εικόνα 47 (α) Αύξηση της διαμέτρου του δρομέα με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ισχύς σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου (β) Αύξηση του μεγέθους της γεννήτριας με αποτέλεσμα αύξηση της ισχύος σε υψηλότερες ταχύτητες.....	69
Εικόνα 48: Τοποθεσία εγκατάστασης Α/Π Τρίκορφα.....	71
Εικόνα 49: Ετήσια θερμοκρασιακή κατανομή και εύρος διακύμανσης ταχύτητας ανέμου στην περιοχή της Ναυπάκτου (www.meteoblue.com).....	72
Εικόνα 50: Ετήσιες καιρικές συνθήκες στην περιοχή της Ναυπάκτου (www.meteoblue.com).....	72
Εικόνα 51: Κατανομή μέγιστων θερμοκρασιών περιοχής Ναυπάκτου (www.meteoblue.com).....	73
Εικόνα 52: Ετήσια κατανομή ταχύτητας ανέμων στην περιοχή Ναυπάκτου (www.meteoblue.com).....	73
Εικόνα 53: Ροδόγραμμα περιοχής Ναυπάκτου (www.meteoblue.com).....	75
Εικόνα 54: Κανονικοποιημένη κατανομή ταχύτητας ανέμου σε $H = 10m$	76



Εισαγωγή.

Η εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου από τον άνθρωπο αποτέλεσε στοιχείο του πολιτισμού από την αρχαιότητα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας είναι τα ιστιοφόρα και οι ανεμόμυλοι. Εδώ και πολλά επίσης χρόνια η εξέλιξη του τεχνολογικού πολιτισμού ως προς την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας έχει φθάσει σε όλο και πιο αποδοτικά μοντέλα ανεμογεννητριών (Α/Γ).

Οι Α/Γ είναι μηχανές – μετατροπείς της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Η μετατροπή αυτή συμβαίνει σε δύο χρόνους. Καταρχήν ο άνεμος θέτοντας σε κίνηση μια πτερωτή μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική ενέργεια εκ περιστροφής στον άξονα της πτερωτής. Σε δεύτερο χρόνο η μηχανική ενέργεια εκ περιστροφής μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω μιας γεννήτριας.

Οι Α/Γ στις μέρες μας χρησιμοποιούνται για την πλήρη κάλυψη ή και τη συμπλήρωση των ενεργειακών αναγκών. Το παραγόμενο από αυτές ηλεκτρικό ρεύμα είτε μπορεί να καταναλώνεται άμεσα, είτε διαβιβάζεται στο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω γραμμών μεταφοράς για να καταναλωθεί αλλού. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τις Α/Γ όταν η παραγωγή είναι μεγαλύτερη από τη ζήτηση, συχνά αποθηκεύεται για να χρησιμοποιηθεί αργότερα, όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή.

Η αποθήκευση σήμερα γίνεται με δύο οικονομικά βιώσιμους τρόπους, με κριτήριο το ποσό - μέγεθος της παραγόμενης ενέργειας. Οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές (μπαταρίες) είναι η πλέον γνωστή και διαδεδομένη μέθοδος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία χρησιμοποιείται για μικρής κλίμακας παραγωγικές μη διασυνδεδεμένες στο κεντρικό δίκτυο μονάδες. Η άντληση ύδατος με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενης από ανεμογεννήτριες και η ταμίευσή του σε τεχνητές λίμνες κατασκευασμένες σε υψόμετρο το οποίο είναι ικανό να τροφοδοτήσει υδροηλεκτρικό σταθμό (ΥΗΣ), είναι η μέθοδος αποθήκευσης που χρησιμοποιείται όταν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι μεγάλη. Με αυτό τον τρόπο ουσιαστικά γίνεται συνδυαστικά εκμετάλλευση της υδροηλεκτρικής ενέργειας ενός ΥΗΣ π.χ σε μια υδατόπτωση με την ενέργεια που έχει καταναλωθεί για την άντληση του νερού σε ένα υψόμετρο να προέρχεται από την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας.

Στη χώρα μας καταγράφεται πολύ σημαντικό αιολικό δυναμικό, σε αρκετές περιοχές της Κρήτης, της Πελοποννήσου, της Ευβοίας και στα νησιά του Αιγαίου. Σε αυτές τις περιοχές συναντώνται και τα περισσότερα αιολικά πάρκα, τα οποία αποτελούνται από ομάδες - συστοιχίες Α/Γ σε βέλτιστη διάταξη για την καλύτερη δυνατή εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού. Η αιολική ενέργεια είναι πρακτικά μια ανανεώσιμη ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Η εκμετάλλευση του υψηλού αιολικού δυναμικού στη χώρα μας, σε συνδυασμό με τη συνεχή τεχνολογική ανάπτυξη και εξέλιξη των Α/Γ έχει τεράστια σημασία για τη βιώσιμη ανάπτυξη, την εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων, την προστασία του περιβάλλοντος και την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής (www.ypen.gov.gr).



1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

Κάθε φυσικό σύστημα περιέχει (ή εναλλακτικά αποθηκεύει) μία ποσότητα που ονομάζεται ενέργεια. Η ενέργεια συναρτάται έτσι άμεσα με τη δυνατότητα ενός σώματος ή συστήματος παραγωγής έργου. Γενικότερα οποιαδήποτε μορφή δράσης απαιτεί την κατανάλωση κάποιας μορφής ενέργειας. Η ενέργεια μπορεί να οριστεί ως το ποσό του έργου που απαιτείται προκειμένου το σύστημα να μεταβεί από μια αρχική κατάσταση σε μια τελική. Το ακριβές ποσό ενέργειας που περιέχεται σε ένα σύστημα μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας το άθροισμα όλων των ενεργειακών μορφών. Επίσης λόγω του ότι συνολικά η ενέργεια του σύμπαντος είναι σταθερή δεν παράγεται ούτε καταστρέφεται μόνο μπορεί να αλλάζει μορφές, όπως αναφέρεται χαρακτηριστικά στο πρώτο θερμοδυναμικό αξίωμα.

Κάθε μορφή ενέργειας περιγράφεται από εξισώσεις, καθεμιά από τις οποίες δίνει την ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στο σύστημα. Ανάλογα με τον τρόπο που η ενέργεια έχει αποκτηθεί, ανταλλαχθεί ή αποθηκευτεί, προκύπτει μια πρώτη κατηγοριοποίηση των μορφών ενέργειας:

- Μηχανική ενέργεια, που εμπεριέχει την κινητική και τη δυναμική ενέργεια.
- Ηλεκτρομαγνητική ενέργεια, που εμπεριέχει την ηλεκτρική και τη φωτεινή ή την ενέργεια ακτινοβολίας,
- Πυρηνική ενέργεια
- Θερμική ενέργεια
- Χημική ενέργεια
- Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

Εδώ και πολλά χρόνια η συζήτηση για την ενέργεια έχει πάρει μια διαφορετική τροπή με την παραγωγή και κατανάλωση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Η διατήρηση ή και βελτίωση του περιβάλλοντος συνδέεται πλέον με την Αειφόρο ανάπτυξη και την κυκλική οικονομία, έννοιες που επιδιώκονται και σχετίζονται στις μέρες μας με την ανθρώπινη δραστηριότητα. Ο λόγος είναι ότι το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής που αποτελεί την επέκταση του φαινομένου του θερμοκηπίου σχετίζεται άμεσα με τις εκπομπές ρύπων και κυρίως του CO₂ που εκλύονται στο περιβάλλον από την κατανάλωση των συμβατικών – ορυκτών καυσίμων (γαιάνθρακες, πετρέλαιο) στην ατμόσφαιρα.

Επίσης η κατά κεφαλήν ζήτηση ενέργειας κατά κύριο λόγο τους τελευταίους δύο αιώνες έχει αυξηθεί κατά πολύ. Η ζήτηση αυτή καλυπτόταν κυρίως από τα ορυκτά καύσιμα όπως για παράδειγμα το 2005 όπου κάλυπταν το 80% της κατανάλωσης της ενέργειας. Η διευρημένη χρήση των ΑΠΕ σε συνδυασμό με την ορθολογική χρήση και τρόπους εξοικονόμηση ενέργειας αναμένεται να βελτιώσει τις περιβαλλοντικές συνθήκες του πλανήτη, μειώνοντας τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής αντιμετωπίζοντας έτσι το φαινόμενο της υπερθέρμανσης.

Πιο αναλυτικά τα είδη των ανανεώσιμων μορφών ενέργειας (ΑΠΕ) που χρησιμοποιούνται σήμερα πέρα από την ηλεκτροπαραγωγή είναι:

- **Αιολική ενέργεια.** Χρησιμοποιείται πλέον ευρέως για ηλεκτροπαραγωγή.
- **Ηλιακή ενέργεια.** Χρησιμοποιείται περισσότερο για θερμικές εφαρμογές (ηλιακοί θερμοσίφωνες και φούρνοι) καθώς και για ηλεκτροπαραγωγή.



- **Υδραυλική ενέργεια.** Είναι τα γνωστά υδροηλεκτρικά έργα που εκμεταλλεύονται τις υδατοπτώσεις για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Βιομάζα.** Χρησιμοποιεί τους υδαάνθρακες των φυτών με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε από το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Ως βιομάζα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αστικά απόβλητα και απορρίμματα. Μπορεί να δώσει βιοαιθανόλη και το βιοαέριο, που είναι καύσιμα πιο φιλικά προς το περιβάλλον ως προς τα παραδοσιακά (λιγνίτες πετρέλαιο).
- **Γεωθερμική ενέργεια.** Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται από τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια
- **Ωσμωτική ενέργεια.** Η ανάμειξη γλυκού και θαλασσινού νερού απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες ενέργειας, όπως συμβαίνει όταν ένα ποτάμι εκβάλλει στον ωκεανό. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται ωσμωτική ενέργεια (ή γαλάζια ενέργεια) και ανακτάται όταν το νερό του ποταμού και το θαλασσινό νερό είναι διαχωρισμένα από μια ημιδιαπερατή μεμβράνη και το γλυκό νερό περνάει μέσω αυτής.
- **Ωκεάνια ή κυματική ενέργεια.** Η εκμετάλλευση της ενέργειας των κυμάτων συμβάλλει τοπικά στην εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 1 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας https://www.green-innovation.gr/wp-content/uploads/2014/02/18_Fot_netzs_330x330.jpg

1.1 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα των ΑΠΕ.

Γενικότερα οι ΑΠΕ είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας που προέρχονται μόνο από φυσικές διαδικασίες, όπως ο ήλιος, άνεμος, η θάλασσα, η θερμότητα της γης (γεωθερμία), η κυκλοφορία του νερού – υδατοπτώσεις, η βιομάζα και άλλες. Συγκεκριμένα ως ενέργεια από ανανεώσιμες μη ορυκτές πηγές θεωρείται η αιολική, η ηλιακή, η γεωθερμική, η υδροθερμική και ενέργεια των ωκεανών, η υδροηλεκτρική, η ενέργεια από βιομάζα, από τα εκλυόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, από αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και από βιοαέριο. Σε κάθε περίπτωση οι ΑΠΕ έχουν μελετηθεί ως λύση στο πρόβλημα της αναμενόμενης εξάντλησης των (μη ανανεώσιμων) αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων.



Στα πλεονεκτήματα των ΑΠΕ συγκαταλέγονται χαρακτηριστικά όπως:

- Είναι πολύ φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας ουσιαστικά μηδενικά κατάλοιπα και απόβλητα – μηδενικό ενεργειακό αποτύπωμα στο περιβάλλον.
- Είναι ανεξάντλητες, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα.
- Μπορούν να βοηθήσουν την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών, καθώς και να αποτελέσουν την εναλλακτική πρόταση σε σχέση με την οικονομία του πετρελαίου.
- Είναι ευέλικτες με την έννοια ότι μορφές των ΑΠΕ μπορούν να παράγονται ανάλογα με τις ανάγκες τοπικών πληθυσμών, καταργώντας την ανάγκη για τεράστιες μονάδες παραγωγής ενέργειας αλλά και για μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.
- Ο απαιτούμενος εξοπλισμός και η συντήρηση αυτού μπορούν να διατηρούν τα μηχανικά τμήματα των ΑΠΕ για μεγάλο χρόνο ζωής.
- Επιδοτούνται από τις περισσότερες κυβερνήσεις.

Στα μειονεκτήματα των ΑΠΕ συγκαταλέγονται χαρακτηριστικά όπως:

- Έχουν ένα αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης, της τάξης του 30% ή και χαμηλότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια της γης..
- Έχουν εποχιακό χαρακτήρα με την έννοια ότι η απόδοσή τους (π.χ αιολικής, υδροηλεκτρικής, ηλιακής ενέργειας, κυματικής ενέργειας) εξαρτάται από την εποχή του έτους, αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και το κλίμα της περιοχής εγκατάστασης.
- Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη κι ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πουλιών. Με την εξέλιξη όμως της τεχνολογίας τους και την προσεκτικότερη επιλογή χώρων εγκατάστασης (π.χ. σε πλατφόρμες στην ανοιχτή θάλασσα) αυτά τα προβλήματα έχουν σχεδόν λυθεί.
- Για τα υδροηλεκτρικά έργα λέγεται ότι προκαλούν έκλυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω από το νερό κι έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

1.2 Η Αιολική Ενέργεια

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του ανέμου. Η ενέργεια αυτή χαρακτηρίζεται ως "ήπια μορφή ενέργειας" και περιλαμβάνεται στις "καθαρές" πηγές, όπως συνηθίζονται να λέγονται οι πηγές ενέργειας που δεν συνεισφέρουν στις εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα. Η αιολική ενέργεια αποτελεί σήμερα σημαντική λύση στο πρόβλημα της ηλεκτροπαραγωγής. Αρκετά αιολικά πάρκα έχουν ήδη αδειοδοτηθεί και πολλές εγκαταστάσεις αναμένουν άδειες λειτουργίας από τη ΡΑΕ.

Ο κλάδος πλέον της αιολικής ενέργειας έχει δημιουργήσει σημαντικό κύκλο εργασιών με σημαντική συνεισφορά στην ελληνική οικονομία προσδίδοντας προστιθέμενη αξία και απορροφώντας σημαντικό επιστημονικό και εργατικό δυναμικό του τόπου. Τα οικονομικά οφέλη μιας περιοχής από την ανάπτυξη της αιολικής βιομηχανίας πλέον είναι πολύ σημαντικά.



Υπάρχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε τέτοιου είδους εγκαταστάσεις (αιολικά πάρκα) από πλήθος εταιριών παρά την πιθανή εποχική εξάρτηση από την πνοή των ανέμων, κάτι που όμως δεν αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα αφού οι τοποθεσίες χωροθέτησης των αιολικών πάρκων είναι συνήθως σε μεγάλο υψόμετρο. Πάντα ενυπάρχει βέβαια ο κίνδυνος από έκτακτα καιρικά φαινόμενα κατά τα οποία όμως η λειτουργία των Α/Γ τίθεται σε παύση προς αποφυγή βλαβών και επικίνδυνης λειτουργίας τους για όλη την εγκατάσταση. Σε κάθε περίπτωση η εκμετάλλευση του ανέμου στις Α/Γ δεν αφήνει ενεργειακό αποτύπωμα στο περιβάλλον αφού δεν εκλύονται αέρια θερμοκηπίου (CO₂) και άλλοι ρύποι, και συνολικότερα οι επιπτώσεις στο περιβάλλον είναι πολύ μικρότερες ως προς τα εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής από συμβατικά καύσιμα.

1.3 Σύντομη Ιστορική Αναδρομή.

Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας έχει μακρά ιστορία, συμβάλλοντας πολύ σημαντικά στην εξέλιξη του πολιτισμού. Πρακτικά, η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας χρονολογείται ήδη από το 5.000 π.Χ. από τους Αιγυπτίους, για την κίνηση των ιστιοφόρων πλοίων που είχαν κατασκευάσει, ενώ παράλληλα αρχαιολογικές έρευνες έχουν δείξει ότι όλοι οι μεγάλοι αρχαίοι πολιτισμοί (Αιγύπτιοι, Κινέζοι, Έλληνες) χρησιμοποιούσαν ανεμόμυλους για διάφορους σκοπούς, όπως για παράδειγμα άντληση νερού και άλεση σιτηρών. Στην Ευρώπη οι πρώτοι ανεμόμυλοι έκαναν την εμφάνισή τους περίπου το 1.200 π.Χ. με την πρώτη γραπτή αναφορά να γίνεται σε ένα γαλλικό φορολογικό έγγραφο το 1.125 μ.Χ. Ο τύπος του ήταν οριζόντιου άξονα με τέσσερα πτερύγια. Ένας άλλος τύπος ανεμόμυλου, ο οποίος χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα κυρίως στην Αμερική για την άντληση νερού, είναι ο αργός πολύπτερος.

Η πρώτη ανεμογεννήτρια παγκοσμίως που κατασκευάστηκε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ήταν από τον Δανό Poul la Cour, το 1891. Αξιοσημείωτο είναι ότι την ηλεκτρική ενέργεια που παρήγαγε ο Δανός ερευνητής την χρησιμοποιούσε για ηλεκτρόλυση νερού παράγοντας έτσι υδρογόνο για λάμπες αερίου του τοπικού σχολείου. Θα μπορούσε να πει κανείς ότι ο Δανός ερευνητής βρέθηκε έναν αιώνα μπροστά από την εποχή του, αφού το όραμα πολλών για τον 21ο αιώνα είναι η αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας, της φωτοβολταϊκής και αιολικής ενέργειας με σκοπό τη παραγωγή υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού, έτσι ώστε το υδρογόνο να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου. Στη σημερινή εποχή που πλέον γίνεται προσπάθεια εκμετάλλευσης του Υδρογόνου ως μορφή ΑΠΕ η ιδέα αυτή αποδεικνύεται μπροστά από την εποχή του.

Τα πρώτα αιολικά πάρκα - ηλεκτρικά συστήματα, κατασκευάστηκαν στις ΗΠΑ στα τέλη του 1890. Μέχρι το 1940 χιλιάδες μικρής παραγωγής αιολικά συστήματα λειτούργησαν σε αγροτικές περιοχές που δεν είχαν τη δυνατότητα διασύνδεσης στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το 1941, μπήκε σε παραγωγή μια από τις μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες της εποχής σχεδιασμένη για παραγωγή 1.25 MW, δρομέα 53m και 2 πτέρυγες. Η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια άντεξε υψηλές ταχύτητες ανέμου (έως και 50 m/s) πριν καταστραφεί το 1945 από μια μικρή ταχύτητα ανέμου 12 m/s όταν το ένα πτερύγιο (8m) λύθηκε και εντοπίστηκε 200m μακριά. Τα επόμενα έτη μειώθηκε το ενδιαφέρον προς τα αιολικά συστήματα καθώς το ηλεκτροδοτικό δίκτυο επεκτάθηκε ραγδαία και ήταν πιο αξιόπιστο και οικονομικό.



Εικόνα 2 Πρώτες ανεμογεννήτριες του Poul la Cour (διαδίκτυο)

Ωστόσο, οι πετρελαϊκές κρίσεις της δεκαετίας του 1970 ήταν η κινητήριος δύναμη για να επανέλθει το ενδιαφέρον στα εναλλακτικά ενεργειακά συστήματα στην ΗΠΑ, και σε συνδυασμό με τα σημαντικά οικονομικά και ρυθμιστικά κίνητρα ήταν πλέον συμφέρουσα λύση. Σχεδόν μέσα σε μία δεκαετία αρκετοί κατασκευαστές εγκατέστησαν χιλιάδες νέες ανεμογεννήτριες, κυρίως στην Καλιφόρνια. Παρόλο που οι περισσότερες μηχανές δεν απέδιδαν όσο αναμενόταν οι φορολογικές εκπτώσεις και άλλα κίνητρα που υπήρχαν τότε αξίζουν την προσοχή μας, γιατί σε αυτά αποδίδεται η μείωση του χρόνου που χρειάζεται για την επικράτηση των καλύτερων τεχνολογιών. Η ραγδαία αυτή ανάπτυξη στην Καλιφόρνια ήταν σύντομη, και όταν οι φοροελαφρύνσεις έπαψαν να υπάρχουν στα μέσα της επόμενης δεκαετίας η εγκατάσταση νέων αιολικών μηχανών σταμάτησε σχεδόν τελείως για μια δεκαετία.

Η ανάπτυξη της αιολικής τεχνολογίας δεν περιορίστηκε μόνο στην ΗΠΑ αλλά συνεχίστηκε και σε Δανία, Γερμανία και Ισπανία. Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς των ανεμογεννητριών αυξήθηκε κατά δέκα φορές από το 2002 έως το 2012. Το 2012 η παραγωγή ηλεκτρισμού από αιολικά συστήματα ξεπέρασαν το σημείο αναφοράς των 250 GW, το οποίο μέχρι τότε ήταν το σημείο αναφοράς, που ήταν τρεις φορές η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών. Η πιο εντυπωσιακή αύξηση ήταν αυτή της Κίνας η οποία μέσα σε έξι χρόνια ανέβηκε από τα 2.6 GW το 2006 στα 63 GW το 2011.

Η τεχνολογία εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας εξελίχθηκε ραγδαία στις πρώτες δεκαετίες του 21^{ου} αιώνα. Οι ανεμογεννήτριες εκτός του ότι έγιναν σημαντικά μεγαλύτερες βελτιώθηκε σε μεγάλο βαθμό και η απόδοσή τους. Στα τέλη του 20^{ου} με αρχές του 21^{ου} αιώνα οι περισσότερες ανεμογεννήτριες είχαν ονομαστική ισχύ 1-2 MW, ύψους πύργου 50-80 m, και διάμετρο πτερυγίων 80-100 m. Σχεδόν δέκα χρόνια μετά οι μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες, που ο σχεδιασμός τους ήταν εστιασμένος για τους παράκτιους ισχυρούς ανέμους, ήταν τέτοιου μεγέθους που έφταναν τα 7 MW, με δρομέα διαμέτρου που έφτανε πάνω από 150 m.

1.4 Η Κατάσταση στην Ελλάδα.

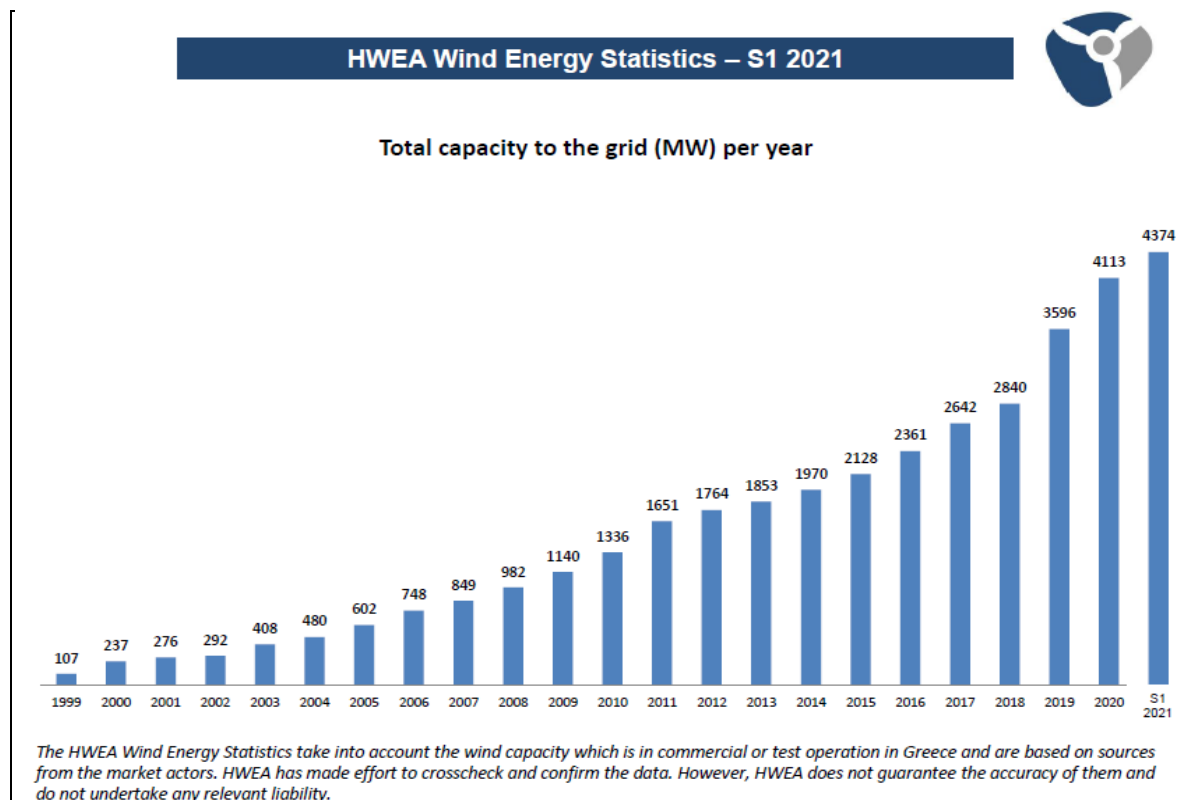
Η Ελλάδα είναι μια χώρα με μεγάλο μήκος ακτογραμμής (~16,000χλμ) και μεγάλο πλήθος νησιών, ενώ διαπερνάται από μεγάλους ορεινούς όγκους σε μεγάλο τμήμα της έκτασής της. Ως εκ τούτου, οι ισχυροί άνεμοι που πνέουν κυρίως στις νησιωτικές



και στα παράλια αλλά και σε μεγάλο υψόμετρο δίνουν ένα σημαντικό πλεονέκτημα στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στη χώρα.

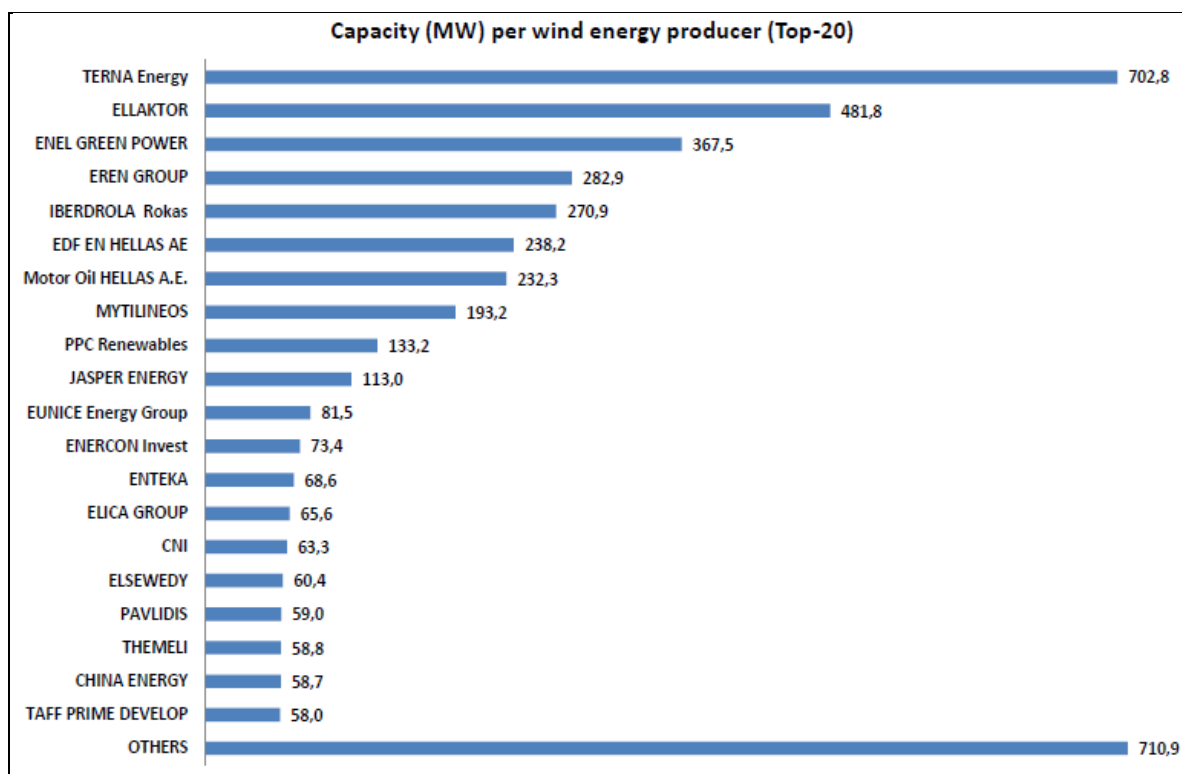
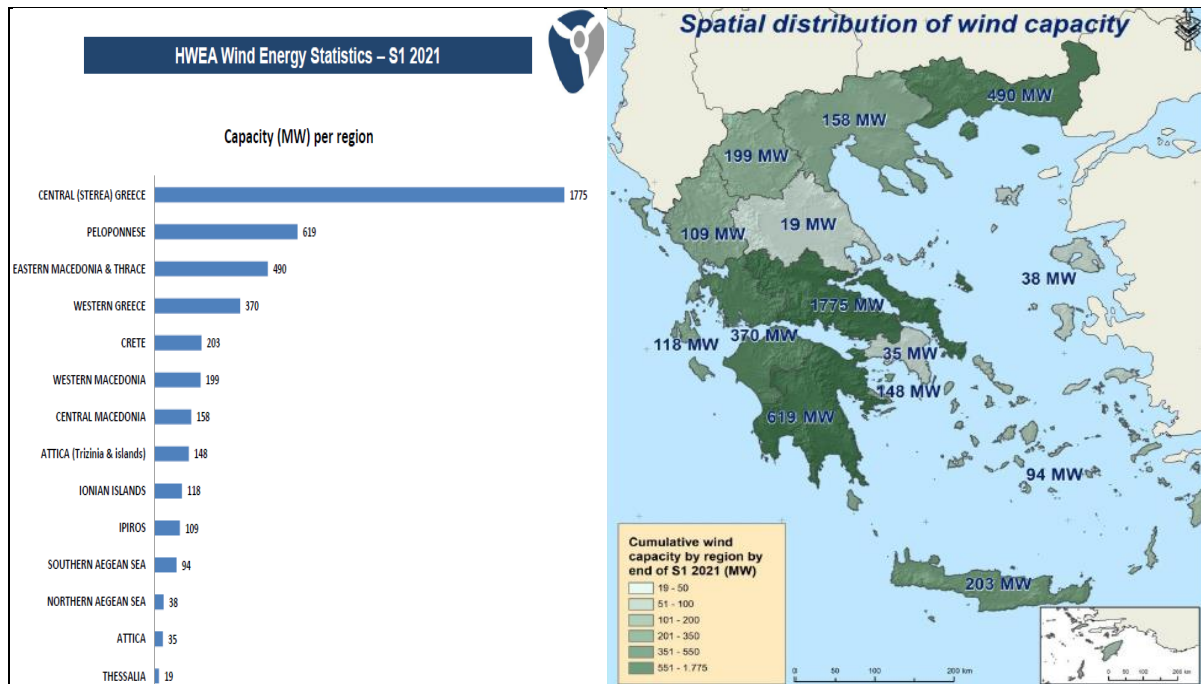
Το εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό σήμερα εκτιμάται ότι αντιπροσωπεύει το 13,6% του συνόλου των ηλεκτρικών αναγκών της χώρας. Σύμφωνα με την Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας, μέχρι το τέλος του 2019 συνδέθηκαν τα περισσότερα νέα αιολικά πάρκα (727,5MW), τετραπλασιάζοντας σχεδόν τον ετήσιο μέσο όρο της προηγούμενης δεκαετίας (185MW), επίδοση που αποτελεί ρεκόρ για την Ελλάδα.

Η κατάσταση στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια σε σχέση με την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας και της συνοδευόμενης τεχνολογίας απεικονίζεται στα διαγράμματα που ακολουθούν όπως αυτά δίνονται από την Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας.



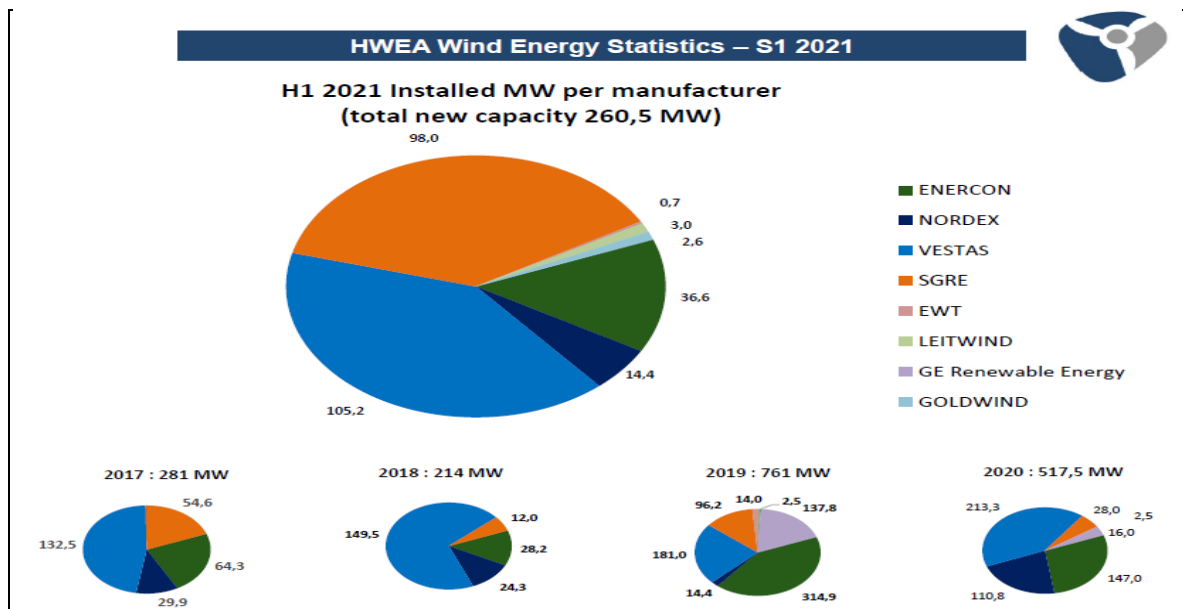
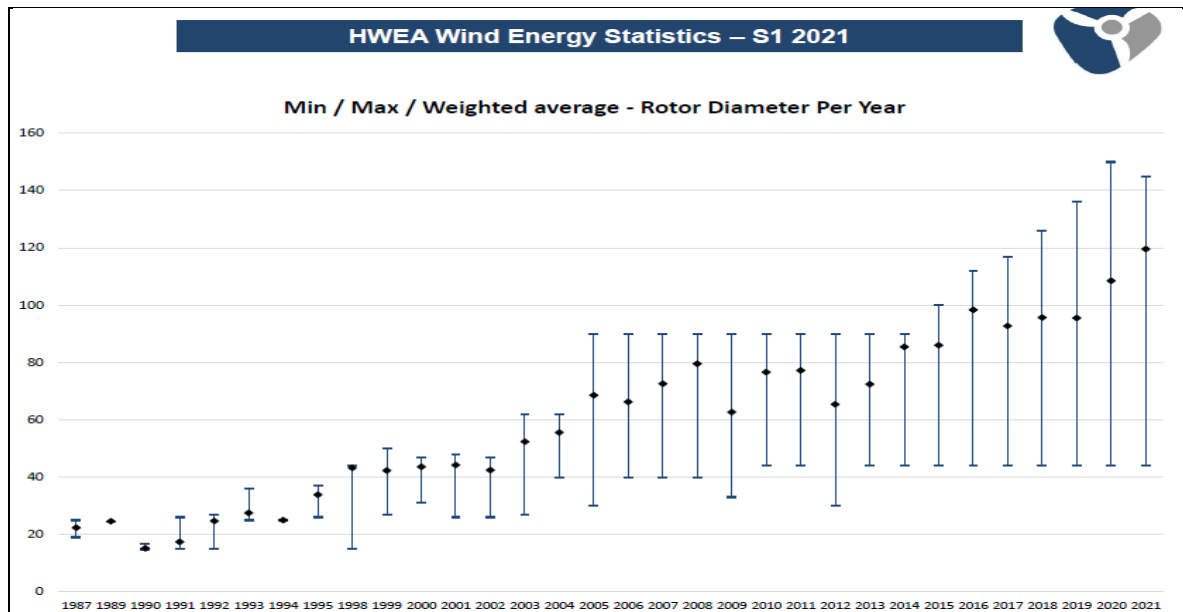
Εικόνα 3: Χωρητικότητα στο διασυνδεδεμένο δίκτυο σύμφωνα με τους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας σε MWh κατά την περίοδο 1999 - 2021. (ΕΛΕΤΑΕΝ)

Στην Εικ.3 φαίνεται η εξέλιξη της συνεισφοράς της αιολικής ενέργειας στο διασυνδεδεμένο δίκτυο. Είναι προφανής η μεγαλύτερη αύξηση που συμβαίνει τα τελευταία χρόνια.



Εικόνα 4: Κατανομή ηλεκτροπαραγωγής ανά περιοχή της Ελλάδας και εταιρείες παραγωγής (ΕΛΕΤΑΕΝ).

Όπως φαίνεται στην Εικ.4 πέρα από τους 20 μεγαλύτερους παραγωγούς υπάρχουν και πολλοί άλλοι που στο άθροισμά τους φθάνουν περίπου την παραγωγή του πρώτου.



Εικόνα 5: Στατιστικά στοιχεία εγκατάστασης νέων Α/Γ στη χώρα (1997 - 2021) και εγκατεστημένη ισχύς κατά το 2021 ως προς τις κατασκευάστριες εταιρίες (ΕΛΕΤΑΕΝ) .

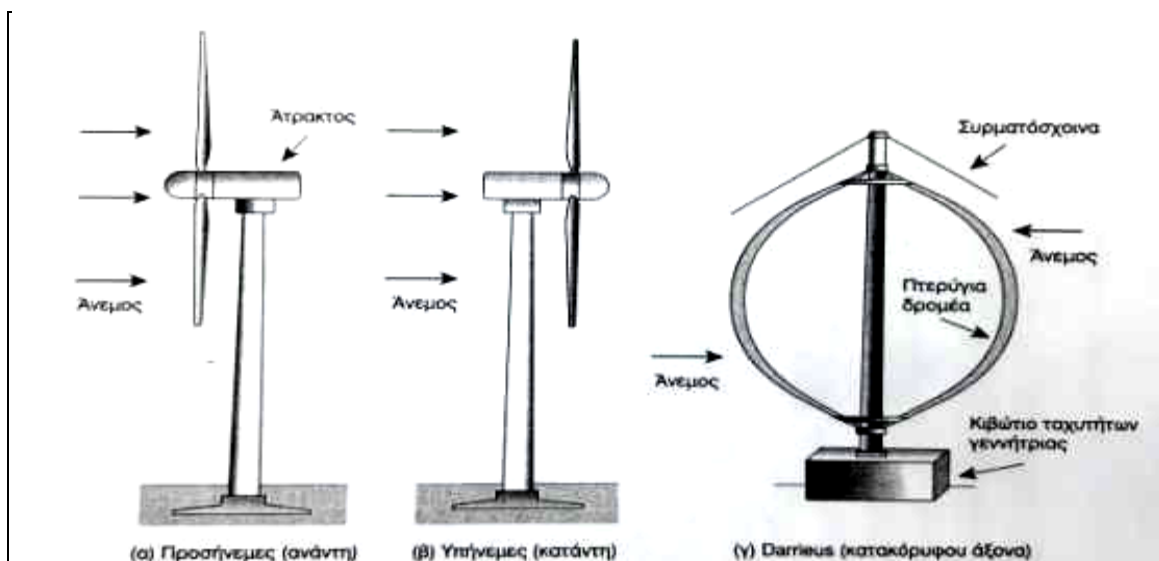
1.5 Ταξινόμηση Ανεμογεννητριών (Α/Γ).

Μια βασική παράμετρος ως προς την ταξινόμηση των ανεμογεννητριών είναι ο προσανατολισμός του άξονα περιστροφής, γύρω από τον οποίο περιστρέφονται τα πτερύγια. Υπάρχουν οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα. Σχεδόν όλες οι μεγάλες ανεμογεννήτριες είναι οριζόντιου άξονα (horizontal axis wind turbines – HAWT), αλλά υπάρχουν και κάποιες μικρότερες ανεμογεννήτριες με πτερύγια που περιστρέφονται γύρω από έναν κατακόρυφο άξονα, οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (vertical axis wind turbines – VAWT).



Οι HAWT μπορεί να είναι προσήνεμης ή υπήνεμης ροής. Στην τοπολογία προσήνεμης ροής ο αέρας κινείται διαπερνώντας πρώτα τον δρομέα και μετά τον πύργο στήριξης, δηλαδή «χτυπάει» την ανεμογεννήτρια από μπροστά ενώ υπήνεμης σημαίνει ότι ο αέρας συναντά πρώτα τον πύργο στήριξης και μετά τον δρομέα. Μια Α/Γ τοποθετημένη ως υπήνεμη έχει το πλεονέκτημα ότι αφήνει στον ίδιο τον άνεμο τον έλεγχο του προσανατολισμού (την κίνηση αριστερά-δεξιά), ώστε να προσανατολίζεται σωστά με φυσικό τρόπο σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου. Το μειονέκτημα μιας τέτοιας Α/Γ είναι ότι ο πύργος της Α/Γ λειτουργεί ως εμπόδιο (bluff body) ως προς τον άνεμο που πνέει προς τον δρομέα. Κατά την περιστροφή του πτερυγίου πίσω από τον πύργο προκαλείται μείωση της παροχής του ανέμου για ένα σύντομο χρονικό διάστημα που οδηγεί σε κάμψη – λυγισμό του πτερυγίου. Αυτή η κάμψη πέρα από την πιθανή καταστροφή του πτερυγίου λόγω καταπόνησης, αυξάνει τα επίπεδα θορύβου από την κίνηση του πτερυγίου παράλληλα με τη μείωση της παραγόμενης ισχύος.

Οι Α/Γ που λειτουργούν προσήνεμες, απαιτούν συστήματα ελέγχου προσανατολισμού για να έχουν συνεχώς τα πτερύγιά τους στραμμένα προς τον άνεμο. Ως αντιστάθμισμα σε αυτή την πρόσθετη πολυπλοκότητα - απαίτηση, λειτουργούν πιο ομαλά και παράγουν μεγαλύτερη ισχύ. Γενικά οι σύγχρονες Α/Γ τοποθετούνται προσήνεμες.



Εικόνα 6: Ταξινόμηση Α/Γ ως προς τον άξονα περιστροφής.

Μια άλλη βασική απόφαση σχεδιασμού για τις HAWT σχετίζεται με τον αριθμό των περιστρεφόμενων πτερυγίων. Ίσως η πιο γνωστή ανεμογεννήτρια για τους περισσότερους ανθρώπους είναι ο ανεμόμυλος με τα πολλά πτερύγια, που χρησιμοποιείται για άντληση νερού και συναντάται συχνά σε αγροκτήματα του αμερικανικού νότου. Για την άντληση νερού, ο ανεμόμυλος πρέπει να έχει την δυνατότητα υψηλής ροπής εκκίνησης για να υπερνικήσει το βάρος και την τριβή του άξονα άντλησης που κινείται πάνω-κάτω στη γεώτρηση. Επίσης, επιδιώκεται η λειτουργία σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου, ώστε να παρέχεται συνεχής άντληση νερού όλο τον χρόνο. Σύμφωνα με τον σχεδιασμό του ανεμόμυλου με τα πολλά πτερύγια, μια μεγάλη περιοχή του δρομέα έρχεται σε επαφή με τον άνεμο, κάτι που δίνει τη δυνατότητα στον ανεμόμυλο να αναπτύσσει υψηλή ροπή σε χαμηλές ταχύτητες

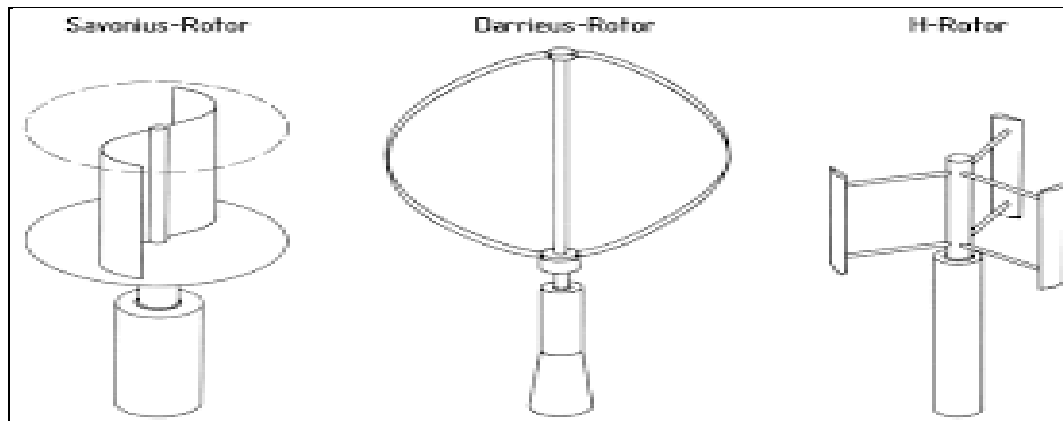


περιστροφής του δρομέα. Αυτού του τύπου εκμετάλλευση του ανέμου είναι πολύ διαφορετική από το σχεδιασμό για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι Α/Γ με πολλά πτερύγια λειτουργούν με πολύ χαμηλότερη ταχύτητα περιστροφής από εκείνες με τα λιγότερα πτερύγια. Καθώς οι στροφές της Α/Γ αυξάνονται, η τύρβη που προκαλείται από ένα πτερύγιο επηρεάζει την απόδοση του επόμενου. Έτσι Α/Γ με λιγότερα πτερύγια μπορούν να περιστρέφονται γρηγορότερα πριν το αποτέλεσμα αυτής της δημιουργούμενης τύρβης μεταξύ των πτερυγίων γίνει εμφανές. Επίσης ένας άξονας που περιστρέφεται σε μεγαλύτερες rpm μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερα μεγέθη Α/Γ.

Αρχικά οι HAWT με 2 πτερύγια αποτελούνταν από δρομείς που ήταν φθηνότεροι στην κατασκευή και μπορούσαν να ανυψωθούν πιο εύκολα έως την άτρακτο. Επίσης, είχαν δυνατότητα περιστροφής σε μεγαλύτερες rpm με μειωμένο κόστος της ηλεκτρικής γεννήτριας. Οι ανεμογεννήτριες τριών πτερυγίων δείχνουν ομαλότερη λειτουργία, εφόσον οι επιπτώσεις από τις παρεμβολές του πύργου και οι μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου ανάλογα με το ύψος μεταφέρονται πιο ομοιόμορφα από τον δρομέα στον άξονα της κίνησης. Επίσης, είναι λιγότερο θορυβώδεις. Όλες οι μεγάλες σύγχρονες ανεμογεννήτριες σήμερα είναι τριών πτερυγίων.

Το κύριο πλεονέκτημα των μηχανών κατακόρυφου άξονα, όπως ο δρομέας Darrieus σχετίζεται με την τοπολογία της ηλεκτρικής γεννήτριας και του κιβωτίου ταχυτήτων, που είναι και τα πιο βαριά – ογκώδη εξαρτήματα και που περιέχονται στην άτρακτο. Αυτές οι διατάξεις μπορούν να βρίσκονται εγκατεστημένες στο έδαφος, οπότε δίνουν πιο εύκολη πρόσβαση στη συντήρησή τους. Στην περίπτωση αυτή και αφού ο βαρύς εξοπλισμός δεν είναι στηριγμένος στην κορυφή του πύργου, ο ίδιος ο πύργος δεν χρειάζεται να είναι δομικά τόσο ισχυρός όσο για μια HAWT. Ο πύργος μπορεί να είναι ακόμη πιο ελαφρύς εάν χρησιμοποιηθούν συρματόσχοινα στήριξης, κατάλληλα για τους πύργους που βρίσκονται στην ξηρά, αλλά όχι για υπεράκτιες εγκαταστάσεις. Ένα άλλο πλεονέκτημα του τύπου Darrieus είναι ότι δεν απαιτεί έλεγχο του προσανατολισμού αφού όποια κι αν είναι η κατεύθυνση του ανέμου η Α/Γ περιστρέφεται σε κάθε περίπτωση. Τα πτερύγια σε έναν δρομέα Darrieus, καθώς περιστρέφονται, είναι σχεδόν πάντα σε φυσικό εφελκυσμό, το οποίο σημαίνει ότι μπορεί να είναι σχετικά πιο ελαφριά και φθηνά, αφού δεν χρειάζεται να διαχειρίζονται τη συνεχή κάμψη την οποία δέχονται τα πτερύγια των μηχανών οριζόντιου άξονα.

Το κύριο μειονέκτημα των Α/Γ κατακόρυφου άξονα, που τις έχει οδηγήσει σε εξαφάνιση εγκαταστάσεις μεγαλύτερης κλίμακας είναι η τοπολογία των πτερυγίων τα οποία λόγω της κατασκευαστικής σχεδίασης βρίσκονται χαμηλά και κοντά στο έδαφος, όπου οι ταχύτητες του ανέμου είναι χαμηλότερες. Είναι γνωστό ότι η παραγόμενη ισχύς των Α/Γ αυξάνει με τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Έτσι, στο επίπεδο του εδάφους οι VAWT δεν έχουν τη δυνατότητα να λειτουργήσουν σε μεγαλύτερα ύψη με πιο ισχυρούς ανέμους. Υπάρχει χώρος όμως και για αυτού του τύπου τις Α/Γ, αφού μια αγορά στην οποία οι VAWT μικρής κλίμακας με χαμηλή παραγόμενη ισχύ κάποιων KW μπορούν να εγκατασταθούν σε ταράτσες κτιρίων.



Εικόνα 7: Είδη Α/Γ κατακόρυφου άξονα (Savonius, Darrieus, H).



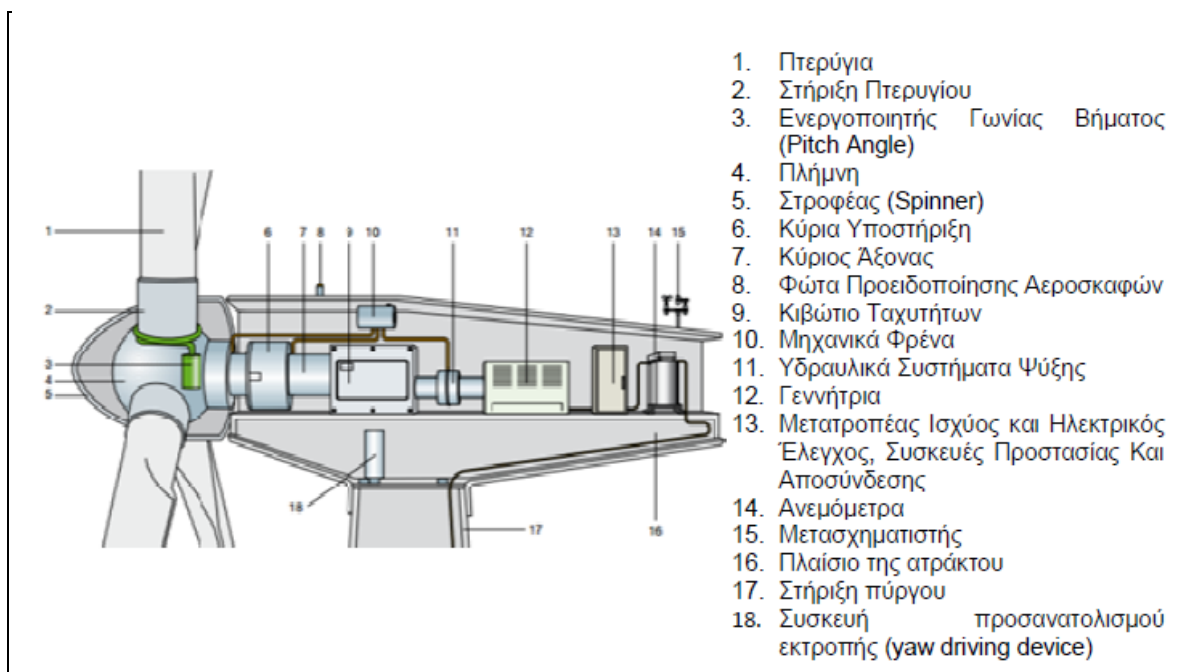
2. Κατασκευαστικά Τμήματα Α/Γ.

Τα κατασκευαστικά μέρη μιας Α/Γ αποτελούν αντικείμενο μελέτης με στόχο πάντα την επωφελέστερη - οικονομικότερη λύση για εξοικονόμηση κόστους υλικών αλλά και μεγαλύτερη αντοχή αυτών ώστε να αυξάνεται ο χρόνος ζωής μιας Α/Γ. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο καταγράφονται συνοπτικά τα κατασκευαστικά μέρη μιας Α/Γ τα οποία πλέον είναι ευρέως γνωστά. (Αποστολόπουλος 2016, Ασπρομάλης 2020, , Ασλάνης 2020). Τα σημαντικότερα μέρη μιας Α/Γ οριζοντίου άξονα είναι το ύψος του πύργου, η διάμετρος του ρότορα ο αριθμός των πτερυγίων και το σύστημα ελέγχου.

Το ύψος του πύργου είναι σημαντική παράμετρος αφού η ταχύτητα ροής του ανέμου αυξάνεται με την απόσταση από το έδαφος H . Η διάμετρος D του ρότορα υποδεικνύει την επιφάνεια προσβολής A παράμετρο που μπαίνει στον υπολογισμό της ισχύος. Ο λόγος D/H της διαμέτρου του ρότορα δηλ. προς το ύψος του άξονα περιστροφής του ρότορα συχνά τείνει στη μονάδα.

2.1 Το Τμήμα του Ρότορα.

Ο ρότορας μιας Α/Γ αποτελείται σήμερα από 3 πτερύγια. Η τριπτέρυγη περιστρέφεται με μικρότερη γωνιακή ταχύτητα είναι ακριβότερη αλλά από άποψη αεροδυναμικής έχει υψηλότερη απόδοση από τη διπτέρυγη. Η σύνδεση του ρότορα με τον άξονα περιστροφής με τη βοήθεια ελαστικού συνδέσμου συνήθως από καουτσούκ απορροφά πιθανούς κραδασμούς και υποβιβάζει ροπές κάμψης από το ρότορα στον άξονα. Η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα κυμαίνεται στο εύρος (20 – 50) rpm η οποία με την τοποθέτηση κιβωτίου ταχυτήτων μεταξύ του άξονα του ρότορα και του άξονα της γεννήτριας φθάνει στο εύρος (1000 – 3000)rpm.



Εικόνα 8: Τυπική Διάταξη Α/Γ (Αποστολόπουλος 2016).



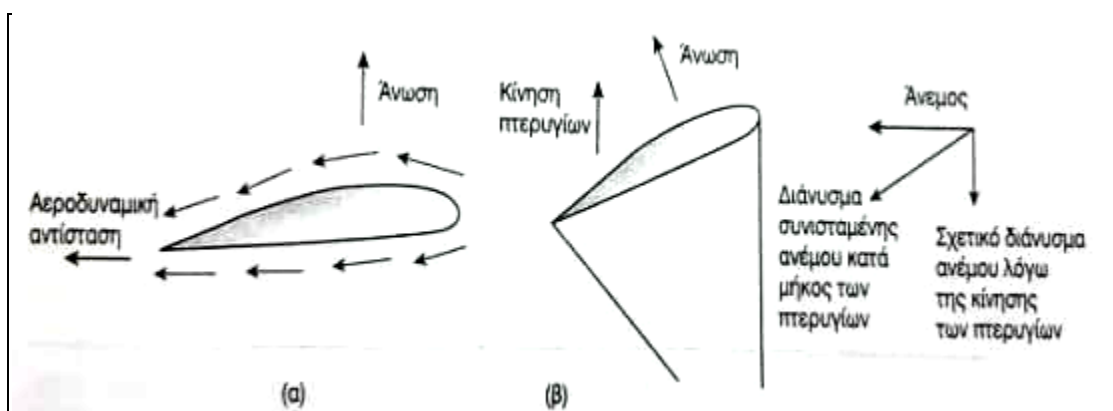
Ιδανικά σε μια Α/Γ ο ρότορας πρέπει να διευθύνεται κάθετα στην πορεία του ανέμου. Για να επιτευχθεί αυτό συνήθως οι Α/Γ έχουν προσαρμοσμένο έναν ανεμοδείκτη που «βλέπει» τις μεταβολές του ανέμου και διευθύνει με τη βοήθεια σερβομηχανισμού την Α/Γ με κύκλωμα ελέγχου. Ο ρότορας συγκεντρώνει το ερευνητικό ενδιαφέρον μέχρι και σήμερα ως προς την εξέλιξή του με συνεχή βελτίωση των αεροτομών – πτερυγίων Α/Γ που κατασκευάζονται από fiberglass υψηλής αντοχής, άκαμπτες ώστε να ενσωματώνουν υψηλά όρια αντοχής και χαμηλό κόστος.

2.2 Τα Πτερύγια του Δρομέα.

Για την κατανόηση της λειτουργίας μιας Α/Γ απαιτείται η γνώση του τρόπου με τον οποίο τα πτερύγια του δρομέα παράγουν ενέργεια από τον άνεμο. Για το λόγο αυτό απαιτούνται γνώσεις ρευστομηχανικής.

Γενικά η λειτουργία μιας αεροτομής (airfoil) είτε πρόκειται για φτερό αεροπλάνου είτε για πτερύγιο ανεμογεννήτριας βασίζεται στην εξ. Bernoulli για τη δημιουργία της άνωσης. Η ροή του αέρα στην άνω πλευρά της αεροτομής έχει να διασχίσει μεγαλύτερη απόσταση μέχρι το χείλος εκφυγής σε σχέση με τον αέρα που κυκλοφορεί στην κάτω πλευρά της ώστε να ξανασυναντηθούν στο τέλος της. Έτσι στην άνω πλευρά διαμορφώνεται μικρότερη πίεση ως προς την κάτω πλευρά. Η διαφορά πίεσης προκαλεί ανωστική δύναμη που μπορεί να κρατά π.χ ένα αεροπλάνο στον αέρα ή να περιστρέφει το πτερύγιο μιας Α/Γ.

Η ανάλυση των δυνάμεων σε ένα πτερύγιο Α/Γ είναι πιο περίπλοκη από ό,τι σε ένα φτερό αεροπλάνου. Ένα πτερύγιο της Α/Γ που περιστρέφεται δέχεται αέρα που κινείται προς την κατεύθυνσή του όχι μόνο από τον ίδιο τον άνεμο, αλλά και από τη σχετική κίνηση του πτερυγίου καθώς περιστρέφεται. Ο συνδυασμός των δύο αυτών κινήσεων οδηγεί σε πρόσθεση των διανυσμάτων και το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι διάνυσμα με κατεύθυνση κατά μήκος της αεροτομής σε γωνία τέτοια που στο πτερύγιο να κυριαρχεί η άνωση με σκοπό την κίνηση του δρομέα. Δεδομένου του ότι το πτερύγιο κινείται πολύ ταχύτερα στην άκρη από ό,τι κοντά στον άξονα, το πτερύγιο πρέπει να συστρέφεται κατά μήκος του, για να διατηρούνται σωστές οι γωνίες αυτές.



Εικόνα 9: Διανύσματα δυνάμεων και κυκλοφορία αέρα γύρω από πτερύγιο (Τσαουσανίδης 2018).

Στην Εικ.9 Η άνωση στο (α) οφείλεται στο ταχύτερο πέρασμα του αέρα στην πάνω πλευρά της αεροτομής. Στο (β) ο συνδυασμός των διανυσμάτων του πραγματικού



ανέμου και του ανέμου λόγω της κίνησης του πτερυγίου δημιουργεί μια συνισταμένη που είναι η άνωση. Έως ενός κρίσιμου σημείου η αύξηση της γωνίας μεταξύ της αεροτομής και του ανέμου (που ονομάζεται γωνία πρόσπτωσης) αυξάνει την άνωση σε βάρος την αυξημένης αντίστασης. Όμως η αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης πέρα από την κρίσιμη γωνία οδηγεί στο γνωστό φαινόμενο της απώλειας στήριξης. Όταν το πτερύγιο βρίσκεται σε κατάσταση απώλειας στήριξης, η ροή του αέρα στην πάνω πλευρά του δεν εφάπτεται πια στην επιφάνεια σχηματίζοντας έτσι στροβιλισμούς (τύρβη) που καταστρέφουν την άνωση.

2.3 Σύστημα Ελέγχου Στροφών των Πτερυγίων Α/Γ.

Η παραγόμενη ισχύς από μια Α/Γ αυξάνεται πολύ σημαντικά με την αύξηση της αιολικής ενέργειας. Σε μια ορισμένη ταχύτητα ανέμου, η Α/Γ φτάνει στο μέγιστο της παραγωγής ισχύος οπότε και θα πρέπει να υπάρχει τρόπος για τον περιορισμό της δύναμης του ανέμου επομένως και συγκράτηση των στροφών της Α/Γ, πριν αυτή καταστραφεί.

Τρεις τρόποι ελέγχου είναι περισσότερο διαδεδομένοι στις μεγάλες μηχανές:

- ο παθητικός έλεγχος επιβράδυνσης,
- ένα βηματικό ενεργητικό σύστημα ελέγχου πτερυγίων, και
- ο ενεργός έλεγχος επιβράδυνσης.

Ο τελευταίος τρόπος δηλ. ο ενεργός έλεγχος επιβράδυνσης αποτελεί συνδυασμό των δύο πρώτων τρόπων που δίνονται παραπάνω.

Για Α/Γ με παθητικό έλεγχο επιβράδυνσης, τα πτερύγια έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο για την αυτόματη μείωση της απόδοσης τους σε υπερβολικές ταχύτητες ανέμου. Τίποτα δεν περιστρέφεται και κανένας μηχανισμός δεν υπάρχει, όπως συμβαίνει στα ενεργητικού ελέγχου βήματος, εξ' ου και η ονομασία παθητικός έλεγχος. Η αεροδυναμική σχεδίαση των πτερυγίων, και ειδικότερα η συστροφή τους ως συνάρτηση της απόστασης από την πλήμνη, πρέπει να γίνει πολύ προσεκτικά έτσι ώστε να γίνετε σταδιακή μείωση στην άνωση, καθώς ο αέρας αυξάνει και τα πτερύγια περιστρέφονται πιο γρήγορα. Η μέθοδος αυτή είναι απλή και αξιόπιστη, αλλά αφήνει ανεκμετάλλευτη κάποια ισχύ σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου. Είναι δημοφιλής στις ανεμογεννήτριες μικρού μεγέθους περίπου 1MW.

Για Α/Γ με έλεγχο βήματος, η ισχύς εξόδου της γεννήτριας παρακολουθείται δυναμικά στο χρόνο από ένα ηλεκτρονικό σύστημα. Όταν η ισχύς υπερβεί τις προκαθορισμένες τιμές, η γωνία βήματος των πτερυγίων ρυθμίζεται κατάλληλα για την απόρριψη μέρους του ανέμου. Ένα υδραυλικό σύστημα περιστρέφει τα πτερύγια γύρο από τους άξονές τους, περιστρέφοντας σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα κάποιες μοίρες ώστε να μειώνεται ή να αυξάνεται η απόδοσή τους ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες. Ο στόχος είναι η μείωση της γωνίας πρόσπτωσης των πτερυγίων όταν πνέουν ισχυροί άνεμοι. Οι περισσότερες μεγάλες Α/Γ στηρίζονται σε αυτή την τεχνική για τον έλεγχο της παραγόμενης ισχύος.

Η τρίτη μέθοδος είναι ένα σύστημα ενεργού ελέγχου επιβράδυνσης κατά την οποία τα πτερύγια περιστρέφονται με τον ίδιο τρόπο όπως στην προσέγγιση ελέγχου βήματος. Η διαφορά έγκειται στην κατάσταση κατά την οποία οι άνεμοι υπερβαίνουν



την ονομαστική ταχύτητα του ανέμου της γεννήτριας. Σε αυτή την περίπτωση, αντί να γίνεται μείωση της γωνίας πρόσπτωσης των πτερυγίων, γίνεται αύξηση για να προκληθεί το φαινόμενο της απώλειας στήριξης και τελικά επιβράδυνση.

Γενικότερα στις Α/Γ με έλεγχο βήματος και ενεργητικό έλεγχο επιβράδυνσης, ο δρομέας σταματά περιστρέφοντας τα πτερύγια του γύρω από τον επιμήκη άξονά τους, για να δημιουργήσουν επιβράδυνση. Για Α/Γ με παθητικό έλεγχο επιβράδυνσης, συνήθως οι μεγάλες Α/Γ διαθέτουν περιστρεφόμενα τμήματα στα άκρα των πτερυγίων τους εφοδιασμένα με ελατήριο. Όταν ενεργοποιηθεί το υδραυλικό σύστημα που διαθέτουν, τα ελατήρια μετατοπίζονται και τα άκρα των πτερυγίων περιστρέφονται 90° από τον άνεμο σταματώντας έτσι την Α/Γ μέσα σε λίγες μόνο περιστροφές του δρομέα. Στην περίπτωση που το υδραυλικό σύστημα αποτύχει για οποιοδήποτε λόγο, τα ελατήρια ενεργοποιούνται αυτόματα όταν η ταχύτητα του δρομέα είναι εκτός ορίων. Τη στιγμή που ο δρομέας ακινητοποιηθεί, με οποιονδήποτε από τους παραπάνω μηχανισμούς, ένα μηχανικό φρένο κλειδώνει τον άξονα του δρομέα, κάτι το οποίο είναι αρκετά σημαντικό για λόγους ασφάλειας και κατά την συντήρηση.

Μικρού μεγέθους Α/Γ (παραγωγής της τάξης KW) μπορούν να διαθέτουν οποιαδήποτε τεχνική ελέγχου επιβράδυνσης από αυτές που αναφέρθηκαν νωρίτερα. Ο παθητικός έλεγχος προσανατολισμού αποσκοπεί στη μετατόπιση του άξονα της γεννήτριας όλο και πιο μακριά από τον άνεμο καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί με την τοποθέτηση της γεννήτριας ελαφρώς προς την πλευρά του πύργου στήριξης, έτσι ώστε οι ισχυροί άνεμοι να ωθούν τη μηχανή γύρω από αυτόν. Μια άλλη απλή και αξιόπιστη τεχνική στηρίζεται στην τοποθέτηση ενός ανεμοδείκτη προσανατολισμού ο οποίος τοποθετείται παράλληλα στο επίπεδο των πτερυγίων. Καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει η πίεση του, που ασκείται στο πτερύγιο, αυξάνει περιστρέφοντας έτσι την μηχανή μακριά από την κατεύθυνση του ανέμου.

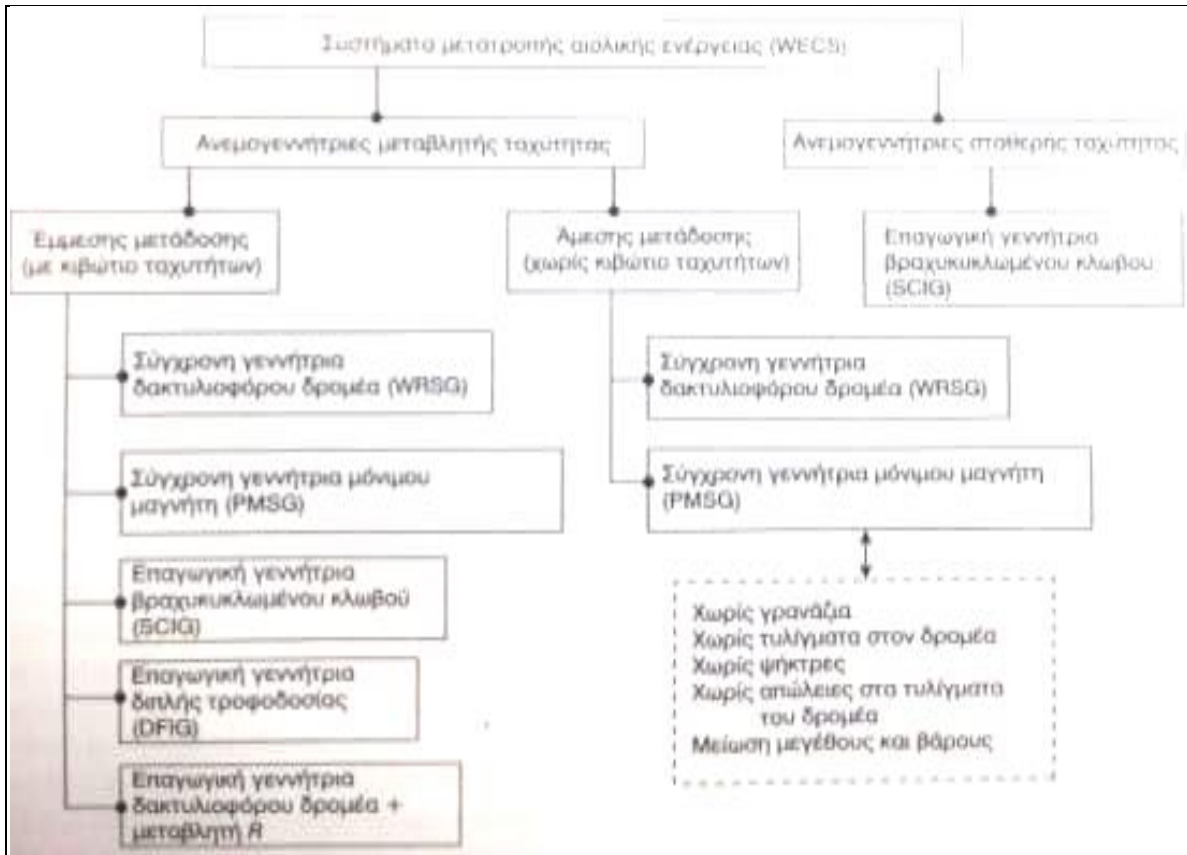
2.3 Κατηγορίες Συστημάτων Ηλεκτρικής Γεννήτριας.

Μία παράμετρος ταξινόμησης των συστημάτων αιολικής ενέργειας είναι η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, που μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβλητή. Υπάρχει ένα μέγιστο στην απόδοση για το δρομέα της Α/Γ στο οποίο η ταχύτητα περιστροφής του δρομέα είναι ίδια με την τρέχουσα ταχύτητα του ανέμου. Αυτή η κατάσταση όμως δεν είναι εφικτή πάντα αφού η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται συνεχώς. Κατά αυτή την έννοια η μέγιστη απόδοση θα μπορεί να επιτυγχάνεται αν η ταχύτητα του δρομέα είναι μεταβλητή, κάτι που είναι αρκετά κοστοβόρο. Οι Α/Γ με σταθερή ταχύτητα προσφέρουν μια απλή προσέγγιση με χαμηλότερο κόστος, αλλά δεν προσφέρουν τη δυνατότητα λειτουργίας της Α/Γ στο μέγιστο σημείο παραγωγής ισχύς της συνεχώς. Επίσης, οι μηχανικές καταπονήσεις που προκαλούνται από της απότομες διακυμάνσεις του ανέμου είναι πιο έντονες για τις Α/Γ σταθερής ταχύτητας, οι οποίες σχεδιάζονται ώστε να είναι ισχυρότερες κατασκευές.

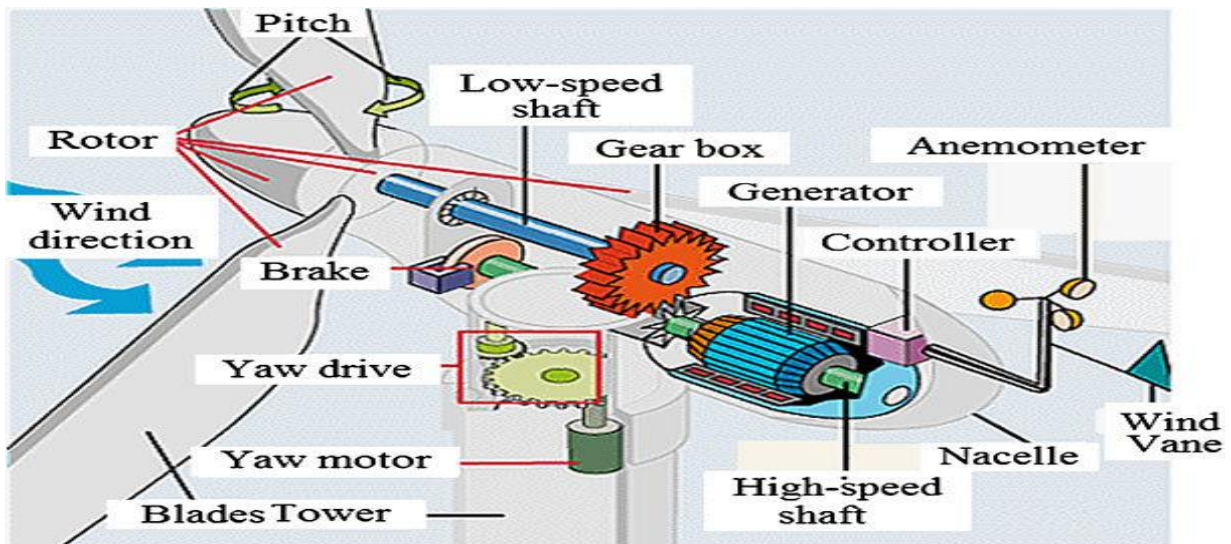
Τα χαρακτηριστικά διάκρισης των Α/Γ σχετίζονται με τον τύπο της γεννήτριας (σύγχρονη ή επαγωγική) και το κιβώτιο ταχυτήτων. Το πιο προηγμένο σύστημα που υπάρχει αυτή την στιγμή είναι Α/Γ μεταβλητής ταχύτητας, χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων, που χρησιμοποιεί σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (permanent magnet



synchronous generator - PMSG). Αυτές οι ανεμογεννήτριες είναι οι μεγαλύτερες και πιο αποδοτικές που σχεδιάστηκαν ειδικά για υπεράκτιες εφαρμογές.



Εικόνα 10 Κατηγοριοποίηση συστημάτων αιολικής ενέργειας (Ασλάνης 2020).



Εικόνα 11 Κύρια εξαρτήματα ανεμογεννητριών.

Τα βασικά εξαρτήματα των συστημάτων αιολικής ενέργειας φαίνονται στην Εικ.11. Η λειτουργία των πτερυγίων είναι προφανώς αποσκοπεί στη μετατροπή της ενέργειας του ανέμου σε κινητική σε έναν περιστρεφόμενο άξονα, ώστε να περιστραφεί μια γεννήτρια που παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Συνήθως η περιστροφή του άξονα είναι



πολύ αργή για να ενωθεί απευθείας σε μια γεννήτρια, γι' αυτό παρεμβάλλεται ένα κιβώτιο ταχυτήτων που μεταφέρει την ενέργεια από τον άξονα χαμηλής ταχύτητας στον άξονα υψηλής ταχύτητας που περιστρέφει την ηλεκτρική γεννήτρια. Υποθέτοντας ότι είναι μια μηχανή προσήνεμου τύπου, ένα άλλο κιβώτιο ταχυτήτων και ένας κινητήρας ρυθμίζουν τον προσανατολισμό της, προκειμένου η ανεμογεννήτρια να διατηρεί τα πτερύγια της προς τη φορά του άνεμου κατά την παραγωγή ενέργειας, καθώς και την εκτροπή του δρομέα από τον άνεμο, όταν οι άνεμοι είναι πολύ ισχυροί, για να μην καταστραφεί η μηχανή. Υπό τέτοιες συνθήκες, ένα φρένο χρησιμοποιείται για να κλειδώσουν τα πτερύγια στην θέση τους.

2.4.1 Σύγχρονες Γεννήτριες Σταθερής Ταχύτητας

Οι σύγχρονες γεννήτριες, παράγουν σχεδόν το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο. Αναφέρονται και ως γεννήτριες σταθερής ταχύτητας, καθώς περιστρέφονται σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής που καθορίζεται από τον αριθμό των πόλων του δρομέα p και τη συχνότητα f (Hz) της τριφασικής τάσης οπλισμού που παρέχεται από το δίκτυο.

$$N(\text{rpm}) = \frac{120f}{p} \quad (2.1)$$

Το ρεύμα οπλισμού δημιουργεί ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο εντός της γεννήτριας, το οποίο αλληλεπιδρά με ένα δεύτερο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τον ίδιο τον δρομέα. Το πεδίο που δημιουργεί ο δρομέας μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με μόνιμους μαγνήτες (PMSG) πάνω στον δρομέα είτε με ένα ρεύμα πεδίου που διοχετεύεται μέσω δακτυλίων ολίσθησης στα τυλίγματα πάνω στον ίδιο τον δρομέα. Η τελευταία διάταξη αναφέρεται ως επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα (WRSG).

2.4.2 Επαγωγική Γεννήτρια Βραχυκυκλωμένου Κλωβού.

Στις περισσότερες περιπτώσεις ανά τον κόσμο χρησιμοποιούν επαγωγικές γεννήτριες αντί για τις σύγχρονες μηχανές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Σε αντίθεση με τις σύγχρονες γεννήτριες, οι επαγωγικές μηχανές δεν περιστρέφονται με σταθερή ταχύτητα, γι' αυτό και συχνά περιγράφονται ως ασύγχρονες γεννήτριες. Παρόλο που οι επαγωγικές γεννήτριες συνήθως δεν χρησιμοποιούνται σε συστήματα παραγωγής ισχύος εκτός των ανεμογεννητριών, οι κινητήρες επαγωγής είναι οι πιο διαδεδομένοι κινητήρες, που χρησιμοποιούνται σχεδόν στο ένα τρίτο του συνόλου της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται παγκοσμίως. Οι επαγωγικές γεννήτριες λειτουργούν με βάση ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται στις περιελίξεις του οπλισμού (τυλίγματα του στάτη), αλλά η ταχύτητα τους μπορεί να είναι διαφορετική από τη σταθερή ταχύτητα του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες μηχανών επαγωγής: εκείνες με δακτυλιοφόρους δρομείς [επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα (wound rotor induction generators – WRIG)], και επίσης εκείνες που έχουν δρομείς που ονομάζονται δρομείς βραχυκυκλωμένου κλωβού [επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού (squirrel-cage induction generators- SCIG)]. Οι γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού απαρτίζονται από έναν αριθμό χάλκινων ή αλουμινένιων ράβδων



βραχυκυκλωμένων στα άκρα τους, σχηματίζοντας έναν κλωβό. Ο κλωβός αυτός στη συνέχεια ενσωματώνεται σε έναν σιδερένιο πυρήνα που αποτελείται από μονωμένα λεπτά (0.5mm) χαλύβδινα ελάσματα, για να βοηθήσει στον έλεγχο των απωλειών λόγω των δινορευμάτων. Το βασικό πλεονέκτημα των SCIG (επαγωγικές γεννήτριες βραχυκυκλωμένου κλωβού) είναι ότι οι δρομείς τους δεν χρειάζονται διέγερση, ψήκτρες και δακτυλίους ολίσθησης, όπως συμβαίνει με τις WRIG (επαγωγικές γεννήτριες δακτυλιοφόρου δρομέα). Με μια διαφορετική ματιά, μπορεί να θεωρηθεί ότι το πεδίο του στάτη είναι σταθερό και ότι ο αγωγός κινείται προς τα αριστερά, περνώντας μέσα από τις γραμμές της μαγνητικής ροής. Ικανοποιείται έτσι ο νόμος του Faraday για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή που αναφέρει ότι κινούμενος αγωγός μέσα σε μαγνητικό πεδίο παράγει μια ηλεκτρεγερτική δύναμη (electromotive force – emf) στα άκρα του περνώντας έτσι ρεύμα μέσα από αυτόν.

Στην πραγματικότητα, ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού έχει αγώγιμες ράβδους με πολύ μικρή αντίσταση, κάτι που τον καθιστά ικανό να μπορεί να ρέει εύκολα αρκετό ρεύμα μέσα από αυτόν. Το ρεύμα του δρομέα θα δημιουργήσει το δικό του μαγνητικό πεδίο, το οποίο εμφανίζεται γύρω από τον αγωγό. Στη συνέχεια, το μαγνητικό πεδίο του δρομέα αλληλεπιδρά με το μαγνητικό πεδίο του στάτη και παράγουν μια δύναμη που προσπαθεί να κινήσει τον αγωγίμο κλωβό προς μια κατεύθυνση. Δηλαδή ο δρομέας προσπαθεί να περιστραφεί προς την ίδια κατεύθυνση και με ίδια ταχύτητα με αυτήν του περιστρεφόμενου πεδίου.

Καθώς ο στάτης μιας επαγωγικής μηχανής τροφοδοτείται με τριφασικό ρεύμα διέγερσης και ο άξονας είναι συνδεδεμένος με μια ανεμογεννήτρια, όταν ο άνεμος αρχίζει να φυσάει, το σύστημα τίθεται σε λειτουργία αυξάνοντας τις στροφές προς τη σύγχρονη ταχύτητα του. Όταν τελικά η ταχύτητα του ανέμου είναι επαρκής για να αναγκάσει τον άξονα της γεννήτριας να υπερβεί τη σύγχρονη ταχύτητα, η επαγωγική μηχανή αλλάζει αυτόματα σε τριφασική γεννήτρια που παρέχει ηλεκτρικό ρεύμα πίσω στις περιελίξεις του στάτη της. Η σχετική ταχύτητα μεταξύ του μαγνητικού πεδίου του στάτη και του ίδιου του δρομέα ονομάζεται ταχύτητα ολίσθησης s και ορίζεται ως:

$$s = \frac{N_s - N_R}{N_s} = 1 - \frac{N_s}{N_R} \quad (2.2)$$

Όπου,

N_s η σύγχρονη ταχύτητα χωρίς φορτίο και

N_R η ταχύτητα του δρομέα

Η ολίσθηση θεωρείται θετική όταν ο δρομέας κινείται με μικρότερη ταχύτητα από το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη, δηλαδή η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας. Αντίθετα όταν ο δρομέας κινείται γρηγορότερα από το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, η ολίσθηση είναι αρνητική και η μηχανή λειτουργεί ως γεννήτρια.

Στις επαγωγικές μηχανές οι οποίες είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο, η ολίσθηση δεν είναι συνήθως περισσότερη από το $\pm 1\%$. Το οποίο σημαίνει για γεννήτρια με 4 πόλους στα 60 Hz ότι περιστρέφεται με ταχύτητα:

$$N_R = (1 - s)N_s = (1 - s) \cdot \frac{120f}{p} = [1 - (-0.01)] \cdot \frac{120 \times 60}{4} = 1818rpm \quad (2.3)$$



Εάν σε αυτό το σημείο θεωρηθεί σχέση μετάδοσης στο κιβώτιο 100:1, τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας θα αναγκαστούν να περιστραφούν κοντά στις 18 rpm.

Με μια έξυπνη καλωδίωση των περιελίξεων του στάτη, είναι εφικτό να μεταβληθεί εξ αποστάσεως ο αριθμός των πόλων της γεννήτριας. Για τον δρομέα, ο αριθμός των πόλων στον στάτη δεν έχει σημασία. Δηλαδή, ο στάτης μπορεί να έχει εξωτερικές συνδέσεις που να αλλάζουν τον αριθμό των πόλων, χωρίς όμως να χρειάζεται καμία αλλαγή στον δρομέα. Για παράδειγμα, μια γεννήτρια 60 Hz τεσσάρων πόλων περιστρέφεται με περίπου 1800 rpm όπως δείξαμε παραπάνω, ενώ με έξι πόλους θα περιστρέφεται με 1200 rpm. Επίσης με ένα κιβώτιο ταχυτήτων 100:1, οι δρομείς θα μπορούσαν να περιστρέφονται με 12 ή 18 rpm. Αυτή η τεχνική εναλλαγής των πόλων είναι συχνή σε κινητήρες οικιακών συσκευών, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται σε πλυντήρια και ανεμιστήρες απαγωγής, για να δίνεται η δυνατότητα λειτουργίας δύο ή τριών ταχυτήτων στην συσκευή.

2.4.3 Επαγωγική Γεννήτρια Διπλής Τροφοδοσίας.

Η επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού (SCIG), χωρίς ηλεκτρικές συνδέσεις στον δρομέα, έχει το σημαντικό πλεονέκτημα της απλότητας και της στιβαρότητας. Από την άλλη, είναι μια μηχανή σταθερής ταχύτητας, της οποίας η ταχύτητα περιστροφής διαφέρει ελάχιστα από εκείνη μιας σύγχρονης γεννήτριας. Ακόμη και αυτές οι μικρές διακυμάνσεις όμως βοηθούν όταν πρόκειται για την απαλοιφή των <<κραδασμών>> που προκαλούνται από τις απότομες διακυμάνσεις των ανέμων.

Η επιπλέον πολυπλοκότητα μιας επαγωγικής γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα, η οποία χρειάζεται δακτυλίους ολίσθησης για να ενεργοποιήσει τον δρομέα, είναι πολλές φορές περισσότερη από αυτή που μπορεί να δικαιολογηθεί λόγω της προστιθέμενης ευελιξίας που μπορεί να μας παρέχει στον έλεγχο της ταχύτητας του δρομέα. Μία από τις πιο δημοφιλείς διατάξεις των ανεμογεννητριών στηρίζεται στην επονομαζόμενη ως επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα διπλής τροφοδοσίας (doubly-fed induction generator – DFIG). Το τμήμα του στάτη ενός συστήματος DFIG είναι συμβατικό. Δηλαδή, από το δίκτυο παρέχετε τριφασική τάση που δημιουργεί το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη. Η ισχύς που παράγεται σε αυτόν τροφοδοτείται και πάλι στο δίκτυο με τον ίδιο τρόπο. Η διαφορά σε αυτήν την τεχνική είναι ότι ο δρομέας έχει ρυθμιστεί έτσι ώστε να επιτρέπει την αμφίδρομη ροή ισχύος προς ή από το δίκτυο. Όταν ο δρομέας δηλαδή περιστρέφεται με συχνότητα μικρότερη της σύγχρονης (υπο-σύγχρονη), η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας, επιβραδύνοντας την ανεμογεννήτρια και τραβώντας ενέργεια από το δίκτυο. Όταν βρίσκεται σε υπερ-σύγχρονη λειτουργία, περιστρέφεται πιο γρήγορα από τη σύγχρονη ταχύτητα, η ισχύς που παράγεται από τον ίδιο τον δρομέα, τροφοδοτείται και πάλι πίσω στο δίκτυο.

2.4.4 Σύγχρονες Γεννήτριες Μεταβλητής Ταχύτητας

Η διάταξη DFIG (επαγωγική γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα διπλής τροφοδοσίας) που αναφέρθηκε παραπάνω χρησιμοποιεί για την λειτουργία της έναν σχετικά μικρό μετατροπέα τάσης, με ονομαστική ισχύ περίπου 30% της πλήρους ισχύος της Α/Γ. Και έχει την δυνατότητα για περίπου ίδιου μεγέθους ρυθμίσεις ταχυτήτων.



Το επόμενο στάδιο που πρέπει να καλύψουμε είναι να αποκτήσουμε τον πλήρη έλεγχο της ταχύτητας με μετατροπέα πλήρους δυναμικότητας που τροφοδοτεί την σύγχρονη γεννήτρια. Η γεννήτρια μπορεί να είναι είτε δακτυλιοφόρου δρομέα, που σε αυτή την τεχνική όπως είπαμε χρειαζόμαστε δακτυλίους ολίσθησης και ένα κύκλωμα διέγερσης, είτε -για να αποφύγουμε αυτές τις προσθήκες- μπορεί να κατασκευαστεί με δρομέα μόνιμου μαγνήτη. Όταν μια PMSG είναι εφοδιασμένη με έναν πολύ μεγάλο αριθμό πόλων, τότε το κιβώτιο ταχυτήτων μπορεί να παραλειφθεί. Παρόλα αυτά οι μόνιμοι μαγνήτες, είναι κατασκευασμένοι από υλικά σπάνιων γαιών, όπως το νεοδύμιο, που και αυτά παρουσιάζουν διάφορα προβλήματα. Η διαθεσιμότητα αυτών των υλικών είναι εξαιρετικά σπάνια και, εκτός αυτού, τα υλικά αυτά παρουσιάζουν ένα ιδιαίτερο πρόβλημα, το οποίο είναι να χάνουν μόνιμα την ένταση του μαγνητικού τους πεδίου όταν εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες.

Οι Α/Γ που δεν χρησιμοποιούν γρανάζια εμφανίζουν σημαντικές επιπτώσεις στο σχήμα της ατράκτου. Δεν υπάρχει λόγος να είναι πολύ μακριά, δεδομένου ότι δεν υπάρχει κιβώτιο ταχυτήτων, αλλά δημιουργείται η ανάγκη για μια μεγαλύτερη διάμετρο για να μπορεί να στεγάσει τη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη με τους πολλούς πόλους. Η επιπλέον πολυπλοκότητα των συστημάτων αυτών αυξάνει σημαντικά το κόστος τους, αλλά μειώνει τις απαιτήσεις συντήρησής τους. Η πρώτη εμφάνισή τους στην αγορά ήταν σε πολύ μεγάλες γεννήτριες σε υπεράκτια συστήματα.



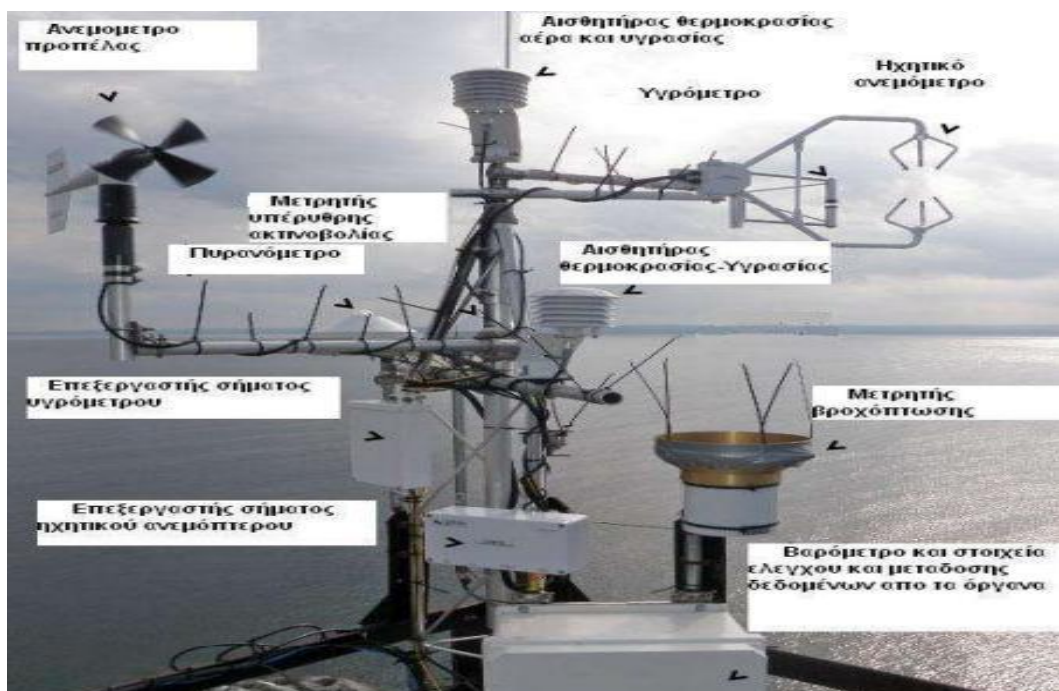
3. Αιολικό Δυναμικό – Χωροθέτηση Α/Γ.

Ο άνεμος δηλ. η κίνηση των αερίων μαζών εμπεριέχει ένα σημαντικό ποσό κινητικής ενέργειας που ονομάζεται αιολική ενέργεια την οποία μπορούν να εκμεταλλευθούν οι αιολικές μηχανές (Α/Γ). Οι βασικές παράμετροι ενδιαφέροντος του ανέμου είναι η ταχύτητα και η διεύθυνση του. Με βάση αυτές τις παραμέτρους γίνεται η μελέτη του αιολικού δυναμικού καθώς αυτές μεταβάλλονται στο χώρο και στο χρόνο.

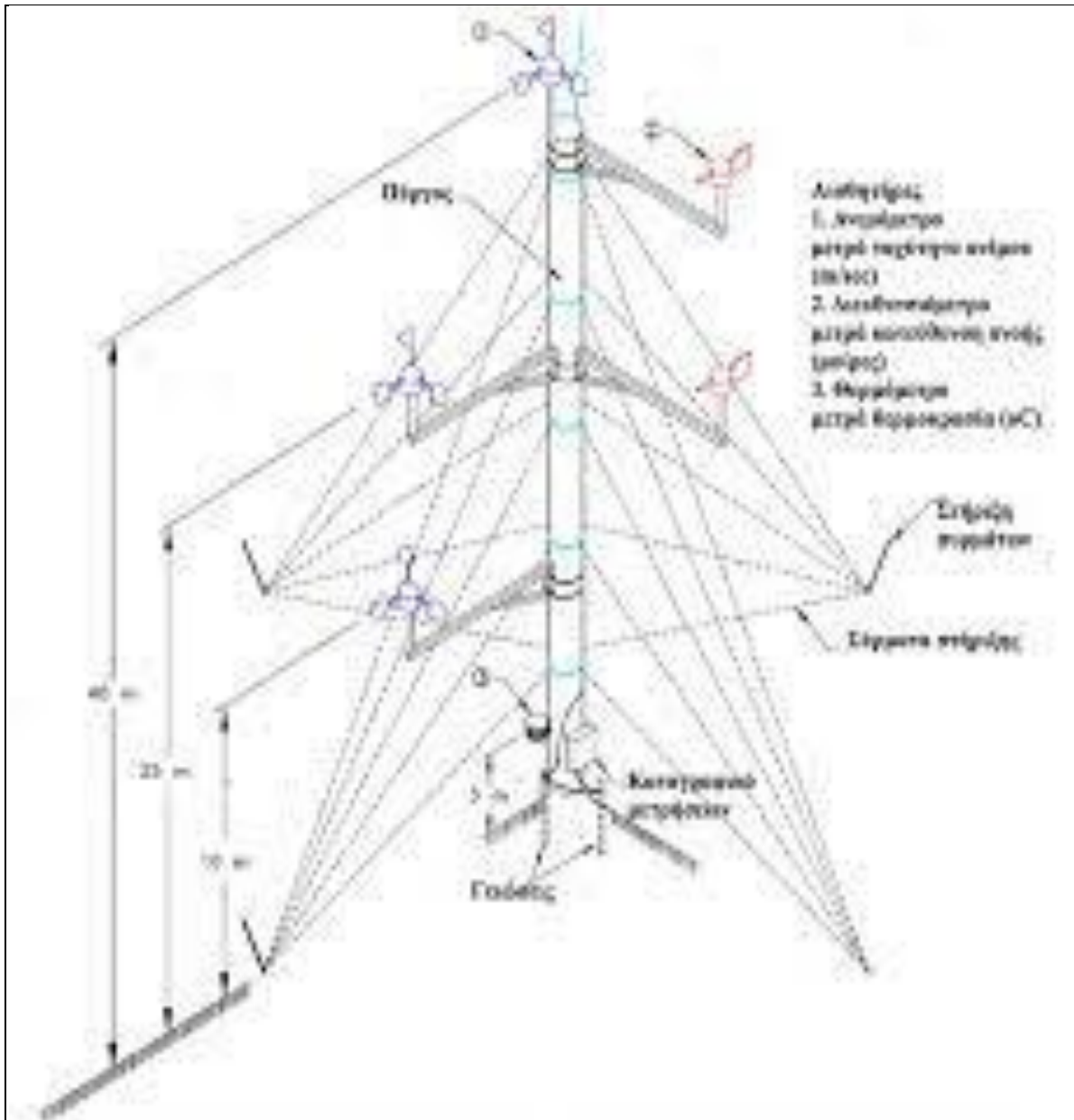
Με τον όρο Αιολικό Δυναμικό νοείται η ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα χρόνου που μπορεί να δεσμευτεί ανά μονάδα επιφάνειας που προσβάλλεται από τον άνεμο. Ο προσδιορισμός του αιολικού δυναμικού γίνεται σε ετήσια βάση με βάση την κατανομή της ταχύτητας (ένταση) του ανέμου, η οποία καθορίζεται όταν είναι δεδομένες οι ωριαίες τιμές της έντασης του ανέμου καθώς και η συχνότητα εμφάνισης τους στην διάρκεια του έτους. Έτσι η καταγραφή των απαραίτητων δεδομένων για τον προσδιορισμό το αιολικού δυναμικού γίνεται με μετρήσεις της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου με τη χρήση του μετεωρολογικού ιστού.

3.1 Μετεωρολογικά Δεδομένα.

Η μελέτη του αιολικού δυναμικού προϋποθέτει την εγκατάσταση ιστού και τη λήψη των ανεμολογικών στοιχείων μιας περιοχής. Υπάρχουν αρκετά λογισμικά – μοντέλα προσομοίωσης (WASP, WINDPRO) τα οποία προσφέρουν τα απαραίτητα στοιχεία και τον κατάλληλα διαμορφωμένο ψηφιακό χάρτη ώστε να υπολογιστεί ο αιολικός χάρτης μιας περιοχής. Η μέτρηση της έντασης και της κατεύθυνσης της ταχύτητας ανέμου αλλά και άλλων μετεωρολογικών χαρακτηριστικών, όπως θερμοκρασία και η ατμοσφαιρική πίεση, είναι απαραίτητη για την εξαγωγή του αιολικού δυναμικού.



Εικόνα 12: Μετεωρολογικός Σταθμός (Μαρνέλλος 2018).



Εικόνα 13: Μετεωρολογικός Ιστός ύψους 40m. (<http://www.aiolikigi.gr/el/e-learning/wind-potential-evaluation/>)

Η βέλτιστη επιλογή θέσης εγκατάστασης ενός αιολικού πάρκου σε σχέση με το αιολικό δυναμικό της περιοχής προϋποθέτει την επιλογή τοποθεσίας με:

- Υψηλή μέση ταχύτητα ανέμου,
- Αιολικό δυναμικό υψηλής ποιότητας, δηλαδή μεγάλης διάρκειας ισχυρών ανέμων και περιορισμένη ύπαρξη νηνεμίας
- Απουσία αποφράξεων του ανέμου καθώς και υψηλών εμποδίων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε μέρη τα όποια αποτελούν κορυφές λείων λόφων – ορέων με ελαφρές κατωφέρειες και ανοιχτό ορίζοντα καθώς και σε ανοιχτές πεδιάδες, ακρογιαλιές και σε ανοίγματα βουνών που δημιουργούνται φυσικοί επιταχυντές ανέμου.



3.2 Όργανα Μέτρησης Ισχύος του Ανέμου.

Η διερεύνηση για την ισχύ του ανέμου από αναφέρθηκε και παραπάνω με τη συγκέντρωση μετεωρολογικών κλιματικών δεδομένων και την εκτίμηση της μέσης ταχύτητας του ανέμου. Αυτό μπορεί πλέον να γίνει εύκολα με ένα σύνηθες ανεμόμετρο τύπου προπέλας το οποίο περιστρέφεται ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Σήμερα, υπάρχουν δύο πιο προηγμένα είδη ανεμόμετρων που χρησιμοποιούνται ευρέως στα σύγχρονα αιολικά συστήματα. Το πρώτο βασίζεται σε ηχητικές μετρήσεις και το άλλο βασίζεται στο φαινόμενο Doppler.

Τα ηχητικά ανεμόμετρα στέλνουν τρία ηχητικά κύματα υπερήχων στον χώρο μέτρησής τους κατόπιν μετρείται η απόκλιση του χρόνου με την οποία οι ήχοι φτάνουν σε αισθητήρες που διατάσσονται απέναντι του εκπομπού σε συγκεκριμένη τοπολογία. Δεδομένου ότι η ταχύτητα του ήχου αυξάνεται ή μειώνεται ανάλογα με το αν κινείται στη φορά του ανέμου ή αντίθετα από αυτήν, ο χρόνος απόκλισης καθιστά δυνατό τον υπολογισμό τόσο της ταχύτητας όσο και της κατεύθυνσης του ανέμου μέσω του οποίου διέρχεται ο ήχος. Για παράδειγμα, εάν ο άνεμος είναι ήρεμος, όλα τα ηχητικά κύματα φτάνουν στους τρεις αισθητήρες ταυτόχρονα. Μπορούν να συλλέξουν ταχέως μεταβαλλόμενα δεδομένα ανέμου σε πραγματικό χρόνο σε δύο ή και σε τρεις διαστάσεις, πράγμα που τα καθιστά κατάλληλα για μετρήσεις διαταραχών (τύρβης). Μπορούν να τοποθετηθούν σε μετεωρολογικούς σταθμούς καθώς και πάνω στην άτρακτο της Α/Γ. Με τον τρόπο αυτό υπάρχει on – line ενημέρωση και στροφή της ατράκτου άμεσα και σε πραγματικό χρόνο ώστε να λειτουργεί πιο αποδοτικά ως προς τη διεύθυνση και το μέγεθος του ανέμου που πνέει σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.

Τα ανεμόμετρα ακουστικής ηχοβόλισης (SONic Detection And Ranging- SODAR) μεταδίδουν ηχητικούς «παλμούς» στον αέρα. Το χρονικό διάστημα μεταξύ του οποίου ένας παλμός χρειάζεται για να αναπηδήσει στα ατμοσφαιρικά σωματίδια και να επιστρέψει πίσω σε έναν δέκτη παρέχει πληροφορίες σχετικά με το υψόμετρο στο οποίο βρίσκονται τα σωματίδια που ανακλούν τους παλμούς. Εάν τα σωματίδια κινούνται, η κίνηση αυτή θα ανιχνευθεί από το φαινόμενο Doppler της αλλαγής της συχνότητας στα λαμβανόμενα σήματα. Με την εγκατάσταση τριών ηχητικών κώνων πάνω από τον πομπό, μια ανάλυση του διανύσματος των σημάτων καθιστά δυνατό τον υπολογισμό της οριζόντιας και της κατακόρυφης ταχύτητας του ανέμου, καθώς και της κατεύθυνσής του. Τα συστήματα σκόπευσης και ανίχνευσης φωτός (Light Detection And Ranging – LIDAR) είναι παρόμοια με τα SODAR, αλλά χρησιμοποιούν το φως αντί του ήχου.

Τα ανεμόμετρα SODAR και LIDAR είναι απολύτως χρήσιμα για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου σε υψόμετρα των μεγάλων ανεμογεννητριών, δηλαδή περίπου 50-200 m. Οι περισσότεροι μετεωρολογικοί σταθμοί επί των ποίων είναι συνήθως τοποθετημένα τα συμβατικά ανεμόμετρα σε ύψος μικρότερο από 60 m. Περισσότερες αναλυτικές πληροφορίες για τα όργανα μέτρησης ανεμολογικών δεδομένων δίνονται στην εργασία των Τόσκα και Μάρη (2022).



3.3 Θερμοκρασία και Υψόμετρο - Διόρθωση της Πυκνότητας Αέρα.

Όταν παρουσιάζονται δεδομένα αιολικής ενέργειας, σχεδόν πάντα θεωρείται ότι η πυκνότητα του αέρα είναι 1.225 kg/m^3 . Δηλαδή, γίνεται η παραδοχή ότι η θερμοκρασία του αέρα είναι $15 \text{ }^\circ\text{C}$ (59 F) και η πίεση είναι 1 atm (στο επίπεδο της θάλασσας). Η ισχύς είναι ανάλογη προς την πυκνότητα. Η πυκνότητα του αέρα, και κατά συνέπεια η ισχύς του ανέμου, εξαρτάται από την ατμοσφαιρική πίεση καθώς επίσης και από την θερμοκρασία. Αφού η πίεση του αέρα είναι συναρτήσε του υψόμετρου, είναι ορθότερη μια διόρθωση κατά ένα παράγοντα για την καλύτερη εκτίμηση της αιολικής ενέργειας σε περιοχές σε διάφορα υψόμετρα.

3.4 Μορφολογία Εδάφους.

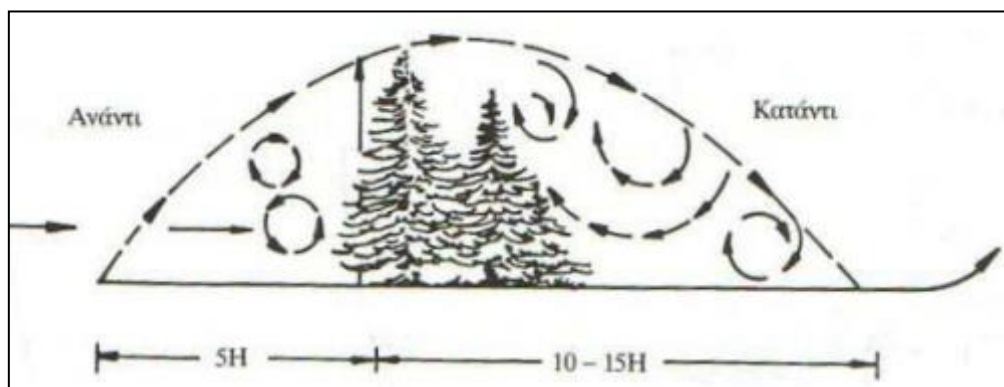
Είναι δυνατή η μη καλή λειτουργία μιας Α/Γ αν και έχει εγκατασταθεί σε περιοχή με υψηλό αιολικό δυναμικό. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν η Α/Γ λειτουργεί κάτω από έντονο μεταβαλλόμενο πεδίο ροής λόγω υψηλής τύρβης της περιοχής. Η τύρβη οφείλεται στην ύπαρξη μεμονωμένων κτηρίων ή άλλων εμποδίων άλλα και στην τραχύτητα του εδάφους. Έτσι προκειμένου σωστής χωροθέτησης μιας Α/Γ θα πρέπει να μελετηθούν δύο βασικές μορφολογικές κατηγορίες του εδάφους οι οποίες είναι:

- Η επίπεδη μορφολογία εδάφους.
- Η ανώμαλη μορφολογία εδάφους.

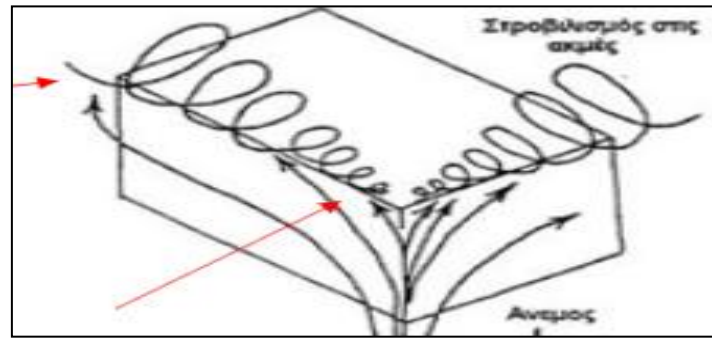
3.4.1 Επίπεδη Επιφάνεια Εδάφους.

Στην περίπτωση αυτή πρέπει να ελέγχεται η ύπαρξη τυχόν ανεμοφρακτών οι οποίοι προστατεύουν από τους δυνατούς ανέμους που επικρατούν. Τέτοιοι ανεμοφράκτες είναι συνήθως συστοιχίες δέντρων η παρουσία των οποίων έχει ως αποτέλεσμα τον μηδενισμό της ταχύτητας του ανέμου μέχρι και το ύψος της κορυφή τους, ενώ το οριακό στρώμα φαίνεται να αναπτύσσεται από το ύψος της κορυφής τους και κατόπιν όπως φαίνεται στην εικόνα παρακάτω.

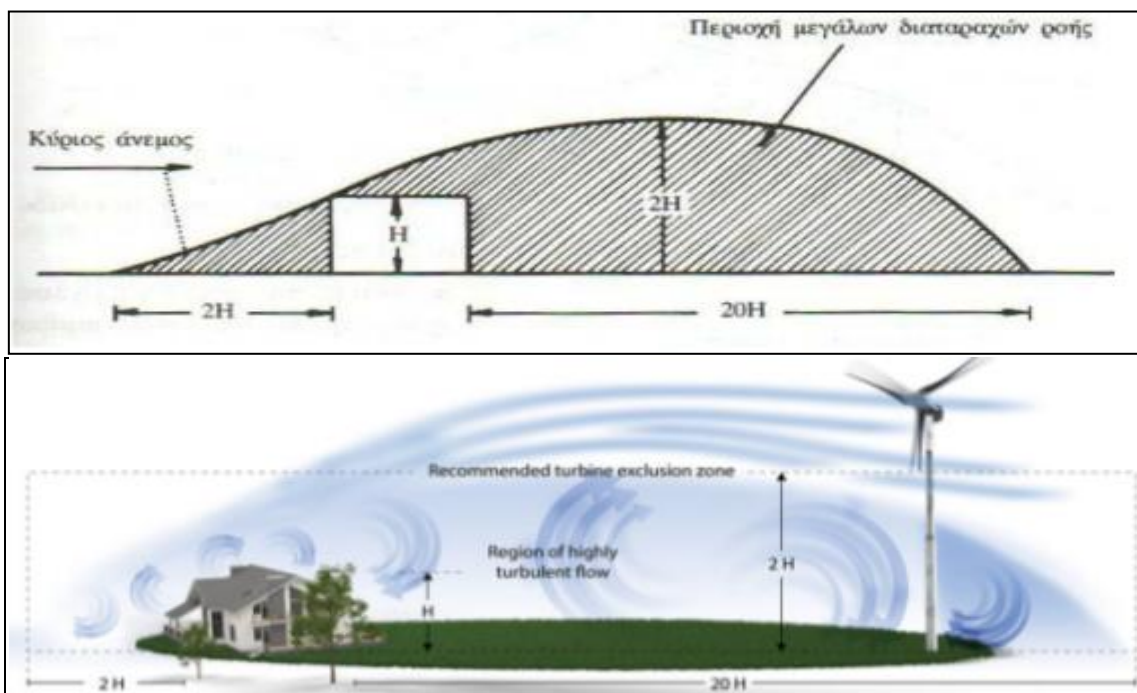
Επίσης ως ανεμοφράκτες μπορούν να λειτουργούν παρακείμενα κτήρια τα όποια αποτελούν και αυτά ένα είδος εμποδίων καθώς η παρουσία τους διαταράσσει σε σημαντική έκταση το πεδίο ροής του ανέμου. Επίπλεον οι οξείες γωνίες των κτηρίων αποτελούν την πηγή εκροής μεμονωμένων στροβίλων με αποτέλεσμα την πλήρη τροποποίηση των χαρακτηριστικών του ανέμου.



Εικόνα 14. Επίπεδο έδαφος με εμπόδια (Μάρης 2022) .



Εικόνα 15. Παράδειγμα προσπίπτουσας ροής ανέμου σε οξεία γωνία κτηρίου (Μάρης 2022) .



Εικόνα 16. Κτηριακό εμπόδιο στο ρεύμα αέρα (wiki) .

3.4.2 Ανώμαλη Επιφάνεια Εδάφους.

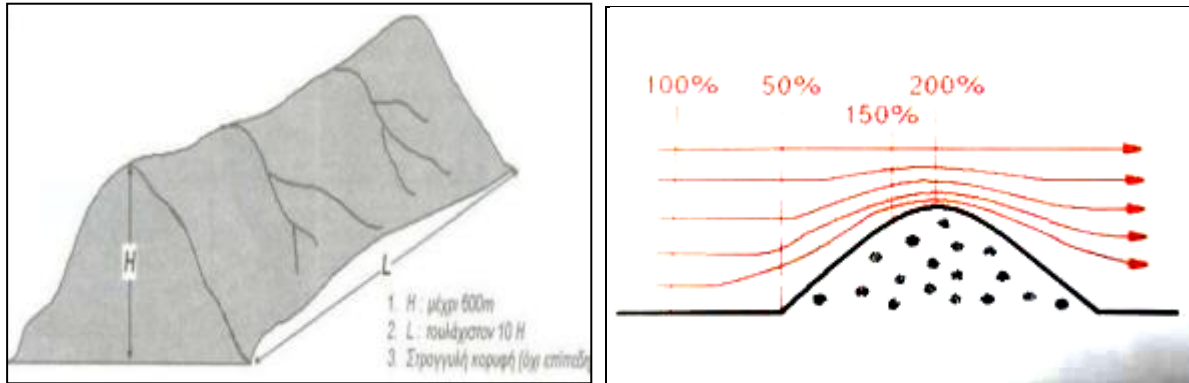
Στη συγκεκριμένη περίπτωση επειδή δεν υπάρχει σαφής τρόπος εξέτασης τέτοιου εδάφους επειδή κάθε περίπτωση είναι ξεχωριστή, ο τρόπος μελέτης είναι η δημιουργία ανάγλυφου της περιοχής μέσα σε αεροδυναμική σήραγγα ή με εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων. Παρόλα αυτά υπάρχουν κάποιες τοπογραφικές κατηγορίες σε αυτή την μορφολογία του εδάφους που μπορούν να τυποποιηθούν και να χρησιμοποιηθούν ως κατευθυντήρια γραμμή. Αυτές είναι:

➤ Λοφοσειρά

Εάν ο άνεμος έχει κάθετη κατεύθυνση προς την επιμήκη σειρά από λόφους αναγκάζεται να περάσει από πάνω με αποτέλεσμα την επιτάχυνση του (ροή ακροφυσίου). Επίσης στο σχήμα απεικονίζεται και η επιτάχυνση του ανέμου, όπου στην κορυφή έχουμε διπλασιασμό της ταχύτητας το οποίο συνεπάγεται περίπου οκταπλασιασμό της αποδιδόμενης ισχύος από την ανεμογεννήτρια. Εάν ο άνεμος



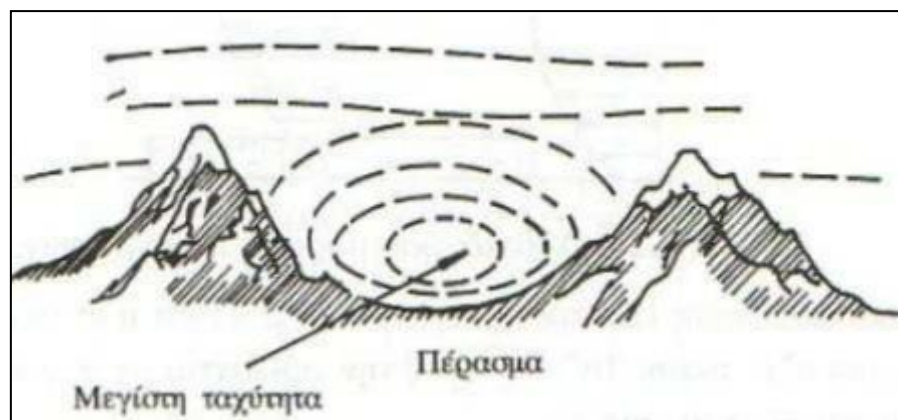
δεν φυσάει στην κάθετη κατεύθυνση αντί να περάσει από πάνω, θα περάσει κυρίως από τα πλάγια. Αποτελέσματα μελετών έδειξαν ότι η ιδανική λοφοσειρά είναι αυτή που παρουσιάζει κλίση 16° ως προς το οριζόντιο επίπεδο, ενώ λιγότερο ικανοποιητική με πολύ μικρή κλίση των 3° . Σε χώρες όπως η Ελλάδα, με έντονο ανάγλυφο τα αιολικά πάρκα στήνονται κατά κύριο λόγο σε κορυφογραμμές και λίγο πριν από αυτές προς την μεριά που πνέουν οι άνεμοι. Μελέτες επίσης έδειξαν ότι κατάλληλα μέρη για την εγκατάσταση συστήματος ανεμογεννητριών είναι η επιμήκης σειρά από λόφους ύψους 100-600μ και διεύθυνση άξονα παράλληλη προς αυτή της ακτογραμμής.



Εικόνα 17. Παράδειγμα τυπικής λοφοσειράς – Κατανομή ταχύτητας ανέμου πάνω από λόφο.

➤ **Περάσματα και Διάσελα**

Πολύ καλή θέση για τοποθέτηση ανεμοκινητήρων είναι τα περάσματα και τα διάσελα ειδικά αν η ροή του ανέμου είναι τέτοια ώστε να διέρχεται μέσα από το άνοιγμα. Οι θέσεις αυτές είναι εύκολες ως προς την πρόσβαση τους και προσφέρουν ιδανικές υψηλές ταχύτητες ανέμου. Οι θέσεις αυτές αρχικά εξετάζονται για το αν είναι δυνατή η τοποθέτηση του ανεμοκινητήρα και στην συνέχεια στο εργαστήριο γίνεται λεπτομερής μελέτη σε ομοίωμα μέσα σε αεροδυναμική σήραγγα. Όσο πιο ψηλά είναι τα βουνά που δημιουργούν το πέρασμα τόσο πιο ευνοϊκή είναι η θέση και όσο πιο ομαλή είναι η επιφάνεια του εδάφους του περάσματος τόσο καλύτερη είναι η ενεργειακή απόδοση του ανεμοκινητήρα.



Εικόνα 18. Παράδειγμα τύπου περασμάτων και διάσελων (Μάρης 2022).



➤ Υψίπεδα

Παρόλο που τα υψίπεδα παρέχουν καλύτερες συνθήκες στην κατασκευή της εγκατάστασης ενός αιολικού συστήματος, δεν είναι κατάλληλα όσο αναφορά το αιολικό δυναμικό. Η μείωση της ταχύτητας είναι αρκετά μεγάλη και για να ξεπεράσουμε το πρόβλημα αυτό πρέπει να βάλουμε μια ανεμογεννήτρια με πάρα πολύ ψηλό πυλώνα για να δέχεται ο ρότορας «καθαρό» αέρα.



Εικόνα 19: Κατανομή ταχύτητας πάνω από υψίπεδο.

3.4 Τύρβη – Τραχύτητα Εδάφους - Διάτμηση.

Η ανάπτυξη τύρβης αποτελεί απρόβλεπτο καιρικό φαινόμενο που επιδρά πολύ σημαντικά στη λειτουργία των Α/Γ. Οι επαγόμενοι στροβιλισμοί – δίνες που δημιουργούνται προκαλούν διακυμάνσεις στη μηχανική φόρτιση (μηχανική κόπωση) των Α/Γ. Η κόπωση των εξαρτημάτων μιας ανεμογεννήτριας, όπως τα πτερύγια ή ο πύργος προέρχεται από την αεροδυναμική δύναμη στα πτερύγια του ρότορα. Κατά τους, Η υψηλή τύρβη εξαρτάται τόσο από την τραχύτητα του εδάφους μιας περιοχής, όσο και από τους υπόλοιπους ατμοσφαιρικούς παράγοντες. Γενικά τα Α/Π είναι προτιμότερο να εγκαθίστανται σε περιοχές με ελάχιστη τύρβη. (Τόσκας – Μάρης 2022).

Πίνακας 3.1 Μήκος τραχύτητας για διάφορους τύπους εδαφών (Τόσκας – Μάρης 2022).

Είδος εδάφους	Μήκος τραχύτητας(z_0)
Θάλασσα	0,0001
Πεδιάδα	0,05
Ύπαιθρο (κτίρια, θάμνοι)	0,2
Ύπαιθρο (δάση, ψηλά δέντρα)	0,8

Στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας και κοντά στην επιφάνεια της γης, οι ταχύτητες του ανέμου δέχονται μεγάλες μεταβολές λόγω της τριβής. Όσο πιο έντονη η τραχύτητα της επιφάνειας, τόσο μεγαλύτερη η επιβράδυνση του ανέμου. Αυξημένη τραχύτητα οδηγεί σε υψηλά επίπεδα τριβής. Τα δάση αλλά και τα ψηλά κτίρια των πόλεων επιβραδύνουν σημαντικά τον άνεμο, ενώ οι επιφάνεια της θάλασσας υπό συνθήκες (απουσία ισχυρών κυματισμών) έχει μικρότερη επίδραση στον άνεμο, σε αντίθεση με το ψηλό γρασίδι, τους θάμνους και τις καλλιέργειες στη στεριά.



Γενικότερα το γεωγραφικό ανάγλυφο μιας περιοχής και οι εναλλαγές κλίσεων του εδάφους επιδρούν στο μικροκλίμα και την ένταση τοπικών ανέμων μιας περιοχής. Επίσης η διάτμηση του ανέμου συνδέεται με την μεταβολή της ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου. Μπορεί να συμβαίνει σε όποια διεύθυνση και σχετίζεται με πιθανές έντονες θερμοκρασιακές μεταβολές της πυκνότητας (Τόσκας 2022).

3.5 Χωροθέτηση Α/Γ.

Η ορθή χωροθέτηση των Α/Γ ενός Α/Π είναι πολύ σημαντικός παράγοντας για την όσο το δυνατό μεγαλύτερη εκμετάλλευση της προσφερόμενης αιολικής ενέργειας. Έτσι π.χ Α/Γ που θα είναι τοποθετημένες σε πολύ κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους θα έχουν ως αποτέλεσμα παρεμβολές και υποβάθμιση της ενέργειας του ανέμου στις Α/Γ. Καθώς ενέργεια εξάγεται από τους δρομείς, ο άνεμος επιβραδύνεται και μειώνεται η διαθέσιμη ισχύς που δέχονται οι πίσω μηχανές. Μετά από μια ορισμένη απόσταση περίπου δέκα διαμέτρων δρομέα πίσω από μια Α/Γ, η ταχύτητα του ανέμου θεωρείται ότι μπορεί να ανακτήσει σχεδόν την αρχική τιμή της, το οποίο σημαίνει πως μια άλλη σειρά Α/Γ θα μπορούσε να εγκατασταθεί. Ανάλογα με την απόσταση μεταξύ των δρομέων, οι απώλειες από μια σειρά σε μια άλλη πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

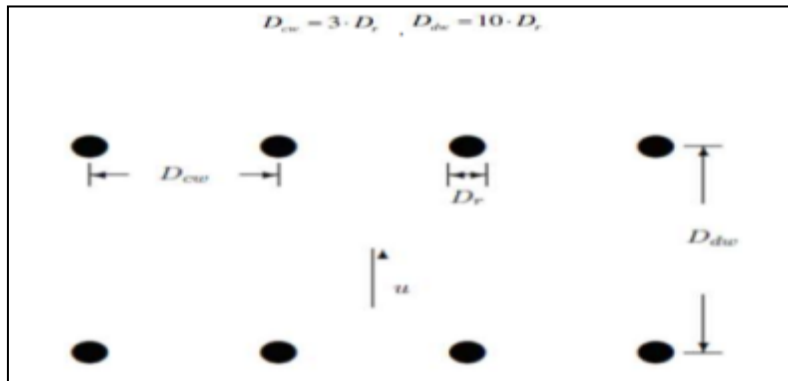
Στην πραγματικότητα, για ένα Α/Π απαιτείται αξιολόγηση των διευθύνσεων του ανέμου που επικρατούν, οι εκτιμήσεις των ανωμαλιών του εδάφους, οι δρόμοι πρόσβασης, οι εγκαταστάσεις μεταφοράς ενέργειας και σύνδεσης με το δίκτυο, οι τρέχουσες και προβλεπόμενες χρήσεις της γης για τις περιοχές μεταξύ των πύργων, κ.τ.λ. Αυτοί οι περιορισμοί, τουλάχιστον για επίγεια – χερσαία έργα, συχνά οδηγούν σε μακρές σειρές Α/Γ ή σε συμπλέγματα εγκαταστημένα άτακτα, δηλαδή χωρίς σειρές και στήλες. Όταν έχουν εγκατασταθεί κατάλληλα σε σειρές και στήλες, η απόσταση κατά μήκος μιας γραμμής κάθετα προς τους ανέμους είναι συχνά της τάξης των πέντε διαμέτρων του δρομέα, ενώ η απόσταση μεταξύ των σειρών είναι μεγαλύτερη των 10 διαμέτρων. Οπότε η διάταξη αυτή περιγράφεται ως μια 5D*10D διάταξη.

Υπάρχουν πολλά οικονομικά οφέλη όταν οι Α/Γ τοποθετούνται σε ομάδες – συστάδες οι οποίες συναποτελούν ένα αιολικό πάρκο, καθώς η συλλογή της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να γίνει αποτελεσματικά σε μεγάλο βαθμό. Παρόλα αυτά υπάρχουν συγκεκριμένες πληροφορίες που πρέπει να εφαρμόζονται με αυστηρούς κανόνες όσον αφορά τις αποστάσεις μεταξύ ανεμογεννητριών.

Συγκεκριμένα η ελαχίστη απόσταση που θα πρέπει να έχουν οι Α/Γ εντός μιας συστοιχίας (D_{cw}) είναι τουλάχιστον τρεις φορές την διάμετρο της πτερωτής. Δηλαδή για Α/Γ με διάμετρο δρομέα (πτερωτής) 90m, η απόσταση μεταξύ αυτής και μιας γειτονικής θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 270 μέτρα. Αναφορικά με την απόσταση άμεσα σε συστοιχίες μηχανών Α/Γ (D_{dw}) θα πρέπει να είναι τουλάχιστον δέκα φορές την διάμετρο της πτερωτής. Τέλος λαμβάνεται υπόψη και ότι η απαιτούμενη επιφάνεια για μια ολοκληρωμένη Α/Γ είναι περίπου 120 m² καθώς η βάση της έχει διάμετρο 15 μέτρα και πάχος τοιχώματος 2.4 μέτρα.



Υπενθυμίζεται ότι πολύ σημαντικός παράγοντας για τη χωροθέτηση των Α/Γ είναι το ροδόγραμμα άνεμου της περιοχής ώστε να είναι γνωστή η επικρατούσα διεύθυνση του άνεμου καθώς και η διάρκεια πνοής του άνεμου από κάθε κατεύθυνση. Παρακάτω δίνονται οι αποστάσεις των ανεμογεννητριών που αναφέρθηκαν παραπάνω και σε σχηματική απεικόνιση καθώς και των τύπων που θεωρούνται.



Εικόνα 20: Θεωρητικές Αποστάσεις μεταξύ Α/Γ (Ασλάνης Κυριακόπουλος 2020).

Αναλυτικοί υπολογισμοί αποστάσεων διεύθυνσης Α/Γ γίνονται σε άλλες εργασίες (Ασλάνης Κυριακόπουλος 2020, Ασπρωμάλης Ροϊδής 2020). Γενικά για τα Α/Π ένας πρακτικός κανόνας για την έκτασή τους είναι 100 στρέμματα ανά εγκατεστημένο MW, με μεγαλύτερο μέρος αυτής της έκτασης να χρησιμοποιείται και για άλλες δραστηριότητες όπως βοσκή, καλλιέργεια κτλ δεδομένου ότι γενικά δεν περιφράσσονται.



Εικόνα 21: Χερσαίο Α/Π με στοιχισμένες Α/Γ.



Εικόνα 22: Χερσαίο Α/Π με άτακτη διάταξη Α/Γ (Παναχαϊκό) .



Εικόνα 23 Χερσαίο αιολικό πάρκο με άτακτη διάταξη των ανεμογεννητριών.

3.5 Ταξινόμηση Α/Π κατά IEC.

Οι προδιαγραφές των Α/Γ αναφέρονται σε δεδομένα σχετικά με την καμπύλη ισχύος, ως προς τα προφίλ του ανέμου για τα οποία οι ανεμογεννήτριες έχουν σχεδιαστεί να αντέξουν. Η σειρά προτύπων IEC 61400 καλύπτει ένα μεγάλο φάσμα θεμάτων ασφάλειας και απόδοσης για τη βιομηχανία της αιολικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων θεμάτων όπως τα μηχανικά φορτία, η ακουστική, η ποιότητα ισχύος, η ασφάλεια κατασκευών κ.τ.λ. Οι Α/Γ καλύπτουν τα πρότυπα IEC μέσα σε ένα συγκεκριμένο σύστημα ταξινόμησης που βασίζεται στη μέση ταχύτητα του ανέμου, στις ακραίες ταχύτητες και στις ριπές του ανέμου των τελευταίων 50 ετών και στην ένταση της διαταραχής (τύρβης), η οποία είναι ο λόγος της τυπικής απόκλισης της ταχύτητας του ανέμου προς τη μέση ταχύτητα των 10min.

Οι κατασκευάστριες εταιρίες Α/Γ προσφέρουν συνήθως διαφορετικά μοντέλα ανεμογεννητριών που έχουν σχεδιαστεί για διαφορετικά ύψη ατράκτου καλύπτοντας διαφορετικές προδιαγραφές κατά IEC. Για παράδειγμα, τα φορτία σχεδιασμού για μία ανεμογεννήτρια IEC Κατηγορίας IIA θα είναι υψηλότερα από εκείνα για ένα παρόμοιο μοντέλο σχεδιασμένο για λιγότερο απαιτητικές συνθήκες Κατηγορίας IIIB. Μια Α/Γ IIIB ενδέχεται να έχει την ίδια γεννήτρια αλλά με μεγαλύτερο δρομέα, το οποίο σημαίνει ότι θα έχει υψηλότερο συντελεστή χωρητικότητας (capacitor factor – CF) και θα παρέχει περισσότερη ενέργεια.

Προφανώς η εγκατάσταση ενός Α/Π σε μια περιοχή με σημαντικό αιολικό δυναμικό θα αποδίδει υψηλότερα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας. Οι παράγοντες που οδηγούν στην εγκατάσταση ενός Α/Π είναι οικονομοτεχνικοί καταρχήν το μειωμένο κόστος ανάπτυξης της τοποθεσίας, οι απλοποιημένες συνδέσεις σε γραμμές μεταφοράς, η εύκολη πρόσβαση για τον έλεγχο λειτουργίας και τη συντήρηση των Α/Γ.

3.6 Χερσαίο Αιολικό Δυναμικό.

Το βασικό ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί είναι επάρκεια του αιολικού δυναμικού, που θα μπορεί να ικανοποιεί τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και η επάρκεια εκτάσεων που θα απαιτηθούν. Στην πρωτοπορία βρέθηκαν οι ΗΠΑ από πολύ νωρίς



που με τον οργανισμό Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (National Renewable Energy Laboratory – NREL) προχώρησαν στη χαρτογράφηση αιολικού δυναμικού στις ΗΠΑ από την δεκαετία του 1980. Με τον τρόπο αυτό το NREL έχει επιχειρήσει να εκτιμήσει το συνολικό αιολικό δυναμικό της χώρας σε εδάφη εκτός των ζωνών άγριας φύσης, των πάρκων, των αστικών περιοχών, και άλλων περιοχών που δεν είναι δυνατόν να γίνει ανάπτυξη Α/Π. Για τη σωστή οργάνωση της μελέτης των διαθέσιμων εδαφών οι ερευνητές του NREL προχώρησαν σε διαχωρισμό μεταξύ άμεσων και έμμεσων χρήσεων της γης.



Εικόνα 24: Α/Γ από το Α/Π Παναχαικού (Ασπρομάλης Ροΐδης 2020).

Οι άμεσες χρήσεις της γης αφορούν μόνιμες παρεμβάσεις, όπως δρόμοι πρόσβασης και βάσεις θεμελίωσης των γεννητριών, τα οποία θα παραμείνουν κατά το κύκλο ζωής του έργου, καθώς επίσης και περιοχές που επηρεάζονται κατά τη διάρκεια της κατασκευής του έργου, αλλά οι οποίες μπορούν να μετατραπούν σε άλλες χρήσεις μετά την ολοκλήρωσή του. Ως περιοχές έμμεσης χρήσης γης χαρακτηρίζονται εκείνες που απαιτούνται για τη σύνδεση των γεννητριών με άλλους χώρους γύρω από τα πάρκα. Οι περιοχές αυτές δεν περιλαμβάνουν την απαραίτητη απόσταση μεταξύ των γεννητριών, η οποία μπορεί να είναι της τάξης των 5-10 διαμέτρων δρομέα μεταξύ των πύργων, ανάλογα με τη διάταξη, μαζί με άλλους χώρους γύρω από τα πάρκα.

Συνήθως λιγότερο από το 1% της συνολικής επιφάνειας του Α/Π καταλαμβάνεται από τις θεμελιώσεις των Α/Γ, από δρόμους και άλλες μόνιμες δεσμεύσεις της γης. Η ίδια η συστοιχία των γεννητριών καλύπτει περίπου το ένα τρίτο της συνολικής έκτασης του Α/Π, ενώ τα υπόλοιπα δύο τρίτα είναι ουδέτερες ζώνες. Έτσι συνήθως με το 99% της συνολικής επιφάνειας του Α/Π να είναι εν δυνάμει διαθέσιμο για συμβατική γεωργία ή κτηνοτροφία, οι ευκαιρίες για αμοιβαία χρήση της γης είναι άφθονες. Οι αγρότες είναι πιθανό να θέλουν να διατηρούν και να εκμεταλλεύονται ένα αιολικό πάρκο, αλλά μπορούν να εξασφαλίσουν σημαντικές ροές εσόδων από τη μίσθωση της γης τους σε έναν επενδυτή Α/Π. Οι ετήσιες πληρωμές μπορεί να υπολογίζονται πιο ορθολογικά ανά Α/Γ ή σύμφωνα με τα έσοδα από τις παραγόμενες MWh ενέργειας.



Τα Α/Π μπορούν σε πεδινές περιοχές να συνυπάρχουν με τις καλλιέργειες εδαφών δηλ. με τη συμβατική γεωργία, κυρίως με την εκτροφή βοοειδών, και τα προστιθέμενα έσοδα που μπορεί να λάβει ένας γεωργός από τη μίσθωση της γης σε έναν ιδιοκτήτη Α/Π μπορεί να είναι μεγαλύτερα από την αξία της συγκομιδής των γεωργικών προϊόντων από την ίδια τη γη. Ως αποτέλεσμα, οι κτηνοτρόφοι και οι αγρότες μπορεί να γίνουν οι μεγαλύτεροι υποστηρικτές της αιολικής ενέργειας, δεδομένου ότι τους βοηθά να αποκομίζουν κέρδη παραμένοντας στην κύρια δραστηριότητά τους.

3.7 Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα.

Παρόλο που τα χερσαία αιολικά πάρκα ήταν η μεγαλύτερη πηγή αιολικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο, η μικρή στις μέρες μας αλλά γρήγορα αναπτυσσόμενη υπεράκτια αγορά παρουσιάζει σημαντικές δυνατότητες για το μέλλον. Τα πλεονεκτήματα στην υπεράκτια αιολική ενέργεια περιλαμβάνουν την εγγύτητα σε μεγάλα παράκτια μητροπολιτικά κέντρα φορτίου, ώστε να μπορεί να αποφευχθεί το κόστος μεταφοράς. Για παράδειγμα, πάνω από το μισό πληθυσμού των ΗΠΑ ζουν σε περιοχές κοντά σε ωκεανούς ή σε μεγάλες λίμνες, και πολιτείες με παράκτια σύνορα χρησιμοποιούν τα τρία τέταρτα της ηλεκτρικής ενέργειας των ΗΠΑ.

Επιπλέον, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας συνήθως τείνει να είναι υψηλότερη στις παράκτιες περιοχές, γι' αυτό το λόγο η αιολική ενέργεια έχει ένα ανταγωνιστικό πλεονέκτημα. Οι υπεράκτιοι άνεμοι τείνουν επίσης να είναι ισχυρότεροι, σταθερότεροι και λιγότερο τυρβώδεις, και συχνά πνέουν το απόγευμα, όταν η ισχύς είναι πολύτιμη. Εάν οι ανεμογεννήτριες είναι τοποθετημένες αρκετά μακριά από την ακτή, η οπτική όχληση και ο θόρυβος αποτελούν μικρότερα προβλήματα σε σύγκριση με τα επίγεια αιολικά πάρκα. Από τη άλλη μεριά, το θαλάσσιο περιβάλλον είναι πολύ πιο απαιτητικό, η πρόσβαση για συντήρηση είναι αρκετά δύσκολη, και τα κόστη είναι σημαντικά υψηλότερα συγκριτικά με αυτά των χερσαίων εγκαταστάσεων. Το NREL (Musial & Ram, 2010), για παράδειγμα, υποστηρίζει ότι το σταθμισμένο κόστος της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας είναι περίπου διπλάσιο από αυτό των χερσαίων αιολικών πάρκων.



Εικόνα 25: Υπεράκτια Α/Π.

Η οικοδόμηση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων εξαρτάται όχι μόνο από την ταχύτητα του ανέμου, αλλά και από το βάθος του νερού και την απόσταση από την ακτή. Πιο μικρούς περιορισμούς αποτελούν τα κύματα, τα ρεύματα του ωκεανού, η ένταση των καταιγίδων, καθώς και η πιθανότητα το πάρκο να παρεμβείνει στις



θαλάσσιες οδούς και στα παραδοσιακά αλιευτικά πεδία. Συνηθέστερα τα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι σε ύδατα βάθους μικρότερου από 30 μέτρα, το οποίο επιτρέπει σε μεμονωμένες ανεμογεννήτριες να στηριχτούν σε έναν πύργο, ο οποίος υποστηρίζεται από έναν μόνο χαλύβδινο πύργο που καταλήγει βαθιά στον πυθμένα της θάλασσας. Σε αυτά τα ρηχά ύδατα χρησιμοποιείται επίσης προεντεταμένο σκυρόδεμα για βάρος στη βάση. Αυτά που αναφέρονται ως μεταβατικά ύδατα, βάθους 30-60 m, έχουν δομές παρόμοιες με εκείνες που αναπτύχθηκαν από τη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου με περίβλημα (πλέγμα), όπως επίσης χρησιμοποιούν πολλές εκδόσεις της μονοπασάλου υποδομής και είναι αποσυνδεδεμένες από τον πυθμένα.



Εικόνα 26 Τρόποι υποθαλάσσιας έδρασης.

Δεν είναι μόνο το βάθος του νερού ένα σοβαρό ζήτημα, είναι και η απόσταση από την ακτή που δημιουργεί πρόβλημα στον σχεδιασμό. Για να μειώσουμε τις απώλειες μεταφοράς, σε κάθε πύργο τοποθετούνται μετασχηματιστές και διακόπτες που μετατρέπουν την τάση της γεννήτριας από περίπου 690 V σε 30-36kV. Για σχετικά μικρές εγκαταστάσεις που βρίσκονται σε απόσταση περίπου 30 χιλιομέτρων από την ακτή, η τάση είναι αρκετή και επιτρέπει να συνδεθούν σειρές γεννητριών με πολλά υποθαλάσσια καλώδια εναλλασσόμενου ρεύματος απευθείας με τον υποσταθμό που βρίσκεται στην ξηρά. Για μεγαλύτερες όμως συστοιχίες και μεγαλύτερες αποστάσεις, αυτές οι σειρές ενώνονται με υπεράκτιους μετασχηματιστές που ανυψώνουν την τάση συνήθως από τα 33 kV στα 132 kV.

Η μεταφορά από υπεράκτιους μετασχηματιστές σε υποσταθμούς στην ξηρά γίνεται με υποβρύχια τριφασικά καλώδια. Εφόσον αυτοί οι μεμονωμένοι αγωγοί σε αυτά τα καλώδια είναι τόσο κοντά μεταξύ τους, έχουν πολύ μεγάλη συμφύη παράλληλη χωρητικότητα από ότι συνήθεις εναέριες γραμμές μεταφοράς στην ξηρά. Ενώ οι εναέριες γραμμές είναι εκ φύσεως επαγωγικές και ως εκ τούτου απορροφούν άεργο ισχύ, τα υποβρύχια τριφασικά καλώδια δημιουργούν άεργο ισχύ (VAR). Για να αντισταθμιστεί, χρειάζεται ειδικός εξοπλισμός αντιστάθμισης άεργου ισχύος, ο οποίος απαιτείται τόσο για την υπεράκτια πλατφόρμα όσο και για τον υποσταθμό στην ξηρά. Τα υποθαλάσσια τριφασικά καλώδια λειτουργούν συχνά ως επιμήκεις πυκνωτές, οι οποίοι πρέπει να φορτιστούν και να αποφορτιστούν σε κάθε κύκλο. Αυτό το ρεύμα



φόρτισης μειώνει το πραγματικό ρεύμα που μπορεί να διανεμηθεί σε φορτία, το οποίο σημαίνει ότι υπάρχουν όρια στο μήκος των υποβρύχιων καλωδίων.

Για τα μεγάλα αιολικά πάρκα που βρίσκονται μακρύτερα από τα 50 km ανοικτά της θάλασσας, η μεταφορά με υψηλή τάση DC (high voltage DC transmission – HVDC) αποτελεί βιώσιμη επιλογή, ενώ πέρα από τα 100 km είναι η μόνη επιλογή. Αυτό σημαίνει ότι ένας υπεράκτιος μετατροπέας AC σε DC είναι απαραίτητος μαζί με έναν χερσαίο αντιστροφέα DC σε AC για να συνδεθεί στον υποσταθμό στην ξηρά. Ενώ αυτός ο επιπλέον εξοπλισμός αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος και το κόστος, υπάρχουν μερικά εγγενή πλεονεκτήματα στη μεταφορά DC. Καταρχήν επιτρέπει στις ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας να συνδέονται με το δίκτυο σταθερής συχνότητας. Επίσης, μειώνει τις απώλειες μεταφοράς σε σχεδόν αμελητέα ποσότητα ακόμη και για μεγάλες αποστάσεις. Ακόμη, δεδομένου ότι τα καλώδια μπορούν να μεταφέρουν περισσότερο DC από AC, τα καλώδια τώρα χρησιμοποιούνται για ένα μεσαίου μεγέθους αιολικό πάρκο AC, αλλά στο μέλλον θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για ένα πολύ μεγαλύτερο αιολικό πάρκο με την προσθήκη ενός μετατροπέα. Τέλος, τα ηλεκτρονικά ισχύος στους μετατροπέες επιτρέπουν μεγαλύτερο έλεγχο της ενεργού και της άεργου ισχύος, όπως γίνεται και στις συμβατικές σύγχρονες γεννήτριες που τροφοδοτούνται από ατμοστρόβιλους.

3.7 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις Α/Γ.

Τα Α/Π έχουν αρνητικές και θετικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Οι αρνητικές αφορούν:

- Θανάτους πουλιών
- Θόρυβο
- Έργα πολιτικού μηχανικού
- Αισθητικές επιπτώσεις και
- Ρύπανση που συνδέεται με την αρχική ενέργεια για την κατασκευή των γεννητριών.

Έχει παρατηρηθεί ότι πουλιά συγκρούονται με Α/Γ, όπως συμβαίνει με αυτοκίνητα, πύργους κινητής τηλεφωνίας, γυάλινα παράθυρα και γραμμές υψηλής τάσης. Ωστόσο οι θάνατοι των πουλιών που προκαλούνται από τις Α/Γ είναι σημαντικά λιγότεροι ως προς άλλα εμπόδια. Μελέτες έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι τα πουλιά προσαρμόζουν τις περισσότερες των περιπτώσεων τις διαδρομές που ακολουθούν, πολύ πριν συναντήσουν μια Α/Γ, και έτσι το ποσοστό των θανάτων που έχουν αναφερθεί είναι μικρό. Παλαιότερα υπήρξαν αρκετές αναφορές για θανάτους πουλιών, όταν μια ολόκληρη σειρά από γρήγορα περιστρεφόμενες Α/Γ εμπόδισαν το πέρασμά τους, αλλά πλέον η περιστροφή των σύγχρονων μεγάλων ανεμογεννητριών είναι τόσο αργή, ώστε τα πουλιά πλέον μπορούν εύκολα να τις αποφεύγουν. Πειράματα σε υπεράκτια Α/Π στη Δανία έφθασαν στο συμπέρασμα ότι οι πάπιες αποφεύγουν τις ανεμογεννήτριες, ακόμα και στην περίπτωση που χρησιμοποιήθηκαν δολώματα για την προσέλκυση τους στην γύρω περιοχή (Ασπρομάλης Ροΐδης 2020).

Η αντίληψη των ανθρώπων για την αισθητική των Α/Π είναι η πιο σημαντική για την τοποθέτηση των μηχανών. Η τακτοποίηση των Α/Γ ίδιου μεγέθους σε ενιαίες γραμμές



και στήλες, και ο μικρότερος ρυθμός περιστροφής των πτερυγίων φαίνεται ότι δεν αποσπούν τόσο την προσοχή του ανθρώπινου ματιού. Ένα άλλο αμφισβητούμενο φαινόμενο είναι ο θόρυβος κατά τη λειτουργία των Α/Γ, ειδικά όταν αυτές συνιστούν ένα Α/Π. Ο θόρυβος που προκαλείται με την περιστροφή των πτερυγίων λόγω της κίνησης του αέρα είναι μεγαλύτερος από τον θόρυβο κατά την λειτουργία της γεννήτριας. Σε αρκετά μικρή απόσταση μακριά από μια Α/Γ, το επίπεδο του ήχου είναι συγκρίσιμο με το θρόισμα των φύλλων ενός δέντρου.

Στις θετικές επιπτώσεις συμπεριλαμβάνεται η υποκατάσταση άλλων ρυπογόνων ενεργειακών συστημάτων, συμβατικών όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Ίσως το μοναδικό αλλά μεγάλης αξίας πλεονεκτήματα της ηλεκτροπαραγωγής από Α/Π είναι η σχεδόν μηδενική εκπομπή ρύπων πτητικών οργανικών ενώσεων σε σύγκριση με την καύση ορυκτών καυσίμων. Συνακόλουθα και με το δεδομένο ότι δεν υπάρχουν σχεδόν καθόλου εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η λειτουργία των Α/Π μπορεί να αποβεί ευεργετική ως προς το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής και της αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη.



4. Στοιχεία Αεροδυναμικής της Α/Γ.

Η παραγωγή ισχύος της Α/Γ εξαρτάται από την αλληλεπίδραση μεταξύ του ρότορα και του ανέμου. Ο άνεμος μπορεί να θεωρηθεί ως η υπέρθεση ενός μέσου ανέμου στον οποίο προστίθενται κάποιες διακυμάνσεις που επιφέρουν τον τυρβώδη χαρακτήρα της ροής. Κατά τον Maxwell η εμπειρία έχει δείξει ότι γενικότερα η απόδοση της Α/Γ (μέση ισχύς εξόδου και μέσα φορτία) καθορίζεται από τις αεροδυναμικές δυνάμεις που δημιουργούνται από τον μέσο άνεμο.

Περιοδικές αεροδυναμικές δυνάμεις που προκαλούνται από διάτμηση ανέμου, άνεμοι εκτός άξονα και περιστροφή του ρότορα, δυνάμεις τυχαίας διακύμανσης που προκαλούνται από αναταράξεις και τα δυναμικά φαινόμενα είναι η πηγή των φορτίων κόπωσης και ένας παράγοντας στα φορτία αιχμής που αντιλαμβάνεται από μια Α/Γ. Για να γίνουν κατανοητές οι διάφορες επιδράσεις τις οποίες δέχεται μια Α/Γ κατά τη λειτουργία της στο συγκεκριμένο κεφάλαιο περιγράφονται τα βασικά στοιχεία της αεροδυναμικής λειτουργίας μια Α/Γ σε σταθερή κατάσταση. Μια επισκόπηση των πολύπλοκων φαινομένων της ασταθούς αεροδυναμική και ο τρόπος αντιμετώπισης στην ανάλυση της απόδοσης του ρότορα είναι πολύ σημαντικό θέμα.

4.1 Θεωρίες Υπολογισμού Ισχύος Α/Γ.

Τα πρακτικά σχέδια Α/Γ οριζόντιου άξονα (HAWT) χρησιμοποιούν αεροτομές για να μετασχηματίσουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε τεχνικά εκμεταλλεύσιμη ενέργεια. Επομένως γίνεται προσπάθεια στο σημείο αυτό να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο η χρήση αεροτομών μπορεί να οδηγήσει σε παραγωγή ενέργειας. Η κλασική ανάλυση της ανεμογεννήτριας αναπτύχθηκε αρχικά από τους Betz και Glauert (Glauert, 1935) τη δεκαετία του 1930. Στη συνέχεια, η θεωρία επεκτάθηκε και προσαρμόστηκε για να δίνει λύσεις με εφαρμογή υπολογιστικών μεθόδων - λογισμικού (βλέπε Wilson and Lissaman, 1974· Wilson et al., 1976; de Vries, 1979).

Σε όλες αυτές τις μεθόδους, η θεωρία ορμής και η θεωρία πτέρυγας συνδυάζονται σε μια συνολικότερη θεωρία που επιτρέπει τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών απόδοσης ενός δακτυλιοειδούς τμήματος του ρότορα.

Για τη μελέτη της αεροδυναμικής συμπεριφοράς των Α/Γ οριζοντίου άξονα (HAWT) έχουν αναπτυχθεί θεωρητικά μοντέλα. Κάποια από αυτά προσεγγίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια την πραγματική συμπεριφορά του ρότορα στο περιβάλλον λειτουργίας τους, ενώ άλλα δεν είναι τόσο ακριβή. Τα μοντέλα αυτά, κατηγοριοποιημένα από μικρότερης προς μεγαλύτερης ακρίβειας είναι:

- Θεωρία του δίσκου δράσης (actuator disk model).
- Θεωρία του βέλτιστου δίσκου δράσης για Α/Γ οριζοντίου άξονα (Glauert).
- Θεωρία αξονικής ορμής (Rankine-Froude Theory).
- Γενική θεωρία ορμής με περιστρεφόμενο απόρρεμα.
- Θεωρία στοιχείου-πτερυγίου (Blade Element Theory).
- Μέθοδος των πλαισίων (Panel Methods).



Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική παρουσίαση της θεωρίας του δίσκου δράσης σε συνδυασμό με τη θεωρία αξονικής ορμής Rankine - Froude.

4.2 Θεωρία Μονοδιάστατης Ορμής – Όριο Betz

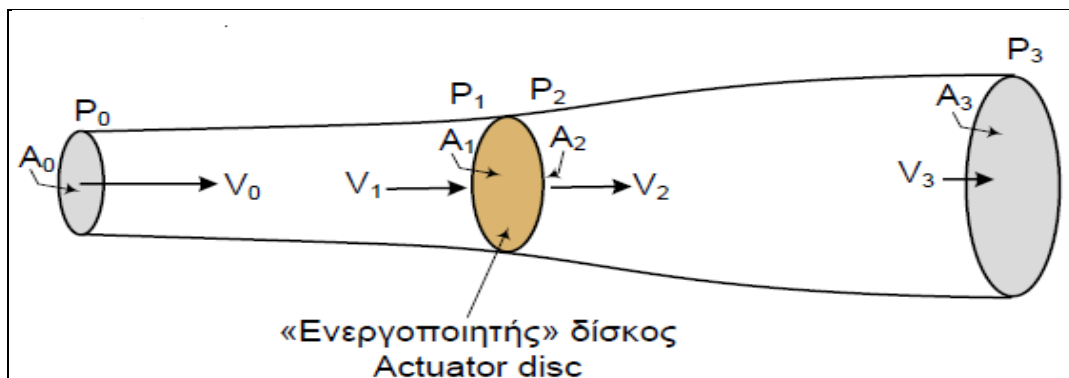
Ένα απλό μοντέλο, που αποδίδεται γενικά στον Betz (1926), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ισχύος από έναν ιδανικό ρότορα στροβίλου, η ώθηση του ανέμου στον ιδανικό ρότορα και η επίδραση της λειτουργίας του ρότορα στο τοπικό αιολικό πεδίο. Αυτό το απλό μοντέλο βασίζεται στη θεωρία γραμμικής ορμής που αναπτύχθηκε πριν από 100 χρόνια για την πρόβλεψη της απόδοσης των ελικών πλοίων. Στην πραγματικότητα η θεωρία αυτή αναπτύχθηκε την περίοδο (1919 – 1926) από το Γερμανό Φυσικό Albert Betz και προσδιορίζει τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να παράγει μια αιολική μηχανή οριζόντιου άξονα.

Εισάγεται η έννοια του «δίσκου ενεργοποίησης» (actuator disc) ο οποίος διαθέτει άπειρα πτερύγια απειροστού πάχους και περιστρέφεται με απειροστή ταχύτητα. Στην ουσία η εισαγωγή της συγκεκριμένης διάταξης (actuator disc) χρησιμοποιείται ως μια διάταξη για την απορρόφηση της κινητικής ενέργειας του ανέμου με τη μικρότερη δυνατή διαταραχή του ρευστού.

Η ανάλυση προϋποθέτει έναν όγκο ελέγχου, τα όρια του οποίου είναι η επιφάνεια ενός σωλήνα ροής και δύο διατομές του σωλήνα ροής. Η μοναδική ροή είναι κατά μήκος των άκρων του σωλήνα ροής. Ο στρόβιλος αντιπροσωπεύεται από έναν ομοιόμορφο «δίσκο ενεργοποίησης» που δημιουργεί μια ασυνέχεια πίεσης στο σωλήνα ροής του αέρα που τον διατρέχει. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή η ανάλυση δεν περιορίζεται σε συγκεκριμένο τύπο Α/Γ.

Κατά την ανάλυση αυτή γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

- Η ροή θεωρείται ομογενής, ασυμπίεστη, σταθερής κατάστασης.
- Δεν υπάρχει οπισθέλκουσα τριβής.
- Θεωρείται άπειρος αριθμός πτερυγίων.
- Θεωρείται ομοιόμορφη ώθηση πάνω στην περιοχή του δίσκου ή του ρότορα.
- Θεωρείται ένα μη περιστρεφόμενο απόρεμα.
- Η στατική πίεση μακριά ανάντη και κατόντη του ρότορα είναι ίση με εκείνη της αδιατάρακτης ροής δηλ. τη στατική πίεση περιβάλλοντος.



Εικόνα 27: Μοντέλο δίσκου ενεργοποίησης (Λευθεριώτης 2015).



Σύμφωνα με το σχήμα της ροής για τις διατομές του σωλήνα θα είναι:

- ✓ $A_3 > A_1 > A_0$ διότι καθώς ο δίσκος απορροφά την κινητική ενέργεια του ανέμου η ταχύτητά του μειώνεται και σύμφωνα με την εξίσωση της συνέχειας, αυξάνεται η διατομή.

Για τον «δίσκο ενεργοποίησης» $u_1 = u_2$ αφού $A_1 = A_2$. (4.1)

Αναφορικά και με το πεδίο πίεσης η πίεση του αδιατάρακτου ρευστού είναι η ατμοσφαιρική δηλ. $P_0 = P_3 = P_{atm}$. (4.2)

Λόγω της σχέσης των διατομών και της συνεπακόλουθης σχέσης μεταξύ της δυναμικής πίεσης ή πίεσης ταχύτητας με τη στατική πίεση θα ισχύει:

$P_1 > P_0$ ($V_1 < V_0$ λόγω $A_1 > A_0$) (4.3)

κάτι που επιβεβαιώνει το φαινόμενο blockage που επιβάλλει ο δίσκος στη ροή δηλ. στον άνεμο.

$P_3 > P_2$ ($V_3 < V_2$ λόγω $A_3 > A_2$) (4.4)

Με την παραπάνω θεώρηση προκύπτει μια ασυνέχεια στην πίεση ανάντη και κατάντη του δίσκου ενεργοποίησης αφού προέκυψε τελικά

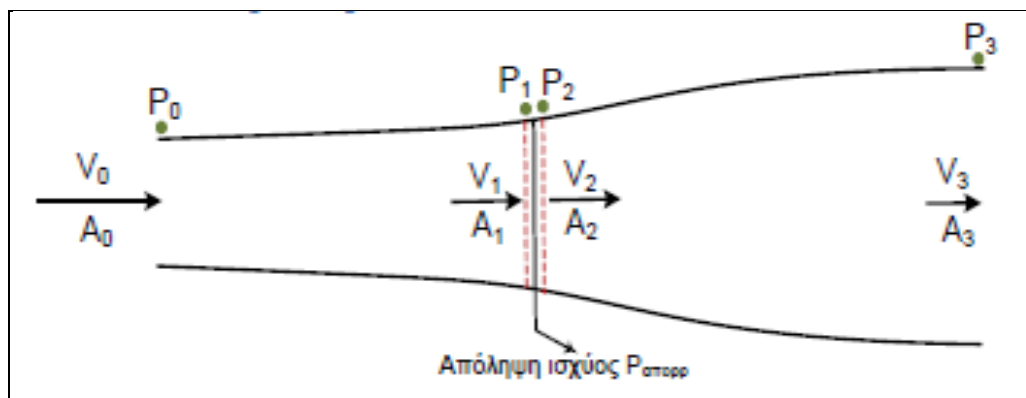
$P_1 > P_2$ (4.5)

Αναφορικά επίσης με την εξ. Συνέχειας θα είναι:

$A_0 V_0 = A_1 V_1 = A_2 V_2 = A_3 V_3$ (4.6)

Για την ανάλυση των συνθηκών ροής γύρω από το δίσκο χρησιμοποιούνται 4 θέσεις:

- Θέση_0: Ανάντη του δίσκου και πολύ πριν αυτόν (ρευστό αδιατάρακτο),
- Θέση_1: Ανάντη του δίσκου πολύ κοντά στο δίσκο, αμέσως πριν αυτόν
- Θέση_2: Κατάντη του δίσκου πολύ κοντά στο δίσκο, αμέσως μετά από αυτόν
- Θέση_3: Κατάντη του δίσκου και πολύ μακριά από αυτόν (ρευστό αδιατάρακτο),



Εικόνα 28: Θέσεις ενδιαφέροντος ανάλυσης δίσκου ενεργοποίησης.



Με εφαρμογή της εξ. Bernoulli θα είναι:

$$P_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 = P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 \Rightarrow P_1 - P_0 = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - V_1^2) \quad (4.7)$$

$$P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 = P_3 + \frac{1}{2} \rho V_3^2 \Rightarrow P_3 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (V_2^2 - V_3^2) \quad (4.8)$$

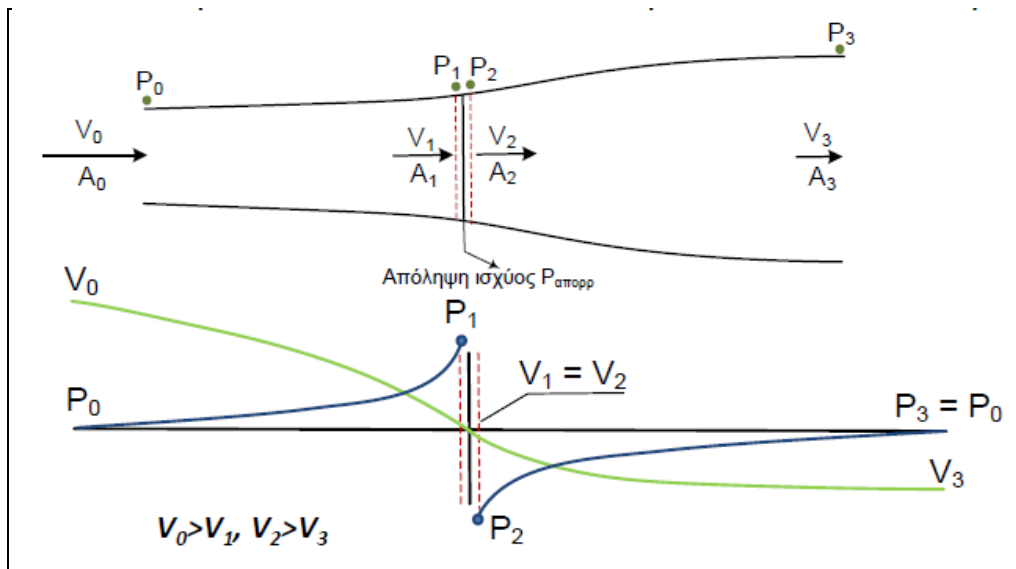
Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι θεωρείται ότι η ασυνέχεια που προκύπτει στο πεδίο της πίεσης δεν περνάει και στο πεδίο ταχυτήτων με την έννοια ότι αμέσως πριν και αμέσως μετά το δίσκο ενεργοποίησης οι ταχύτητες είναι ίσες.

Προσθέτοντας κατά μέλη τις (1) και (2) θα είναι:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - V_3^2) \quad (4.9)$$

Η δύναμη T (Thrust) είναι μια πιεστική δύναμη που άνεμος ασκεί στο δίσκο μπορεί να γραφτεί ως:

$$T = (P_1 - P_2)A_1 = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - V_3^2) A_1 \quad (4.10)$$



Εικόνα 29: Κατανομές πιέσεις και ταχύτητας γύρω από το δίσκο ενεργοποίησης (Λευθεριώτης 2015).

Με εφαρμογή της διατήρησης της γραμμικής ορμής στον όγκο ελέγχου που περικλείει το όλο σύστημα, μπορεί υπολογιστεί η καθαρή δύναμη εντός του όγκου ελέγχου. Αυτή η δύναμη είναι ίση και αντίθετη από την ώθηση, T , που είναι η δύναμη του ανέμου στην Α/Γ. Δηλ. η ίδια δύναμη μπορεί να υπολογιστεί από τη μεταβολή της ορμής του ανέμου. Δηλ. μια μάζα m του ρευστού με μια αρχική ορμή περνώντας από το δίσκο θα μεταβάλλει την ορμή. Από τη διατήρηση της γραμμικής ορμής για μονοδιάστατη, ασυμπίεστη, χρονικά αμετάβλητη ροή, η ώθηση είναι ίση και αντίθετη με το ρυθμό μεταβολής της ορμής του ρεύματος αέρα:

$$T = V_0(\rho VA)_0 - V_3(\rho VA)_3 \quad (4.11)$$

$$\text{Για συνθήκες σταθεροποιημένης ροής θα είναι: } (\rho VA)_0 = (\rho VA)_3 = \dot{m} \quad (4.12)$$

$$\text{Επομένως } T = \dot{m}(V_0 - V_3) = (\rho V_1 A_1)(V_0 - V_3)$$



Συνδυάζοντας με την (4.10) προκύπτει:

$$\left(\rho \cdot V_1 \cdot A_1\right)\left(V_0 - V_3\right) = \frac{1}{2} \rho \left(V_0^2 - V_3^2\right) A_1 \Rightarrow V_1\left(V_0 - V_3\right) = \frac{1}{2}\left(V_0^2 - V_3^2\right)$$

$$\Rightarrow V_1 \left(\cancel{V_0 - V_3}\right) = \frac{1}{2} \left(\cancel{V_0 - V_3}\right) \left(V_0 + V_3\right) \Rightarrow \boxed{V_1 = \frac{1}{2}\left(V_0 + V_3\right)} \quad (4.13)$$

(Θεώρημα Rankine – Froude)

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση η ταχύτητα του ανέμου πάνω στο επίπεδο του δίσκου προκύπτει ως η μέση τιμή των ταχυτήτων του αδιατάρακτου ρευστού - ανέμου ανάντη και κατόντη του δίσκου.

Ορίζεται ο αξονικός συντελεστής επαγωγής, a , ως το κλάσμα της μείωσης της ταχύτητας του ανέμου μεταξύ του ελεύθερου αδιατάρακτου ρεύματος ανάντη του δίσκου και του επιπέδου του δίσκου ως εξής:

$$a = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \Rightarrow \boxed{V_1 = V_0(1 - a)} \quad (4.14)$$

$$\text{Συνδυάζοντας τις σχέσεις (5) και (6) προκύπτει } \boxed{V_3 = V_0(1 - 2a)} \quad (4.15)$$

Η ποσότητα του γινομένου ($V_1 a$) αναφέρεται συχνά ως η επαγόμενη ταχύτητα στον ρότορα, οπότε η ταχύτητα του ανέμου στο ρότορα είναι ένας συνδυασμός της ταχύτητας του ελεύθερου ρεύματος και της επαγόμενης ταχύτητας του ανέμου.

Καθώς ο αξονικός συντελεστής επαγωγής αυξάνεται από το 0, η ταχύτητα του ανέμου πίσω από τον ρότορα (κατόντη) μειώνεται όλο και περισσότερο. Αν $a=1/2$, ο άνεμος έχει επιβραδυνθεί σε μηδενική ταχύτητα πίσω από τον ρότορα και αυτή η απλή θεωρία δεν είναι πλέον εφαρμόσιμη.

Η ισχύς εξόδου P , ισούται λόγω δράσης – αντίδρασης με την ισχύ που απορροφάται από το δίσκο και είναι ίση με την ώθηση επί την ταχύτητα στο δίσκο:

$$P = T \cdot V_1 \stackrel{(4)}{\Rightarrow} P = \frac{1}{2} \rho A_1 \left(V_0^2 - V_3^2\right) V_1 \stackrel{(5)}{\Rightarrow} P = \frac{1}{2} \rho A_1 \left(V_0^2 - V_3^2\right) \frac{1}{2} \left(V_0 + V_3\right)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A_1 \cdot V_0^2 \left(\frac{V_0^2 - V_3^2}{V_0^2}\right) \frac{1}{2} V_0 \left(\frac{V_0 + V_3}{V_0}\right) \Rightarrow \boxed{P = \frac{1}{2} \rho A_1 \cdot V_0^3 \left[\frac{1}{2}(1 - \xi^2)(1 + \xi)\right]} \quad (4.16)$$

$$\text{Στην τελευταία σχέση έχει γίνει εισαγωγή του όρου } \xi = \frac{V_3}{V_0} \quad (4.17)$$

Η παράσταση μέσα στην αγκύλη της σχέσης (8) λέγεται συντελεστής ισχύος (power coef., C_p) και ισούται με το λόγο της ισχύος που απορροφάται από το δίσκο προς τη διαθέσιμη ισχύ του ανέμου:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A_1 \cdot V_0^3} \Rightarrow P = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot A_1 \cdot V_0^3 \quad (4.18)$$



Ο συντελεστής ισχύος C_p εκφράζει την αεροδυναμική απόδοση μιας αιολικής μηχανής κατά τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε μηχανική (λόγω περιστροφής του ρότορα). Συνολικότερα η απόδοση μιας μηχανής θα πρέπει να περιλαμβάνει και τις απώλειες των μηχανικών μερών του συστήματος περιστροφής όπως έδρανα ολίσθησης, κιβώτιο ταχυτήτων, απώλειες περαιτέρω κατά τη μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Η απορροφούμενη ισχύς θα μεγιστοποιείται όταν η παράγωγος του συντελεστή ισχύος μηδενίζεται δηλ.:

$$C_p = \frac{1}{2}(1 - \xi^2)(1 + \xi)$$

$$\frac{dC_p}{d\xi} = 0 \Rightarrow (1 - \xi^2) \frac{d(1 + \xi)}{d\xi} + (1 + \xi) \frac{d(1 - \xi^2)}{d\xi} = 0 \Rightarrow$$

$$(1 - \xi^2) \cdot 1 + (1 + \xi)(-2\xi) = 0 \Rightarrow (1 - \xi)(1 + \xi) + (1 + \xi)(-2\xi) = 0 \Rightarrow$$

$$(1 + \xi)(1 - 3\xi) = 0$$

Η λύση $\xi = -1$ απορρίπτεται λόγω του ότι δεν έχει φυσικό περιεχόμενο. ($\xi = \frac{V_3}{V_0}$).

Η λύση $\xi = 1/3$ έχει φυσικό νόημα καθώς $V_3 = \frac{1}{3}V_0$ και $V_1 = \frac{2}{3}V_0$

Επίσης για $\xi = 1/3$ θα προκύπτει η μέγιστη τιμή του C_p δηλ.

$$C_p = \frac{1}{2}(1 - \xi^2)(1 + \xi) = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{1}{9}\right)\left(1 + \frac{1}{3}\right) = \frac{1}{2} \cdot \frac{8}{9} \cdot \frac{4}{3} \Rightarrow C_p = \frac{16}{27} = 0,592... \quad (4.19)$$

Αυτή η τιμή του **συντελεστή ισχύος** αντιστοιχεί και στη μέγιστη απόδοση δηλ. στη μέγιστη ισχύ που μπορεί να παράγει μια μηχανή οριζοντίου άξονα. Θεωρώντας και τον συντ. ισχύος επομένως η σχέση που θα δίνει την ισχύ της Α/Γ.

$$P = \left(\frac{1}{2}\right) C_p \cdot (\rho \cdot A \cdot u^3) \quad (4.20)$$

Η δύναμη της Ώθησης (thrust) που ωθεί το δίσκο ενεργοποίησης δίνεται από την (4)

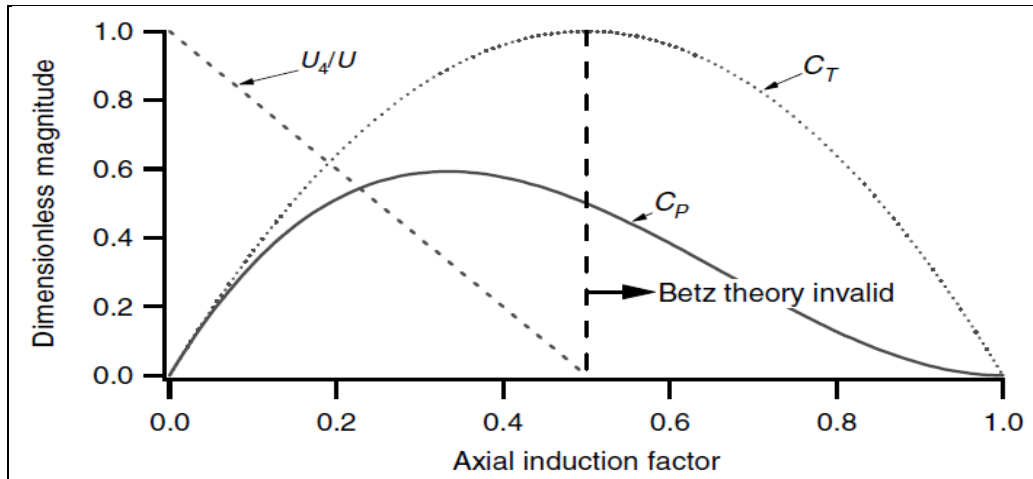
$$T = (P_1 - P_2)A_1 = \frac{1}{2}\rho(V_0^2 - V_3^2)A_1 = \frac{1}{2}\rho A_1 V_0^2 \left[1 - \left(\frac{V_3}{V_0}\right)^2\right] = \frac{1}{2}\rho A_1 V_0^2 [1 - \xi^2]$$

Η παράσταση στην αγκύλη λέγεται συντελεστής ωθούσας δύναμης (thrust coef., C_T) σε αντιστοιχία με τις εξισώσεις των δυνάμεων Lift και Drag.

Στο λεγόμενο όριο Betz στο οποίο δηλ. θα είναι $\xi=1/3$ θα είναι:

$$C_T = [1 - \xi^2] = \frac{8}{9} = 0.888 \quad (4.21)$$

Προκύπτει δηλ. ότι η τιμή αυτή του C_T είναι μικρότερη από το συντελεστή οπισθέλκουσας συμπαγούς δίσκου ($C_D = 1.11$) λόγω του ότι ο δίσκος ενεργοποίησης δεν είναι συμπαγής αλλά επιτρέπει τη ροή ανέμου διαμέσου του.



Εικόνα 30: Χαρακτηριστικά μεγέθη - παράμετροι δίσκου ενεργοποίησης (ταχύτητες ανέμου, συντελεστής ισχύος C_p , συντελεστής ώσης C_T).

Αν θεωρηθεί μια Α/Γ οριζοντίου άξονα με πτερύγια ακτίνας R , που περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα Ω , λόγω μιας ταχύτητα ανέμου που πνέει προς αυτήν V_0 , τότε ορίζεται ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου (tip speed ratio) λ ως το πηλίκο της γραμμικής ταχύτητας του ακροπτερυγίου (tip) προς την ταχύτητα του ανέμου.

Η απόδοση επίσης της Α/Γ επηρεάζεται δηλ. από το συντ. απόδοσης του δρομέα ο οποίος με τη σειρά του επηρεάζεται από την ταχύτητα περιστροφής του σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου, που προσπίπτει στην Α/Γ. Για την έκφραση της παραπάνω σχέσης ορίζεται ο λόγος της γραμμικής ταχύτητας του άκρου του πτερυγίου (ακροπτερυγίου blade tip) προς τη γραμμική ταχύτητα του ανέμου (tip-speed ratio – TSR) ως εξής:

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot R}{V_0}, \quad \text{ή} \quad TSR = \frac{V_{tip}}{u_{mean}} = \frac{\omega R}{u_{mean}} \quad (4.22)$$

όπου R (m) το μήκος του πτερυγίου,
 ω (rpm) η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του πτερυγίου.

Ο λόγος ταχύτητας του ακροπτερυγίου ουσιαστικά καθορίζει το βέλτιστο σημείο λειτουργίας μιας αιολικής μηχανής. Για παράδειγμα οι αργόστροφοι ανεμόμυλοι έχουν $\lambda = 1$, ενώ οι σύγχρονοι είναι πολύστροφοι με λ στο εύρος (4 – 6).

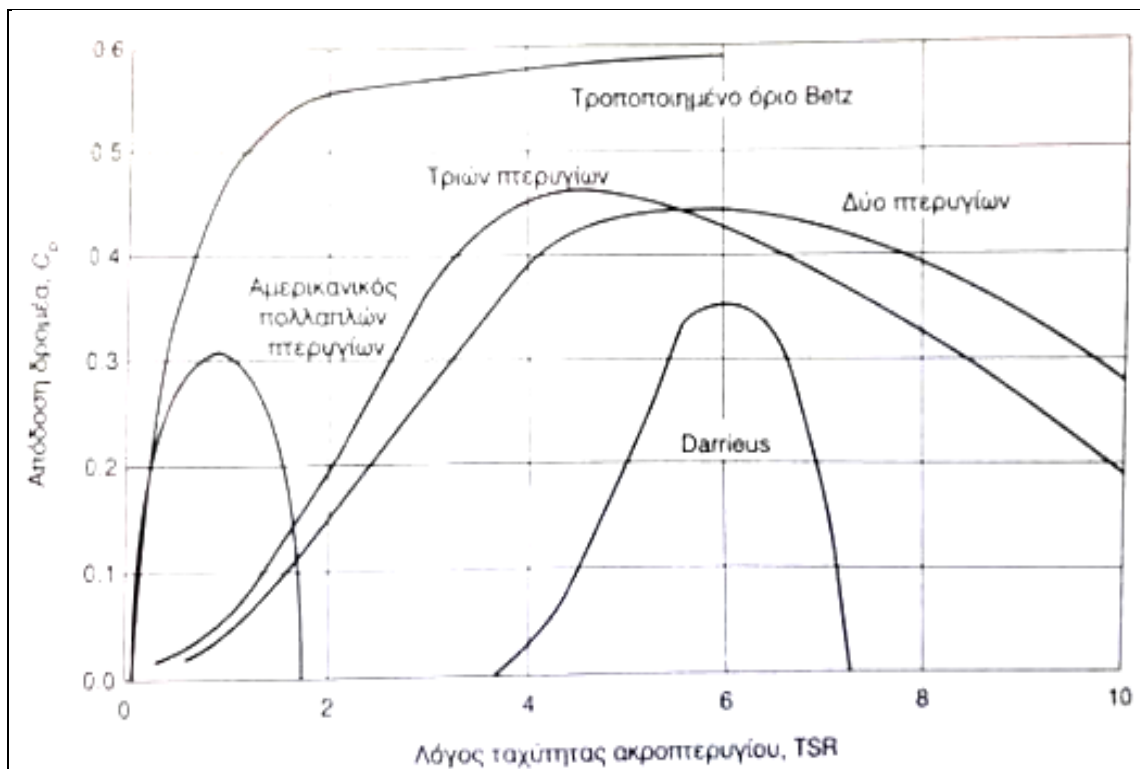
Το τελικό αποτέλεσμα δηλ. δείχνει ότι πέρα από την μέγιστη απόδοση του δρομέα που σύμφωνα με το όριο Betz φθάνει το 59.26% της διαθέσιμης ισχύος του ανέμου, η τεχνικά εκμεταλλεύσιμη ισχύς επηρεάζεται από το συντελεστή ωθούσας δύναμης C_T ο οποίος επηρεάζεται από τον όρο TSR, δηλ. τον συντ. απόδοσης του δρομέα.

Το ερώτημα που προκύπτει είναι πόσο κοντά στο όριο αυτό είναι οι σύγχρονοι δρομείς των ανεμογεννητριών. Υπό ιδανικές συνθήκες λειτουργίας, μπορούν να φτάσουν στο 80% αυτού του ορίου, το οποίο μας δίνει εύρος απόδοσης περίπου 45%-50% στη μετατροπή της ισχύος του ανέμου σε ισχύ στον περιστρεφόμενο άξονα της γεννήτριας.

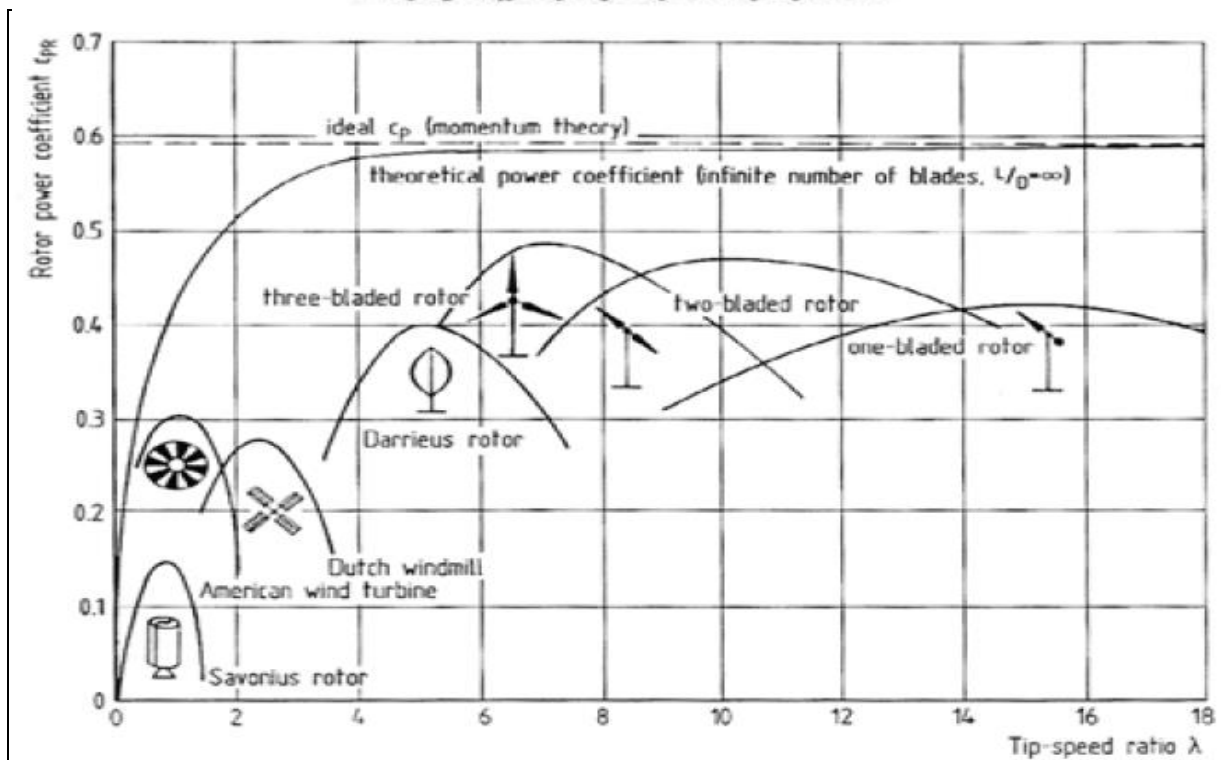


Για μία συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου, η απόδοση του δρομέα είναι συνάρτηση του ρυθμού με τον οποίο περιστρέφεται ο δρομέας. Αν ο δρομέας στρέφεται πολύ αργά, η απόδοση μειώνεται, διότι τα πτερύγια αφήνουν πάρα πολύ αέρα να περάσει ανεκμετάλλευτος. Στην αντίθετη περίπτωση αν ο δρομέας περιστρέφεται πολύ γρήγορα, η απόδοση μειώνεται, καθώς η διαταραχή που προκαλείται από ένα πτερύγιο επηρεάζει όλο και περισσότερο το πτερύγιο που ακολουθεί. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος για να απεικονίσουμε την απόδοση του δρομέα είναι να την παρουσιάσουμε ως μια συνάρτηση του λόγου της ταχύτητας ακροπτερυγίου (tip speed ratio- TSR). Ο TSR είναι η ταχύτητα με την οποία κινείται το εξωτερικό άκρο του πτερυγίου διαιρούμενη με την ταχύτητα του ανέμου.

Ένα διάγραμμα της ιδανικής απόδοσης του δρομέα για διαφόρους τύπους δρομέα ως συνάρτηση του TSR φαίνεται στο σχήμα παρακάτω. Οι δρομείς με πολλά πτερύγια περιστρέφονται σχετικά αργά, με βέλτιστο TSR περίπου 1.0 και μέγιστη απόδοση μόλις πάνω από 30%. Οι δρομείς με δύο και τρία πτερύγια περιστρέφονται πολύ πιο γρήγορα, με βέλτιστο εύρος TSR 4-6 και μέγιστη απόδοση περίπου 40%-50%. Επίσης φαίνεται μια καμπύλη που αντιστοιχεί στο όριο Betz τροποποιημένη, για να ληφθούν υπόψη οι στροβιλισμοί (τύρβη) που τα πτερύγια δημιουργούν στον αέρα, τις οποίες ο Betz δεν λαμβάνει υπόψη, καθώς επίσης το γεγονός ότι ένας αργά περιστρεφόμενος δρομέας δεν συλλαμβάνει όλο τον άνεμο, κάτι το οποίο μειώνει τη μέγιστη δυνατή αποδοτικότητα κάτω από το όριο Betz.



Εικόνα 31: Απόδοση δρομέα ως προς το λόγο ταχυστροφίας TSR.



Εικόνα 32 Καμπύλες απόδοσης – συντελεστή ισχύος για διάφορους τύπους Α/Γ και αριθμούς πτερυγίων, ως προς το λόγο ταχύτητας ακροπτερυγίου TSR.

Οι σύγχρονες Α/Γ λειτουργούν καλύτερα όταν το TSR τους είναι στο εύρος 4-6, δηλαδή όταν η άκρη του πτερυγίου τους κινείται τέσσερις έως έξι φορές γρηγορότερα από την ταχύτητα του ανέμου. Στην ιδανική περίπτωση, για μέγιστη απόδοση, τα πτερύγια θα πρέπει να αλλάζουν την ταχύτητά τους καθώς αλλάζει η ταχύτητα του



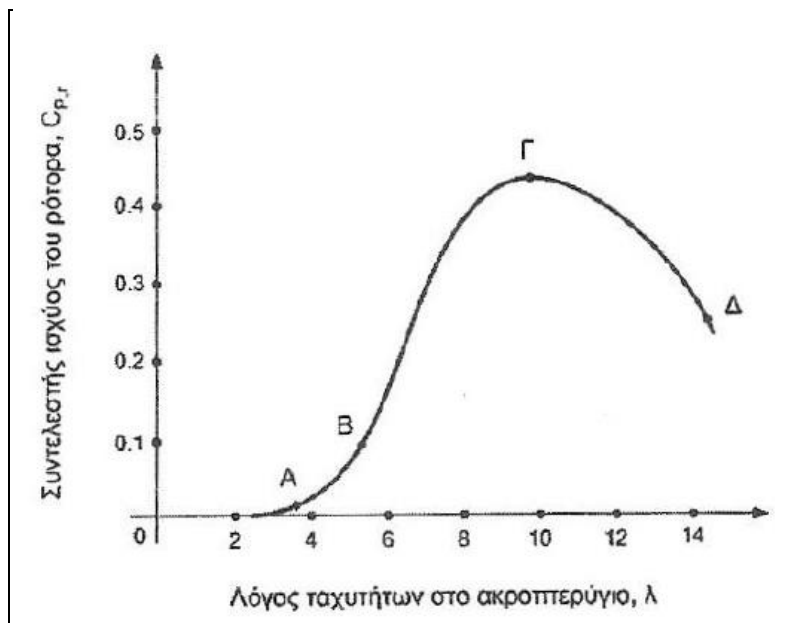
ανέμου, και για αυτό τον λόγο οι γεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας είναι αποδοτικότερες.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι επιλύοντας τη σχέση ισχύος ως προς το συντελεστή ισχύος προκύπτει:

$$P = \left(\frac{1}{2}\right) C_p \cdot (\rho \cdot A \cdot u^3) \Rightarrow C_p = \frac{P}{0.5(\rho \cdot A \cdot u^3)} \quad (4.23)$$

Στην τελευταία σχέση ο αριθμητής μπορεί να είναι η ισχύς εξόδου από το ρότορα, οπότε κατ' επέκταση ο αντίστοιχος συντελεστής ισχύος ονομάζεται συντελεστής ισχύος του ρότορα C_{pr} . Μπορεί επίσης ο αριθμητής να είναι η ισχύς εξόδου του όλου συστήματος της Α/Γ συνολικά και έτσι στην περίπτωση αυτή ο αντίστοιχος συντελεστής ισχύος ονομάζεται συντελεστής ισχύος του συστήματος C_{ps} .

Η διαφορά αυτών των δύο ποσοτήτων έγκειται στις απώλειες του συστήματος μετάδοσης της ισχύος και στις απώλειες του όλου ηλεκτρολογικού εξοπλισμού.



Εικόνα 33: Τυπικό διάγραμμα C_{pr} ως προς το συντελεστή ταχυτροφίας λ , για Α/Γ οριζοντίου άξονα με τα πτερύγια σε συγκεκριμένη γωνία κλίσης (pitch).

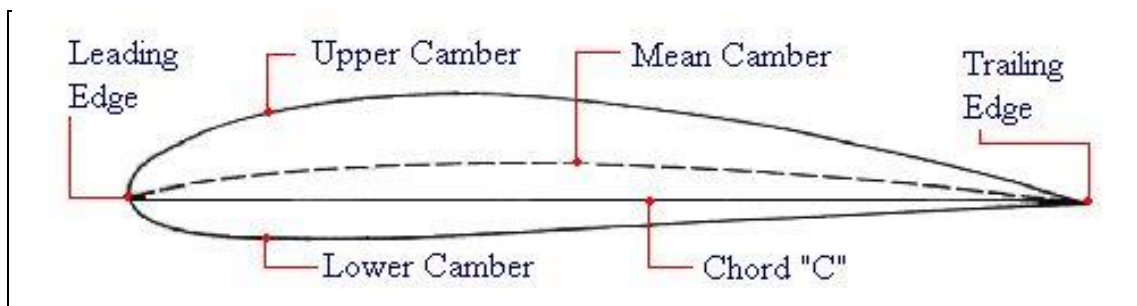
Στην Εικ.33 η περιοχή ΑΒΓ ελέγχεται από την αστάθεια των πτερύγων (blade stall) του ρότορα και οι τοπικές γωνίες προσβολής αυξάνονται πλησιάζοντας το σημείο Α. Οποιαδήποτε αλλαγή στη γωνία κλίσης των πτερυγίων θα έχει μεγάλη επίπτωση στην ισχύ εξόδου του ρότορα κατά μήκος του τμήματος ΑΒΓ. Το τμήμα ΓΔ ελέγχεται από τη δύναμη της αντίστασης τριβής (skin friction), επειδή οι τοπικές γωνίες προσβολής ελαττώνονται πλησιάζοντας το σημείο Δ.



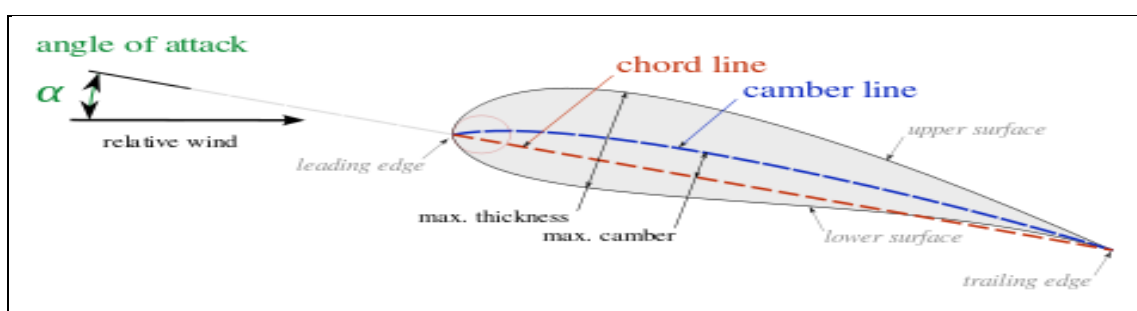
4.3 Το Τμήμα των Πτερυγίων - Αεροτομών.

Τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά μιας αεροτομής είναι

- Μέση γραμμή αεροτομής (Mean Chamber Line) είναι ο γεωμετρικός τόπος ισάπέχουσας γραμμής από τις επιφάνειες (άνω και κάτω) της αεροτομής (airfoil).
- Χείλος προσβολής (Leading Edge) είναι το έμπροσθεν σημείο προσβολής του ανέμου στην αεροτομή που έρχεται δηλ. σε επαφή με το ρευστό μέσο γενικότερα.
- Χείλος εκφυγής (Trailing Edge) είναι το πιο απομακρυσμένο σημείο της αεροτομής από το χείλος προσβολής.
- Χορδή αεροτομής (Chord) είναι η ευθεία γραμμή που συνδέει το χείλος προσβολής με το χείλος εκφυγής.
- Μέγιστη καμπυλότητα της αεροτομής (Camber) είναι η μέγιστη απόσταση μεταξύ της χορδής και της μέσης γραμμής
- Πάχος αεροτομής (Thickness) είναι η κάθετη απόσταση μεταξύ άνω και κάτω επιφάνειας της αεροτομής.
- Γωνία προσβολής (Angle of attack) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ελεύθερης ροής και της χορδής της αεροτομής. Από την καμπυλότητα της αεροτομής εξαρτάται η γωνία μηδενικής άνωσης ($\alpha_L = 0$) δηλ. η γωνία κατά την οποία δεν παράγεται άνωση (Lift force) στην αεροτομή.



Εικόνα 34: Βασικά Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Αεροτομής.



Εικόνα 35: Ορισμός γωνίας προσβολής πτερυγίου.



Ο σχεδιασμός αεροτομών έχει οδηγήσει σε πτέρυγες με διαφορετικά γεωμετρικά και αεροδυναμικά χαρακτηριστικά που έχουν πλέον τυποποιηθεί. Η πιο γνωστή σειρά τυποποίησης είναι η σειρά NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) που βασίστηκε στη γερμανική σειρά Goettingen (Αποστολόπουλος 2016). Μια εμπειριστατωμένη περιγραφή και καταγραφή στοιχείων των αεροτομών τύπου NACA περιέχεται στο βιβλίο Theory of Wing Sections (Abbot and von Doenhoff, 1959).

Ειδικότερα η σειρά SERI (ΗΠΑ) διαθέτει υψηλότερο δείκτη αντίστασης και ορισμένο ανώτατο συντελεστή άνωσης. Η σειρά NREL (National Renewable Energy Lab) δίνει αυξημένη ελεγχόμενη ισχύ. Η σειρά RIS (Δανία) δίνει μέγιστη αναλογία άνωσης – αντίστασης κοντά στη γωνία απώλειας στήριξης. Η σειρά FFA-W (Σουηδία) διαθέτει υψηλό συντελεστή άνωσης και αντίστασης και καλή αεροδυναμική απόδοση κοντά στη γωνία απώλειας στήριξης. Σήμερα ο μεγαλύτερος κατασκευαστής πτερυγίων Α/Γ η LM Δανίας χρησιμοποιεί την αεροτομή FFA-W.

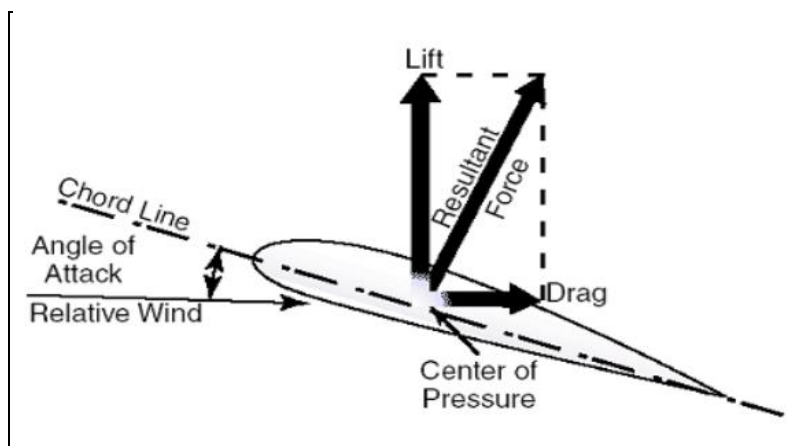
4.4 Αεροδυναμικοί Συντελεστές.

Η δύναμη αντίδρασης F αναλύεται σε διευθύνσεις, κάθετη στην ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής και παράλληλα σε αυτήν. Προκύπτουν από την ανάλυση αυτή οι δυνάμεις της άνωσης (Lift) που είναι κάθετη στη διεύθυνση της ταχύτητας και της αντίστασης (Drag) παράλληλα στη διεύθυνση της ταχύτητας της αδιατάρακτης ροής.

Στην περίπτωση αεροτομής αεροσκάφους ο λόγος L/D θα πρέπει να λαμβάνει μέγιστες τιμές, ώστε η άνωση να υπερνικά τη βαρύτητα και το σκάφος να ανυψώνεται. Για τις δυνάμεις αυτές υπάρχουν συντελεστές άνωσης και αντίστασης ενώ ορίζεται επίσης και συντελεστής ροπής ως εξής:

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho c V_\infty^2} \quad C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho c V_\infty^2} \quad C_m = \frac{M}{\frac{1}{2} \rho c V_\infty^2}$$

όπου c είναι το μήκος χορδής της αεροτομής, ενώ η ροπή M μιας αεροτομής ορίζεται ως προς σημείο που βρίσκεται σε απόσταση $c/4$ από το χείλος προσβολής. Όταν η ροπή είναι θετική τείνει να γυρίσει την αεροτομή ωρολογιακά.



Εικόνα 36: Ανάλυση δύναμης αντίδρασης.



Οι παραπάνω αεροδυναμικοί συντελεστές εξαρτώνται από τη γωνία προσβολής α και από τον αριθμό Re .

$$Re = \frac{V_{\infty} c}{\nu}$$

Ο συντελεστής άνωσης C_l αυξάνεται γραμμικά με τη γωνία προσβολής α μέχρι μιας συγκεκριμένης τιμής της α στην οποία ο C_l γίνεται μέγιστος. Στο σημείο αυτό επέρχεται η «απώλεια στήριξης» (stall) δηλ. η άνωση φθίνει και ο C_l μειώνεται απότομα. Επίσης για μικρές γωνίες α ο C_d παραμένει σχεδόν σταθερός αλλά αυξάνεται ραγδία κατά την κατάσταση stall. (διαγράμματα)

Η γεωμετρία της αεροτομής σχετίζεται άμεσα με την κατάσταση απώλειας στήριξης. Οι λεπτές αεροτομές με αιχμηρό χείλος προσβολής τείνουν να χάνουν στήριξη απότομα σχε σχέση με αεροτομές με πιο καμπύλο χείλος προσβολής. Η ερμηνεία του φαινομένου αυτού σχετίζεται με την αποκόλληση του οριακού στρώματος από το άνω μέρος της αεροτομής.

Όταν η αποκόλληση ξεκινά από το χείλος εκφυγής και αυξάνει αργά με την αύξηση της γωνίας προσβολής α η μετάβαση σε κατάσταση απώλειας στήριξης είναι πιο ομαλή. Όταν η αποκόλληση ξεκινά από το χείλος προσβολής τότε το οριακό στρώμα όλο αποκολλάται ταυτόχρονα με μείωση της άνωσης.

Η συμπεριφορά του τυρβώδους οριακού στρώματος σπηραάζετια από την καμπυλότητα της αεροτομής, την ταχύτητα προσβολής που υπεισέρχεται στον αριθμό Re , την τραχύτητα της επιφάνειας και τον αριθμό Ma . Η αποκόλληση του οριακού στρώματος σχετίζεται συνολικά πλέον με τη γωνία προσβολής που κυμαίνεται σε γωνίες μεγαλύτερες των 5° .

Η ροική γραμμή του σημείου ανακοπής είναι η νοητή γραμμή γύρω από την οποία η πορεία του ρευστού διαχωρίζεται κατά τρόπο που μια ποσότητα ρευστού να περνά πάνω από την αεροτομή και η υπόλοιπη να περνά κάτω από αυτήν. Στο σημείο ανακοπής η ταχύτητα του ρευστού προφανώς μηδενίζεται και το πάχος του οριακού στρώματος είναι λεπτό. Το ρευστό που περνά πάνω από την αεροτομή επιταχύνεται προσπερνώντας το χείλος προσβολής. Για τη διατήρηση του ενεργειακού ισοζυγίου στην πτέρυγα λόγω της επιτάχυνσης του ρευστού πάνω από την πτέρυγα η στατική πίεση μειώνεται.

Στην κάτω πλευρά της πτέρυγας η μεταβολή της πίεσης είναι πολύ μικρότερη λόγω της μικρής καμπυλότητας της κάτω επιφάνειας. Στο χείλος εκφυγής όπου το ρευστό συγκλίνει πάλι θα πρέπει να έχει αποκατασταθεί η ίδια πίεση μεταξύ των τμημάτων του ρευστού που ρέουν πάνω και κάτω από την αεροτομή (συνθήκη Kutta).

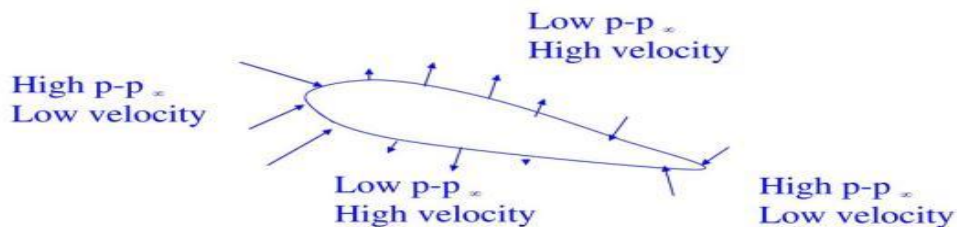
Για την ικανοποίηση της συνθήκης Kutta σε κάποιο μήκος στο άνω μέρος της αεροτομής η ροή θα πρέπει να επιβραδυνθεί. Υπάρχει η πιθανότητα αποκόλλησης αν η επιβράδυνση ξεκινήσει σε ένα σημείο όπου το οριακό στρώμα είναι στρωτό. Οι δυνάμεις πίεσης που οδηγούν σε αποκόλληση μπορούν να αντισταθμιστούν εάν αμέσως μετά τη μετάβαση από στρωτό σε τυρβώδες οριακό στρώμα, η ορμή κοντά στην επιφάνεια είναι αρκετά μεγάλη και το πάχος του στρώματος είναι σχετικά λεπτό.



Μία στρωτή αεροτομή χαρακτηρίζεται από υψηλή τιμή αναλογίας των συντελεστών άνωσης αντίστασης CL/CD για τιμές γωνίας προσβολής κάτω από τις σχεδιαστικές.

Σημαντικός παράγοντας για την απόδοση μιας Α/Γ ειδικότερα είναι και η ευαισθησία ως προς την τραχύτητα της επιφάνειας. Εάν μία αεροτομή έχει ευαισθησία ως προς την τραχύτητα της επιφάνειας, η καλή λειτουργία χάνεται στην περίπτωση έκθεσης των πτερυγίων σε σκόνη, βροχή ή έντομα. Μια τέτοια κατάσταση θα μπορούσε να αλλάξει την απόδοσή της Α/Γ μακροπρόθεσμα. Εάν η Α/Γ είναι εγκατεστημένη κοντά σε ακτή, υπάρχει σοβαρή πιθανότητα συγκέντρωσης αλατιού στα πτερύγια όταν ο άνεμος έρχεται από τη θάλασσα (Αποστολόπουλος 2016).

**Subtract off atmospheric Pressure p_∞ everywhere.
Resulting Pressure Forces acting on the Airfoil**



Εικόνα 37: Πεδίο πίεσης γύρω από πτέρυγα.



5. Χαρακτηριστικά Ισχύος του Ανέμου.

Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται καταρχήν το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με τα χαρακτηριστικά ισχύος του ανέμου, παράμετροι που την επηρεάζουν όπως το ύψος του πύργου, καθώς και τα εργαλεία στατιστικής με τα οποία παρέχεται μια συνολική εικόνα της ισχύος του ανέμου (κατανομή Weibull).

5.1 Ισχύς του Ανέμου.

Η ενέργεια που μεταφέρεται με τον άνεμο είναι κινητική και ορίζεται ως:

$$Ke = \left(\frac{1}{2}\right)mu^2 \quad (4.1)$$

Η ροή μάζας του ανέμου πυκνότητας ρ που διέρχεται από μια επιφάνεια A δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{m} = \rho \cdot u \cdot A \quad (4.2)$$

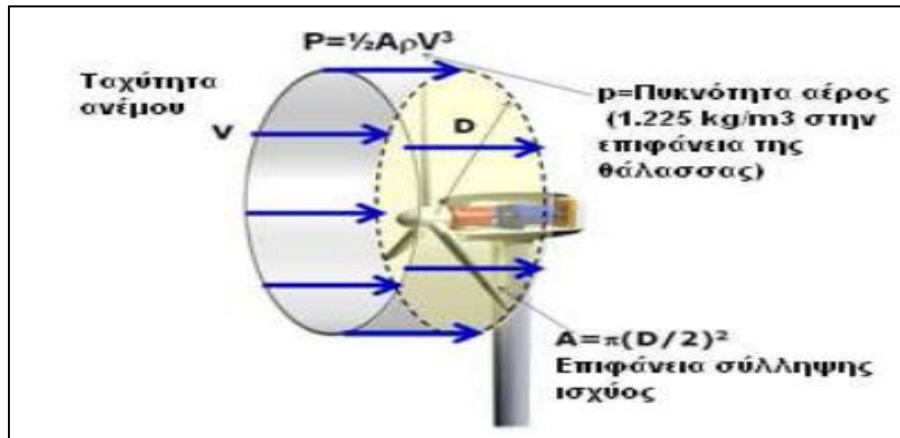
Η ισχύς του ανέμου τότε υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$\left. \begin{array}{l} Ke = \left(\frac{1}{2}\right)mu^2 \\ \dot{m} = \rho \cdot u \cdot A \end{array} \right\} \Rightarrow P = \frac{Ke}{t} = \frac{\left(\frac{1}{2}\right)mu^2}{t} = \left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{m}{t}\right)u^2 = \left(\frac{1}{2}\right)\dot{m}u^2 \Rightarrow P = \left(\frac{1}{2}\right)(\rho \cdot u \cdot A)u^2 \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \boxed{P = \left(\frac{1}{2}\right)(\rho \cdot A \cdot u^3)} \quad (4.3)$$

Όπου ρ : η πυκνότητα του αέρα, σε kg/m^3
η οποία παίρνει την τιμή 1.225 στους 15 °C και 1atm
 A : η επιφάνεια σύλληψης ισχύος από τα πτερύγια ή επιφάνεια της εγκάρσιας διατομής μέσω της οποίας διέρχεται ο αέρας σε m^2
 u : η ταχύτητα του ανέμου σε m/s
 P : ισχύς του ανέμου σε watt,

Σε αρκετές περιπτώσεις η ισχύς εκφράζεται ανά μονάδα επιφάνειας (W/m^2) και ονομάζεται ειδική ισχύς ή πυκνότητα ισχύος. Η ισχύς του ανέμου αυξάνει με τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι σε περίπτωση διπλασιασμού της ταχύτητας του ανέμου η ισχύς θα αυξηθεί κατά οκτώ φορές. Διαφορετικά και για λόγους σύγκρισης μπορεί κανείς να σκεφτεί ότι η ενέργεια που παράγεται από ταχύτητες ανέμου της τάξης των 20 km/h που πνέουν για 1 ώρα είναι ίση με αυτή που παράγεται σε ταχύτητες ανέμου 10 km/h για διάρκεια 8 ωρών είναι επίσης ίση με εκείνη που προκύπτει για ταχύτητα 5 km/h για διάρκεια 64 ωρών.

Επίσης η αιολική ισχύς είναι ανάλογη με την επιφάνεια σάρωσης του δρομέα της Α/Γ. Λόγω του ότι η επιφάνεια του δρομέα δίνεται ως $A=(\pi/4)D^2$ (για Α/Γ οριζόντιου άξονα) προκύπτει ότι η αιολική ισχύς είναι ανάλογη με το τετράγωνο της διαμέτρου της επιφάνειας σάρωσης των πτερυγίων. Δηλ. ο διπλασιασμός αυτής της διαμέτρου αυξάνει τη διαθέσιμη ισχύ κατά τέσσερις φορές. Αυτός είναι και ο λόγος που οι μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες είναι αρκετά ακριβότερες από τις μικρότερες.



Εικόνα 38: Διαθέσιμη Ισχύς Ανέμου.

5.2 Ιδεατή Καμπύλη Ισχύος Ανεμογεννήτριας.

Μια βασική πληροφορία που δίνουν οι κατασκευαστές για τις ανεμογεννήτριές τους είναι το διάγραμμα – καμπύλη ισχύος μιας Α/Γ που συνδέει την ταχύτητα του ανέμου με την αναμενόμενη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ από το πλήρες σύστημα, συμπεριλαμβανομένων των πτερυγίων, του κιβωτίου ταχυτήτων και της γεννήτριας. Κατά την ερμηνεία της καμπύλης ισχύος αρχικά θα πρέπει να συζητηθούν τα χαρακτηριστικά μεγέθη που εμπλέκονται κατά την αποτύπωσή της.

➤ Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (V_c cut-in-wind speed):

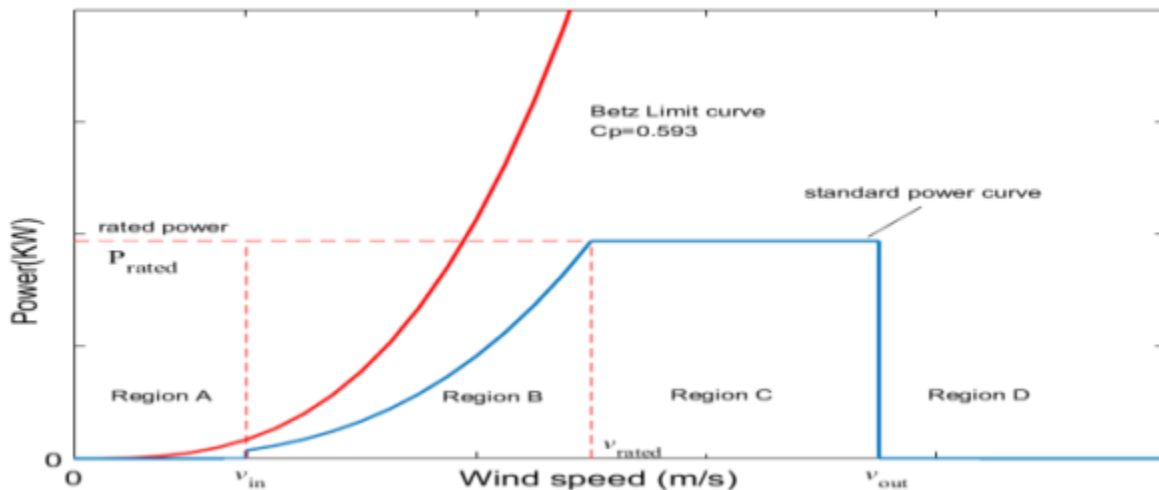
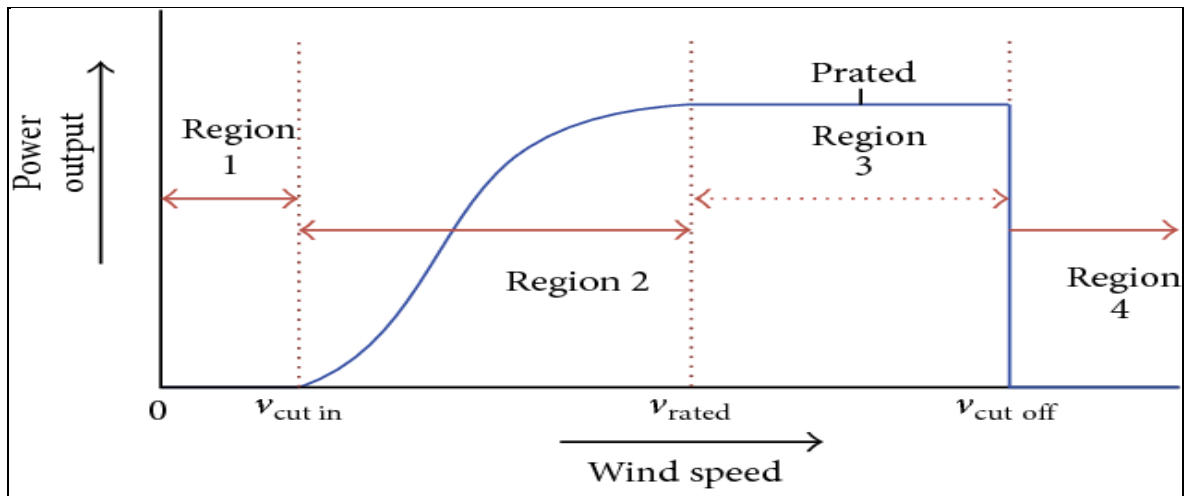
Σε συνθήκες ασθενούς πνοής ανέμων δηλ. όταν πνέουν άνεμοι χαμηλής ταχύτητας η πιο πιθανή εξέλιξη είναι μια χαμηλή ισχύς του ανέμου όχι ικανή να υπερκεράσει τις τριβές στο σύστημα κίνησης της Α/Γ. Ακόμα και αν αυτό συμβεί και η γεννήτρια καταφέρει να περιστραφεί, η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς δεν θα είναι αρκετά ικανή για την αντιστάθμιση της απαιτούμενης ισχύος από τις περιελίξεις πεδίου της γεννήτριας. Η ταχύτητα έναρξης είναι η ελάχιστη ταχύτητα που απαιτείται για την παραγωγή καθαρής (net) ηλεκτρικής ισχύος. Ταχύτητες χαμηλότερες της ταχύτητας έναρξης αν και φέρουν ισχύ του ανέμου, αυτή δεν είναι εκμεταλλεύσιμη από την Α/Γ. Δεδομένου ότι η περιεχόμενη ισχύς σε τιμές ταχυτήτων χαμηλότερες της ταχύτητας έναρξης ή αποκοπής είναι μικρή, προκύπτει ότι και η ενέργεια που μένει ανεκμετάλλευτη είναι ένα πολύ μικρό ποσοστό ως προς τις δυνατότητες της Α/Γ.

➤ Ονομαστική ταχύτητα ανέμου (V_R - rated wind speed):

Καθώς η ταχύτητα ανέμου αυξάνεται και ξεπερνά την ταχύτητα έναρξης παραγωγής, η ισχύς που δεσμεύεται από την Α/Γ αυξάνεται με τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Όταν η ταχύτητα του ανέμου φθάσει στην ονομαστική ταχύτητα V_R , η Α/Γ παράγει την ονομαστική ισχύ. Πάνω από ταχύτητα V_R πρέπει να υπάρχει κάποιος τρόπος απόρριψης της πλεονάζουσας ισχύος του ανέμου, ώστε να αποφευχθεί πιθανή αστοχία της γεννήτριας. Για Α/Γ ο έλεγχος της παραγόμενης ισχύος επιτυγχάνεται με μεταβολή του βήματος των πτερυγίων (pitch-controlled turbines), κατά την οποία ένα υδραυλικό σύστημα περιστρέφει αργά τα πτερύγια γύρω από τους άξονές τους κάποιες λίγες μοίρες ώστε να



μειώσουν ή να αυξήσουν την απόδοσή τους όταν οι συνθήκες το επιτρέπουν. Ο στόχος της μεθόδου αυτής είναι να μειωθεί η γωνία πρόσπτωσης των πτερυγίων όταν οι άνεμοι είναι υψηλοί.

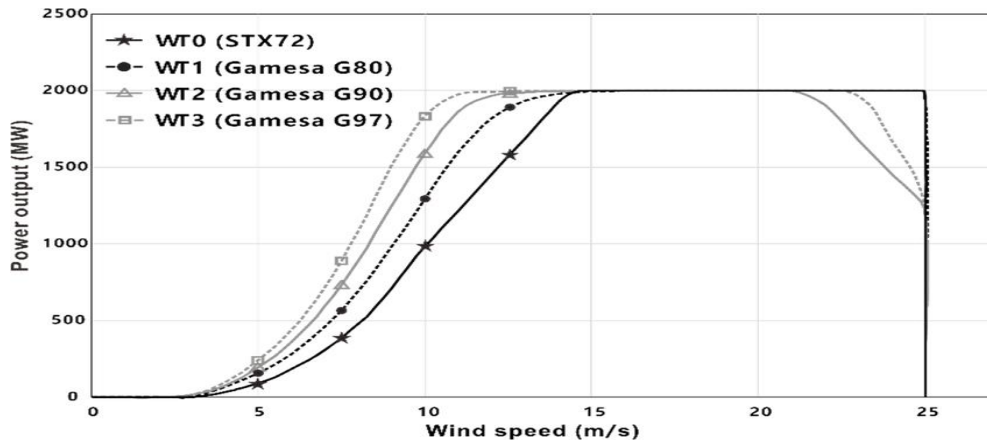


Εικόνα 39 Ιδεατή καμπύλη ισχύος. Σημεία εκκίνησης και διακοπής λειτουργίας.

Για μηχανές με παθητικό έλεγχο ισχύος με απώλεια στήριξης (passive stall-controlled machines), τα πτερύγια σχεδιάζονται ώστε να μειώνουν αυτόματα την απόδοσή τους όταν πνέουν ισχυροί άνεμοι. Αντίθετα με το ενεργητικό σύστημα ελέγχου ισχύος απώλειας στήριξης (active stall-controlled machines), τα πτερύγια περιστρέφονται ακριβώς όπως κάνουν με την προσέγγιση του ελέγχου βήματος, αλλά αντί να μειώσουν την γωνία πρόσπτωσης των πτερυγίων σε ισχυρούς ανέμους την αυξάνουν για να ενισχύσουν την απώλεια στήριξης (stall).

➤ Ταχύτητα διακοπής λειτουργίας (V_F - cut-out or furling wind speed):

Όταν η ταχύτητα περιστροφής της Α/Γ γίνεται πολύ μεγάλη λόγω των ισχυρών ανέμων που πνέουν δημιουργείται μεγάλος κίνδυνος καταστροφής της Α/Γ. Σε αυτή την ταχύτητα του ανέμου V_F , που ονομάζεται ταχύτητα διακοπής λειτουργίας ('furling' wind speed), η μηχανή θα πρέπει να τερματίσει τη λειτουργία της. Πάνω από την V_F , τα μηχανικά φρένα κλειδώνουν τον άξονα του δρομέα στη θέση του, έτσι ώστε η ισχύς εξόδου να είναι μηδενική.



Εικόνα 40: Σύγκριση καμπυλών ισχύος μοντέλων Α/Γ εταιρίας GAMESA

5.3 Επίδραση ταχύτητας από το Υψόμετρο.

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη με τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου, η οικονομική επίπτωση ακόμα και σε μικρές αυξήσεις στην ταχύτητα του ανέμου μπορεί να είναι σημαντική. Η επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων ανέμου είναι η εγκατάσταση της Α/Γ σε έναν υψηλότερο πύργο.

Σε ύψη μερικών εκατοντάδων μέτρων από το έδαφος ο αέρας επιβαρύνεται από την τριβή του με την επιφάνεια της γης, δημιουργείται ένα οριακό στρώμα που στην ουσία επιβραδύνει τον αέρα μέχρι κάποιο ύψος όπου ο αέρας μένει ανεπηρέαστος, όσο πιο τραχιά είναι η επιφάνεια τόσο μεγαλύτερο είναι το οριακό στρώμα και άρα και η επιβράδυνση του αέρα. Λείες επιφάνειες, όπως η επιφάνεια της θάλασσα, δεν προσδίδουν μεγάλη αντίσταση και η μεταβολή της ταχύτητας με το υψόμετρο είναι αρκετά μικρότερη. Στην άλλη ακραία περίπτωση, οι άνεμοι στην επιφάνεια ενός δάσους ή μίας πόλης επιβραδύνονται σημαντικά από ψηλά εμπόδια. Το μέγεθος της επίδρασης της ταχύτητας λόγω της τραχύτητας της επιφάνειας είναι:

$$\frac{u}{u_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^{\alpha} \quad (4.4)$$

Όπου,

u η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος H

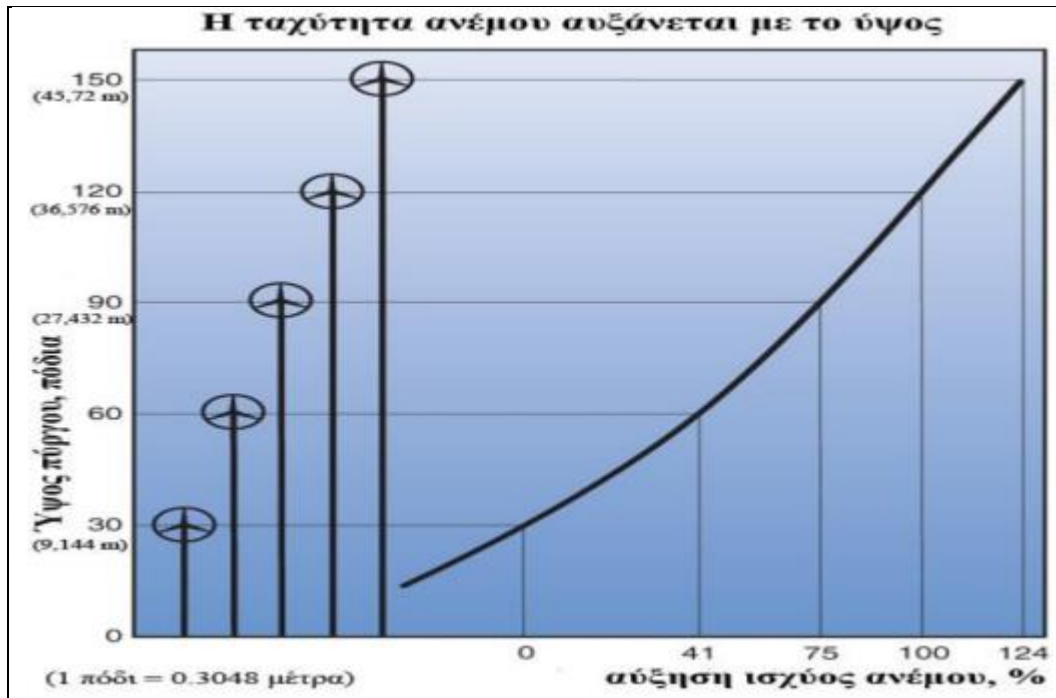
u_0 η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος H_0 (συνήθως ύψος αναφοράς είναι τα 10m)

α ο συντελεστής τριβής – εκθετικός δείκτης ισχύος.

Ο συντελεστής τριβής α είναι μια συνάρτηση του εδάφους πάνω στο οποίο «τρέχει» ο άνεμος. Συνηθέστερα, για προσεγγιστικούς υπολογισμούς σε «ανοικτά» εδάφη, μια τιμή 1/7 (ο κανόνας του ενός εβδόμου) χρησιμοποιείται για τον α . Η εξίσωση που αναφέρθηκε νωρίτερα συνηθέστερα χρησιμοποιείται στις ΗΠΑ, στην Ευρώπη υπάρχει μια εναλλακτική διατύπωση η οποία είναι:

$$\frac{u}{u_0} = \frac{\ln(H/l)}{\ln(H_0/l)} \quad (4.5)$$

Όπου, l το ονομαζόμενο μήκος τραχύτητας.



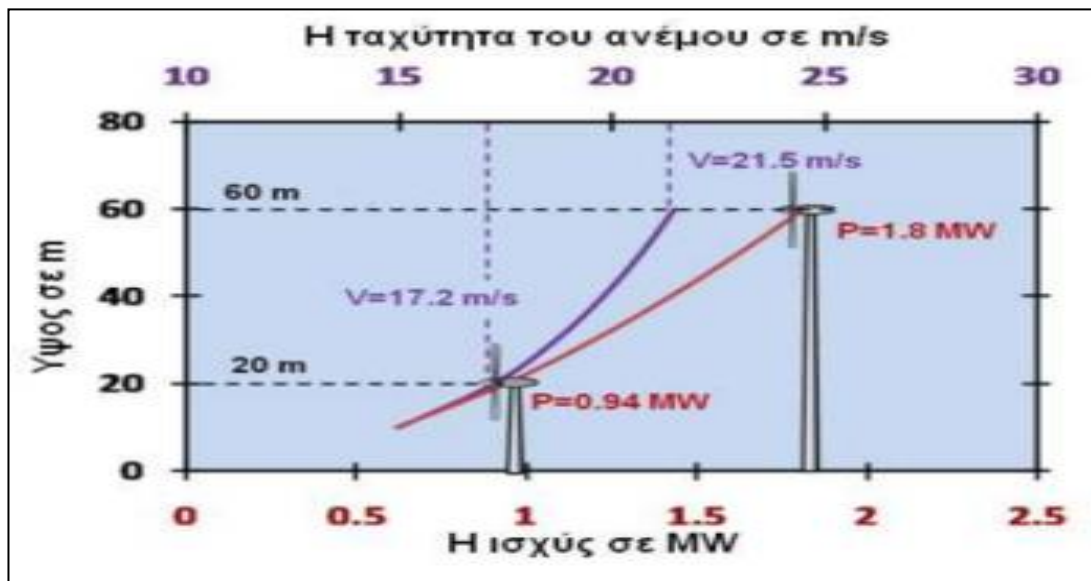
Εικόνα 41: Ισχύς ανέμου ως προς το ύψος του πύργου της Α/Γ.

Η εξίσωση αυτή προτιμάται έναντι της πρώτης διότι έχει μια θεωρητική βάση αεροδυναμικής. Όταν η ατμόσφαιρα είναι θερμικά ουδέτερη (δηλαδή, ψύχεται με ρυθμό -9.8 C/km), η ροή του αέρα μέσα στο οριακό στρώμα θεωρητικά μεταβάλλεται λογαριθμικά, ξεκινώντας με μηδενική ταχύτητα ανέμου σε μια απόσταση πάνω από το έδαφος ίση με το μήκος τραχύτητας. Προφανώς, τόσο ο εκθετικός όσο και η λογαριθμική εκδοχή μας δίνουν μόνο μια πρώτη προσέγγιση για τη μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου σε σχέση με το υψόμετρο έτσι ώστε να είναι δυνατό μια προμελέτη. Με δεδομένο ότι η ισχύς του ανέμου μεταβάλλεται με τον κύβο της ταχύτητας του, μπορούμε να ξαναγράψουμε την εκθετική εξίσωση για να δείξουμε τη σχετική ισχύ του ανέμου στο ύψος H σε σχέση με την ισχύ στο ύψος αναφοράς H_0 .

$$\frac{P}{P_0} = \left(\frac{1/2 \cdot \rho A u^3}{1/2 \cdot \rho A u_0^3} \right) = \left(\frac{u}{u_0} \right)^3 = \left(\frac{H}{H_0} \right)^{3\alpha} \quad (4.6)$$

Η αιολική ισχύς σε άλλα υψόμετρα σε σχέση με εκείνη στα 10m δείχνει την πολύ σημαντική επίδραση της εκθετικής σχέσης μεταξύ της ταχύτητας του ανέμου και της ισχύος. Ακόμη και για μια ομαλή επιφάνεια του εδάφους, για παράδειγμα σε μια υπεράκτια περιοχή, η ισχύς διπλασιάζεται όταν το ύψος αυξάνεται από τα 10m στα 100m. Για μια τραχιά επιφάνεια με συντελεστή τριβής $\alpha=0.3$, η ισχύς οκταπλασιάζεται στα 100m.

Για παράδειγμα στο παρακάτω διάγραμμα ταχύτητας ανέμου συναρτήσει ισχύος ανέμου-ύψους ανεμογεννήτριας φαίνεται ότι σε ύψος 10 μέτρων η ταχύτητα του ανέμου είναι 15 m/s ενώ σε ύψος 20 μέτρων η ταχύτητα είναι περίπου 17.2 m/s έχοντας διαθέσιμη ισχύ στον άνεμο 0.94 MW. Στα 60 μέτρα ύψος η ταχύτητα ανέμου είναι 21.5 m/s και η διαθέσιμη ισχύς 1.8 MW.



Εικόνα 42: Ισχύς – ταχύτητα ανέμου ως συνάρτηση του ύψους πύργου της Α/Γ.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται κάποιες χαρακτηριστικές τιμές για τον εκθετικό συντελεστή α και την τραχύτητα του εδάφους καθώς αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι η αναγωγή αυτή είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της ταχύτητας στο ύψος της Α/Γ. Στη συνέχεια θα φανεί ότι δεν είναι εφικτή η εκμετάλλευση όλης της ισχύος του ανέμου λόγω φυσικών ορίων (όριο Betz= 0,539) άλλα και λόγω απωλειών στο στρόφείο, στη γεννήτρια και στο κιβώτιο ταχυτήτων.

Πίνακας 4.1. Τιμές για τον εκθετικό συντελεστή και το μήκος τραχύτητας (Τόσκας – Μάρης 2022).

Χαρακτηριστικά εδάφους	Εκθετικός Συντελεστής (α)
Ομαλό, σκληρό έδαφος, ήρεμα νερά	0,10
Ψηλό γρασίδι σε επίπεδο εδάφους	0,15
Καλλιέργειες, φράκτες και θάμνοι	0,20
Δασώδης περιοχή, δέντρα	0,25
Μικρή πόλη με δέντρα και θάμνους	0,30
Μεγάλη πόλη με ψηλά κτίρια	0,40

5.4 Διόρθωση Ισχύος ως προς την Πυκνότητα του Αέρα.

Για τον υπολογισμό της πραγματικής ισχύος του ανέμου μιας περιοχής θα πρέπει να γίνεται μια διόρθωση στην πυκνότητα του αέρα αφού το μέγεθος αυτό συμμετέχει στη σχέση της ισχύος. Πρακτικά η πυκνότητα του αέρα μεταβάλλεται ανεπαίσθητα συνήθως με τη θερμοκρασία, οι διακυμάνσεις όμως της θερμοκρασίας στο πέρασμα των εποχών του έτους ενδέχεται να επιφέρουν μια πιο σημαντική μεταβολή στην



πυκνότητα καθώς μεταβάλλεται και το υψόμετρο. Γενικά η θερμοκρασία μειώνεται ανεπαίσθητα με την αύξηση του υψόμετρου ενώ η πίεση ελαττώνεται αισθητά. (Μαρνέλλος 2020). Η μεταβολή της πυκνότητας με το ύψος περιγράφεται από τη σχέση:

$$\rho = \rho_0 - 1.194 \cdot 10^{-4} \cdot H \quad (\text{kg} / \text{m}^3) \quad (4.7)$$

όπου ρ_0 η πυκνότητα του αέρα σε κανονικές συνθήκες ($\rho_0=1.225 \text{ kg/m}^3$)
Η το υπό μελέτη υψόμετρο (m).

Έτσι π.χ κατά την παραπάνω εξίσωση υπολογίζεται ότι σε ύψος $H=500\text{m}$ η πυκνότητα του αέρα λαμβάνει τιμή 1.165 kg/m^3 , έχει υποστεί δηλ. μια μείωση $\sim 5\%$, που συνακόλουθα θα επιφέρει μια αντίστοιχη μείωση στην ισχύ που μεταφέρει ο άνεμος σε μια περιοχή.

5.5 Κατανομή Weibull.

Η κατανομή Weibull είναι ένα μοντέλο το οποίο μπορεί να περιγράψει το αιολικό δυναμικό μια περιοχής βάσει του μικρού αριθμού παραμέτρων, ώστε να εκτιμηθεί η ενέργεια του ανέμου. Η κατανομή Weibull περιγράφει ικανοποιητικά τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά σε περιοχές εύκρατης ζώνης και για ύψος μέχρι 100 μέτρα και εκφράζεται από δύο κρίσιμες παραμέτρους,

- την k που είναι η παράμετρος μορφής και
- την c που είναι η παράμετρος κλίμακας.

Γενικά μεγάλες τιμές αυτών προϋποθέτουν την ύπαρξη υψηλού αιολικού δυναμικού.

Η μέθοδος Weibull εκφράζεται από την σχέση:

$$f(u) = \left(\frac{c}{k}\right) \left(\frac{u}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{u}{c}\right)^k\right] \quad (4.7)$$

Όπου u η ταχύτητα του ανέμου
 c η παράμετρος κλίμακας (scale factor)
 k η παράμετρος μορφής. (shape factor)

Η ποσότητα $f(u) du$ εκφράζει την πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται μεταξύ της τιμής $u-du$ και $u+du$. Έτσι η μέση ετήσια τιμή της ταχύτητας του ανέμου είναι:

$$u_{mean} = \int_0^{\infty} u \cdot f(u) du \quad (4.8)$$

Μετά από εκτέλεση αναλυτικών πράξεων προκύπτει:

$$u_{mean} = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (4.9)$$

Όπου, Γ η συνάρτηση Γάμμα που δίνεται από την σχέση:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (4.10)$$



Οι παράμετροι c και k μεταβάλλονται με το ύψος και για τα πρώτα 100 μέτρα υψομέτρου μπορούν να εκτιμηθούν με καλή ακρίβεια. Οι παράμετροι c , k της κατανομής Weibull υπολογίζονται για κάθε τοποθεσία με βάση τη μέση ταχύτητα της επιλεγείσας προς μελέτη περιοχής. Ενδεικτικά δίνονται τιμές των παραμέτρων για περιοχές της χώρας.

Πίνακας 4.2. Παράμετροι c , k ως προς διάφορες περιοχές της Ελλάδας.

Τοποθεσία	k	c
Σητεία	1,32	5,53
Ηράκλειο	1,63	4,72
Χανιά	1,52	4,60
Κύθηρα	1,27	5,78
Μήλος	1,41	5,86
Ρόδος	2,15	7,24
Θήρα	1,20	5,20

Πίνακας 4.3: Υπολογισμός συντελεστή k - παράμετρος μορφής. (shape factor) ως προς την ένταση του ανέμου (Justus et al. 1977).

Ένταση ανέμου	Ταχύτητα	k
Χαμηλή	$u < 4$ m/s	$1.05 \sqrt{u}$
Υψηλή	$u > 4$ m/s	$0.94 \sqrt{u}$

Η παράμετρος κλίμακας c υπολογίζεται με τη βοήθεια της συνάρτησης Γάμμα σύμφωνα με τη σχέση:

$$c = \left[\frac{u_{mean}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \right] \quad (4.11)$$

Αναφορικά με τις παραμέτρους μορφής και κλίμακας (k, c) και την επίδραση στην κατανομή Weibull προκύπτει ότι:

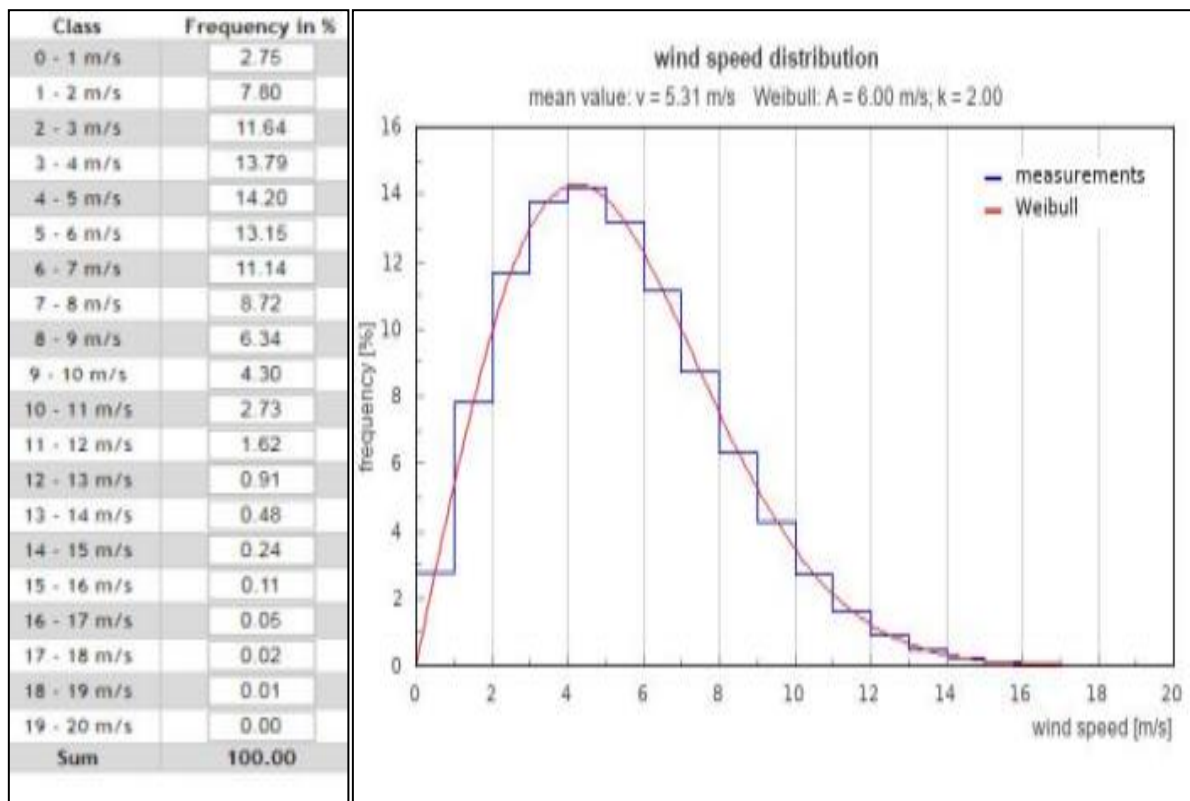
- Όσο υψηλότερη η τιμή της παραμέτρου μορφής k τόσο μικρότερη η διασπορά των ταχυτήτων γύρω από τη μέση τιμή,
- Όσο υψηλότερη η τιμή της c τόσο μικρότερη η τιμή της μέγιστης πιθανότητας.

Στη συνέχεια δίνονται παραδείγματα κατανομών Weibull σε περιοχές της Ελλάδας ανάλογα με το αιολικό δυναμικό (χαμηλό, μεσαίο και υψηλό). Έτσι μετά την

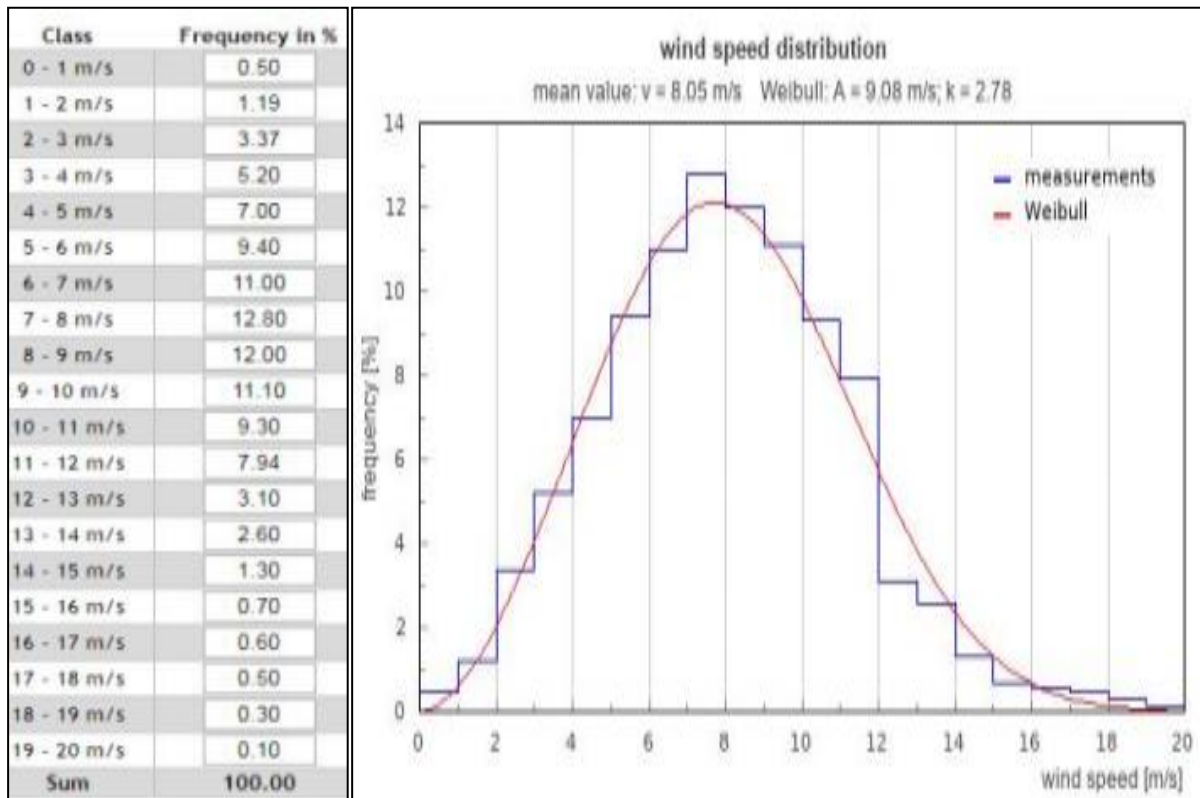


προσεγγιστική και τελική εκτίμηση του αιολικού δυναμικού τόσο αναλυτικά όπως παραπάνω όσο και από την διαδικασία συλλογής δεδομένων από μετεωρολογικό ιστό ακολουθεί η στατιστική επεξεργασία δεδομένων τα όποια απεικονίζονται τελικά στο λεγόμενο ροδόγραμμα ταχύτητας ανέμου της συγκεκριμένης υπό μελέτη περιοχής – τοποθεσίας.

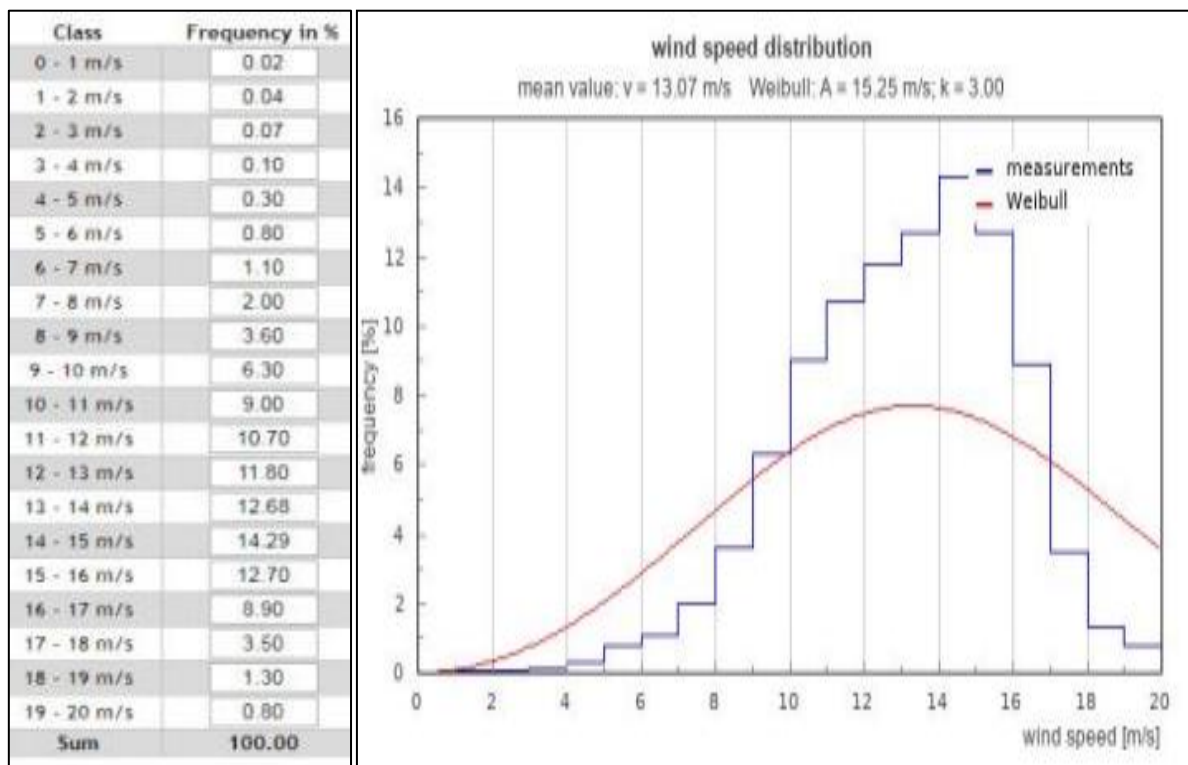
Το ροδόγραμμα είναι ένα γραφικό εργαλείο που χρησιμοποιείται από τους μετεωρολόγους για μια συνοπτική εικόνα του τρόπου κατανομής της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Συνήθως ένα ροδόγραμμα χρησιμοποιεί ένα πολικό σύστημα συντεταγμένων του πλέγματος με ακτινικές γραμμές όπου πάνω σε αυτές καταγράφεται η εκατοστιαία συχνότητα των ανέμων. Η συχνότητα των ανέμων σε μια χρονική περίοδο, σχεδιάζεται από την κατεύθυνση του ανέμου, και με χρωματικές ζώνες που δείχνουν και τις κλίμακες ταχύτητας ανέμου. Η κατεύθυνση της μεγαλύτερης ακτίνας δείχνει την κατεύθυνση του ανέμου με τη μεγαλύτερη συχνότητα.



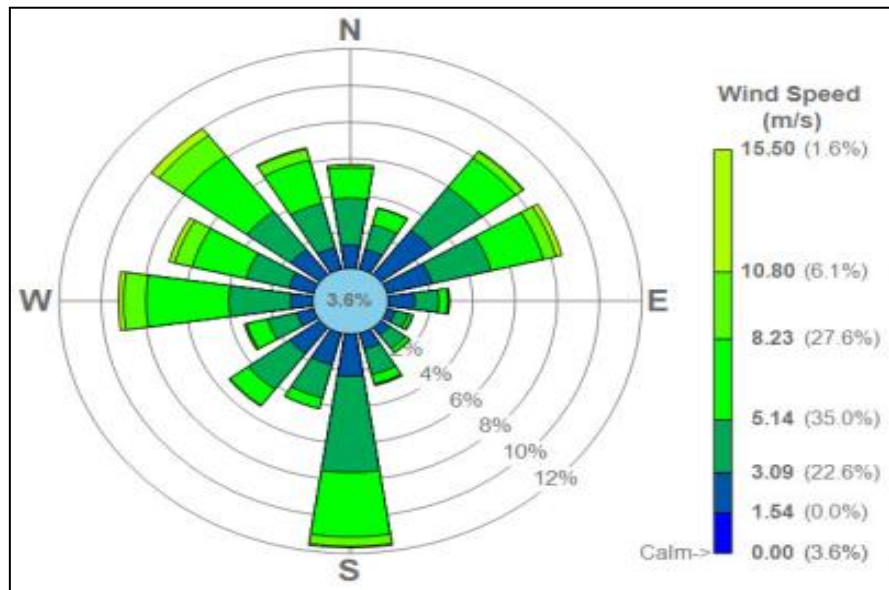
Εικόνα 43: Κατανομή Weibull χαμηλού αιολικού δυναμικού (Ασλάνης Κυριακόπουλος 2020).



Εικόνα 44: Κατανομή Weibull μετρίου αιολικού δυναμικού(Ασλάνης Κυριακόπουλος 2020) .



Εικόνα 45: Κατανομή Weibull υψηλού αιολικού δυναμικού (Ασλάνης Κυριακόπουλος 2020).

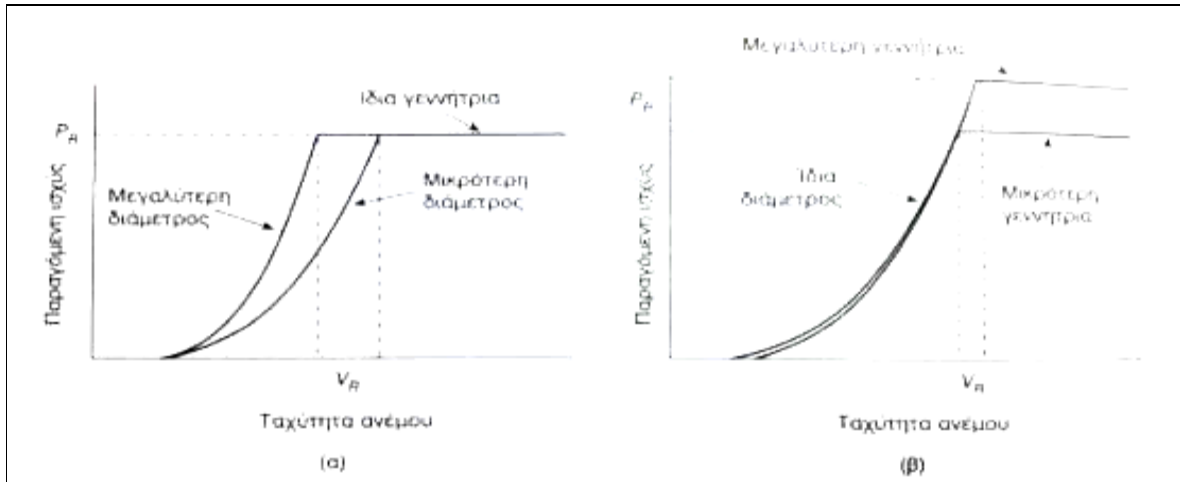


Εικόνα 46. Παράδειγμα ροδογράμματος.

5.6 Καμπύλες Πραγματικής Ισχύος.

Η ιδεατή καμπύλη ισχύος παρέχει ένα εργαλείο με το οποίο μπορούν να εξεταστούν συνδυασμοί μεταξύ της διαμέτρου του δρομέα και του μεγέθους της Α/Γ ως τρόποι για την αύξηση της παραγόμενης ενέργειας από μια Α/Γ. Με την αύξηση της διαμέτρου του δρομέα και διατηρώντας την ίδια ηλεκτρική γεννήτρια, η καμπύλη ισχύος μετατοπίζεται προς τα αριστερά, με αποτέλεσμα η ονομαστική ισχύς να επιτυγχάνεται σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου. Η μέθοδος αυτή δηλ. αυξάνει την ισχύ εξόδου για χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου. Από την άλλη πλευρά, διατηρώντας τον ίδιο δρομέα αλλά αυξάνοντας το μέγεθος της ηλεκτρικής γεννήτριας επιτρέπεται στην καμπύλη ισχύος να συνεχίσει την αυξητική της τάση μέχρι μια νέα ονομαστική ισχύ. Για μικρές ταχύτητες ανέμου, δεν υπάρχει μεγάλη αλλαγή, αλλά σε μια περιοχή με υψηλές ταχύτητες ανέμου, η αύξηση της ονομαστικής ισχύος της γεννήτριας είναι μια καλή στρατηγική.

Οι κατασκευαστές συνήθως προσφέρουν μια ποικιλία από ανεμογεννήτριες με διάφορες διαμέτρους δρομέα και διαφορετικά μεγέθη γεννητριών έτσι ώστε οι πελάτες να μπορούν να επιλέξουν την κατάλληλη για να ταιριάξουν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου με την κατάλληλη μηχανή. Σε περιοχές με σχετικά χαμηλές ταχύτητες ανέμου συχνά χρησιμοποιούνται ανεμογεννήτριες με μεγαλύτερη διάμετρο δρομέα. Σε περιοχές με σχετικά υψηλές ταχύτητες ανέμου, είναι καλύτερο να αυξηθεί το μέγεθος της γεννήτριας.



Εικόνα 47 (α) Αύξηση της διαμέτρου του δρομέα με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ισχύς σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου (β) Αύξηση του μεγέθους της γεννήτριας με αποτέλεσμα αύξηση της ισχύος σε υψηλότερες ταχύτητες.



6. Χαρακτηριστικά Αιολικού Πάρκου (Α/Π Τρίκορφα).

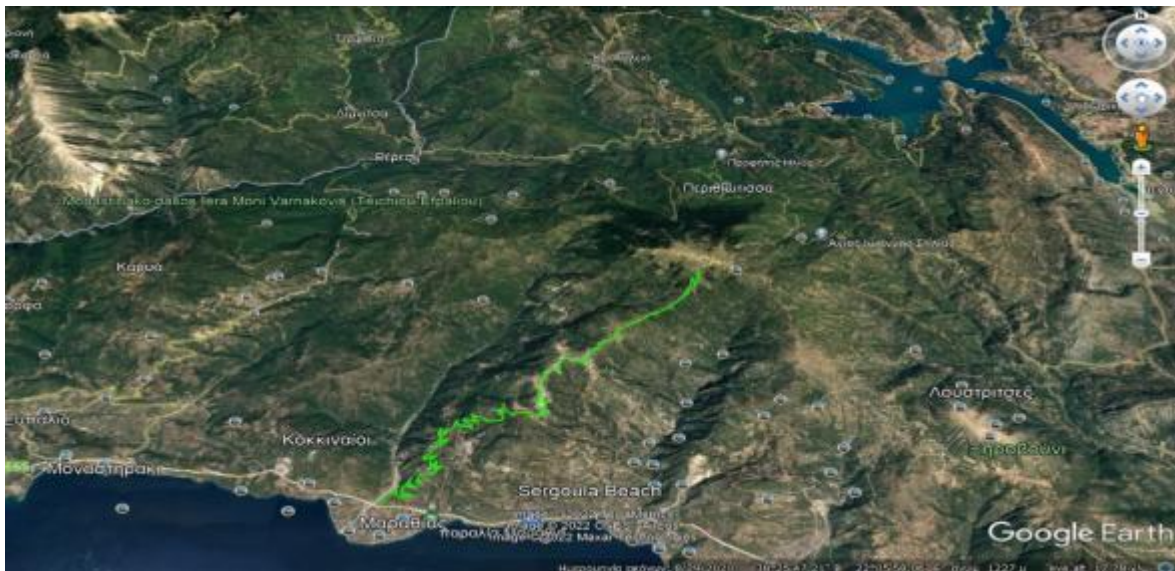
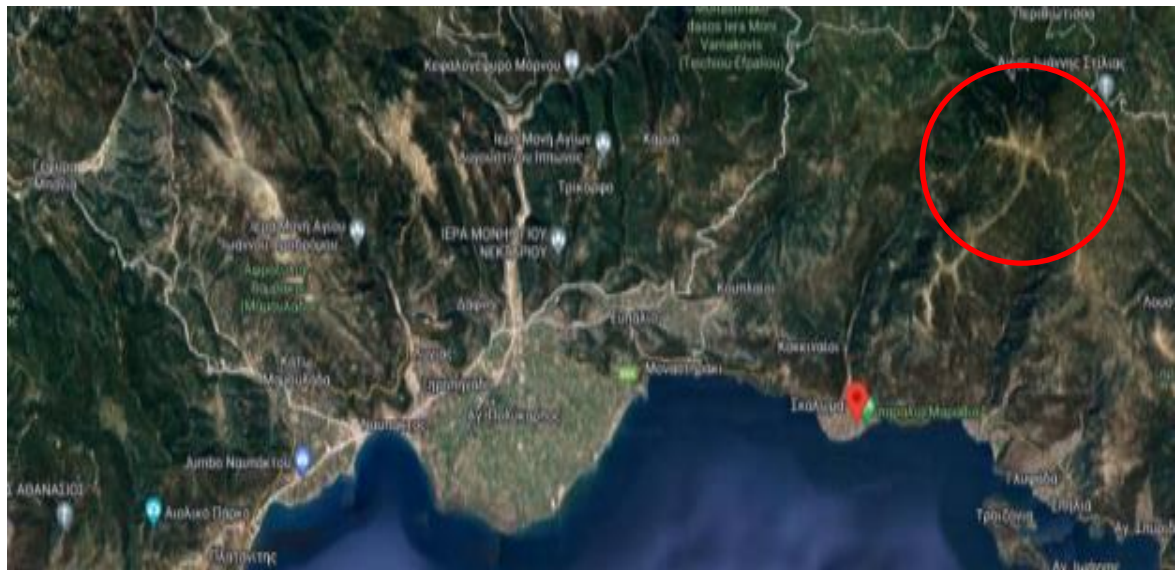
Οι κύριοι παράγοντες για την επιλογή της θέσης εγκατάστασης ενός συστήματος ανεμογεννητριών είναι οι ακόλουθοι:

- ✓ Αιολικό δυναμικό: Όσο καλύτερη γνώση της συμπεριφοράς του ανέμου (ένταση, διακυμάνσεις σε ταχύτητα και διεύθυνση, ριπές, τόσο καλύτερη εκτίμηση μπορεί να γίνει από τον μηχανικό για την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ που είναι και το ζητούμενο από μια εγκατάσταση Α/Π.
- ✓ Περιβάλλον: Η εγκατάσταση δεν θα πρέπει να έχει αρνητική επίδραση στο περιβάλλον. Η επιλογή της θέσης γίνεται πάντα σε συμφωνία με τους περιβαλλοντικούς όρους κατά την κείμενη νομοθεσία.
- ✓ Διασύνδεση: Η λειτουργία του συστήματος θα πρέπει να είναι συμβατή (εγγύτητα, διασύνδεση) με τη λειτουργία του τοπικού ηλεκτρικού δικτύου.
- ✓ Ακραία καιρικά φαινόμενα: Κατά την επιλογή θέσης θα πρέπει να έχουν ληφθεί υπόψη πιθανά ακραία καιρικά φαινόμενα (πάγος, θυελλώδεις άνεμοι, ριπές κ.λπ.). Ειδικά για ορεινές περιοχές και υψίπεδα όπου ο πάγος είναι συχνό φαινόμενο θα πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα αφού ο πάγος όταν καλύπτει κατασκευές αυξάνει σημαντικά τα στατικά και δυναμικά φορτία. Όλα τα υποσυστήματα της Α/Γ και οι γραμμές μεταφοράς θα πρέπει να έχουν υπολογιστεί ώστε να μην υπερβαίνουν τα όρια αντοχής. Επίσης, όταν επικάθονται μεγάλες ποσότητες πάγου στα πτερύγια υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να εκτοξεύονται κατά την περιστροφή των πτερυγίων προς γειτονικές Α/Γ με αποτέλεσμα πιθανές βλάβες των πτερυγίων. Η παύση λειτουργίας για τον καθαρισμό των πτερυγίων μιας Α/Η από πάγο θα είχε σημαντική αρνητική οικονομική επίπτωση στην παραγωγή ενέργειας ιδίως σε περιοχές που οι χιονοπτώσεις είναι συχνό φαινόμενο.

6.1 Χωροθέτηση Α/Π Τρίκορφα – Επιλογή Α/Γ.

Η τοποθεσία του Α/Π βρίσκεται ανατολικά της Ναυπάκτου, αποτελείται από 7 Α/Γ τοποθετημένες σε σειρά σύμφωνα με το οδικό δίκτυο της περιοχής. Το Α/Π είναι τοποθετημένο στην κορυφή ορεινού όγκου που ανήκει ευρύτερα στο νομό Φωκίδας.

Οι Α/Γ που συνιστούν το Α/Π είναι τύπου VESTAS V100-2.0 MW. Ο τύπος υποδεικνύει ότι η διάμετρος του ρότορα είναι 100m ενώ η ονομαστική ισχύς είναι 2MW. Το ύψος του πύργου – πυλώνα είναι 80m και η επιφάνεια σάρωσης είναι 7,854m². Περισσότερα τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου τύπου Α/Γ δίνονται στα τεχνικά χαρακτηριστικά της κατασκευάστριας εταιρίας (<https://www.vestas.com/en>). Έτσι η ονομαστική ισχύς όλου του Α/Π είναι 14MW.

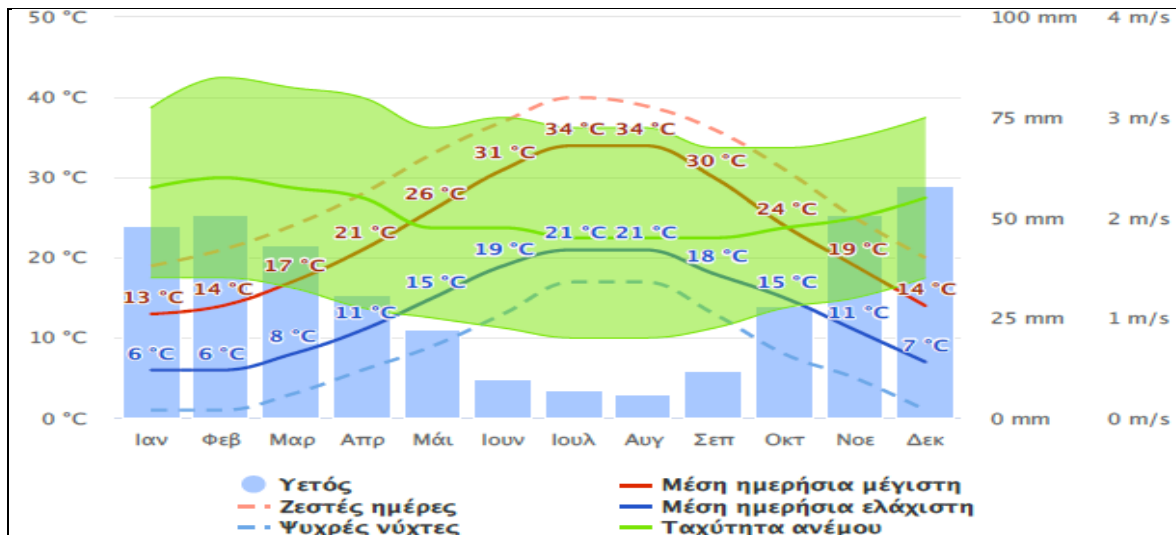


Εικόνα 48: Τοποθεσία εγκατάστασης Α/Π Τρίκορφα.



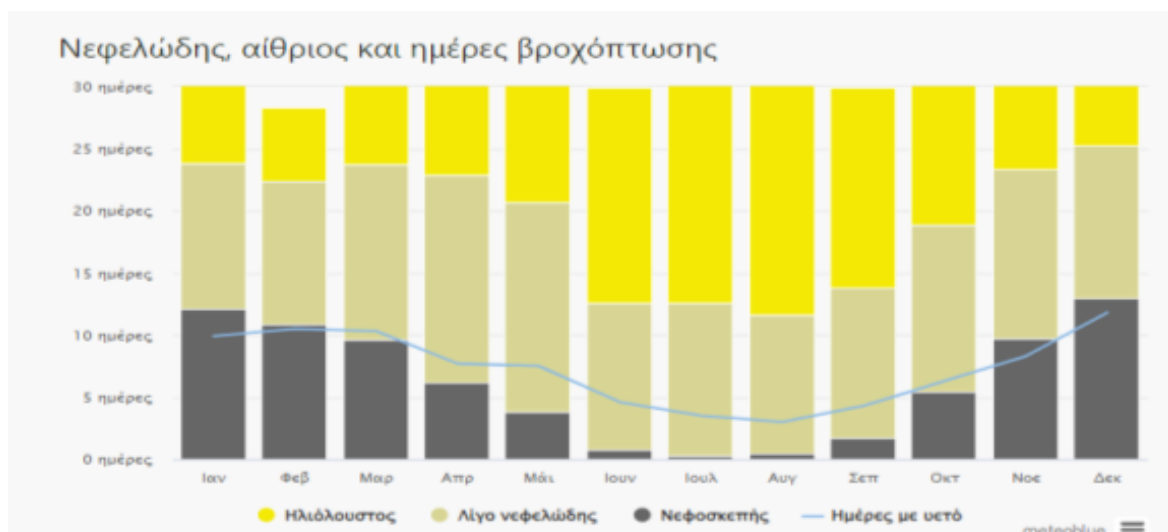
6.2 Ανεμολογικά – Κλιματικά Δεδομένα Α/Π Τρίκορφα.

Μετά την καταγραφή της τοποθεσίας του Α/Π για την εκτίμηση της παραγόμενης ισχύος καταγράφονται τα απαραίτητα ανεμολογικά δεδομένα της περιοχής. Τα δεδομένα έχουν ληφθεί από τον ιστότοπο www.meteoblue.com για την περιοχή της Ναυπάκτου από το μετεωρολογικό σταθμό του Αράξου που απέχει ~45km.



Εικόνα 49: Ετήσια θερμοκρασιακή κατανομή και εύρος διακύμανσης ταχύτητας ανέμου στην περιοχή της Ναυπάκτου (www.meteoblue.com).

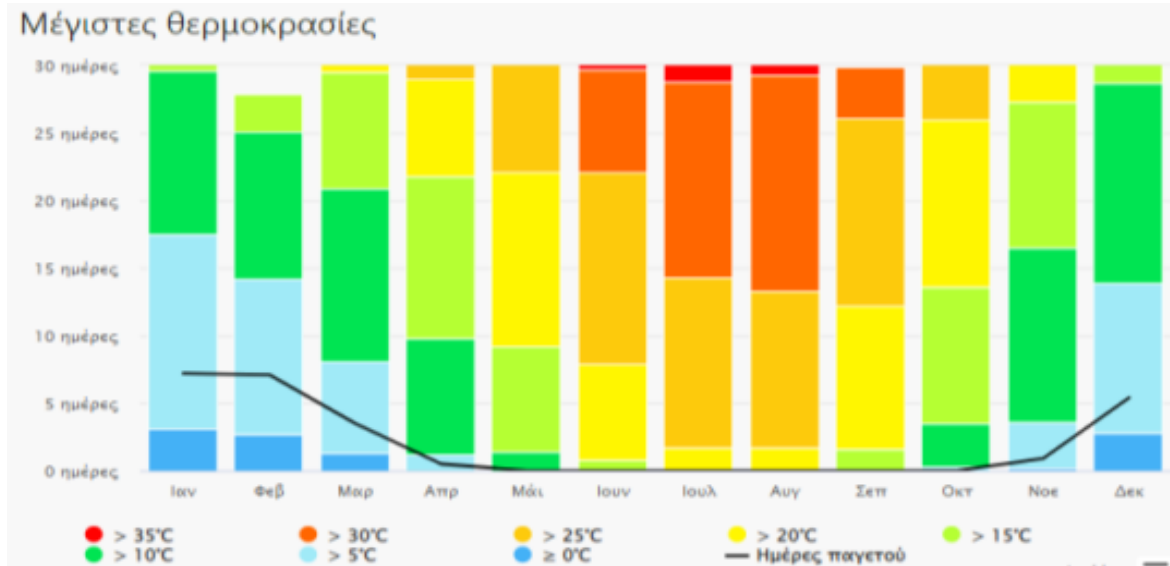
Η «ημερήσια μέση μέγιστη» (συμπαγής κόκκινη γραμμή) δείχνει τη μέγιστη θερμοκρασία μιας μέσης ημέρας για κάθε μήνα για Ναύπακτο. Ομοίως, "ημερήσια μέση ελάχιστη" (συμπαγής μπλε γραμμή) δείχνει τη μέση ελάχιστη θερμοκρασία. Οι ζεστές ημέρες και κρύες νύχτες (διακεκομμένες κόκκινες και μπλε γραμμές) δείχνουν τον μέσο όρο της πιο ζεστής μέρας και πιο κρύας νύχτας του κάθε μήνα για τα τελευταία 30 χρόνια. Αναφορικά με την πνοή του ανέμου φαίνεται ότι διατηρείται στα 2m/s περίπου (Εικ.49).



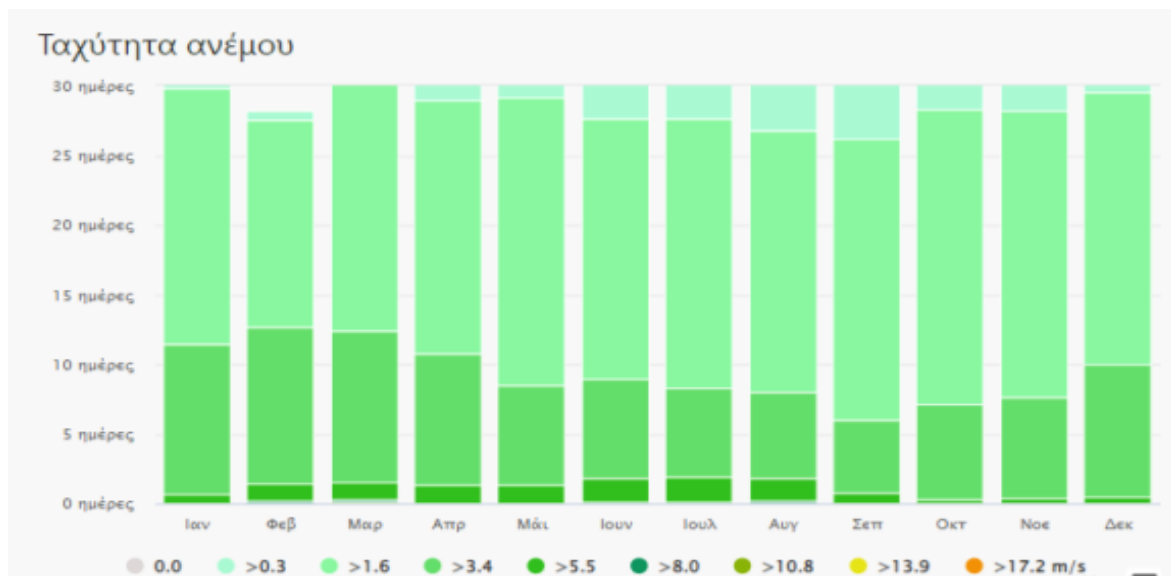
Εικόνα 50: Ετήσιες καιρικές συνθήκες στην περιοχή της Ναυπάκτου (www.meteoblue.com).



Στην Εικ.50 δίνεται ο μηνιαίος αριθμός ημερών με καιρό αίθριο, λίγο νεφελώδη, νεφοσκεπή και τις ημέρες με βροχή. Οι ημέρες με λιγότερο από 20% νεφοκάλυψη θεωρούνται ως αίθριες, με 20-80% νεφοκάλυψη ως νεφελώδεις και με περισσότερα από 80%, ως νεφοσκεπείς.



Εικόνα 51: Κατανομή μέγιστων θερμοκρασιών περιοχής Ναυπάκτου (www.meteoblue.com).



Εικόνα 52: Ετήσια κατανομή ταχύτητας ανέμων στην περιοχή Ναυπάκτου (www.meteoblue.com).

Στην Εικ.51 δίνεται η ετήσια κατανομή μεγίστων θερμοκρασιών εμφανίζεται δηλ. το πλήθος ημερών ανά μήνα που επιτυγχάνονται συγκεκριμένες θερμοκρασίες. Ακόμα στην Εικ.52 δίνεται η κατανομή των ανέμων που πνέουν στην περιοχή. Εμφανίζεται δηλ. το πλήθος ημερών ανά μήνα κατά τις οποίες ο άνεμος φθάνει μια ορισμένη ταχύτητα. Στη συνέχεια δίνονται αναλυτικά οι τιμές ταχυτήτων του ανέμου ανά μήνα.

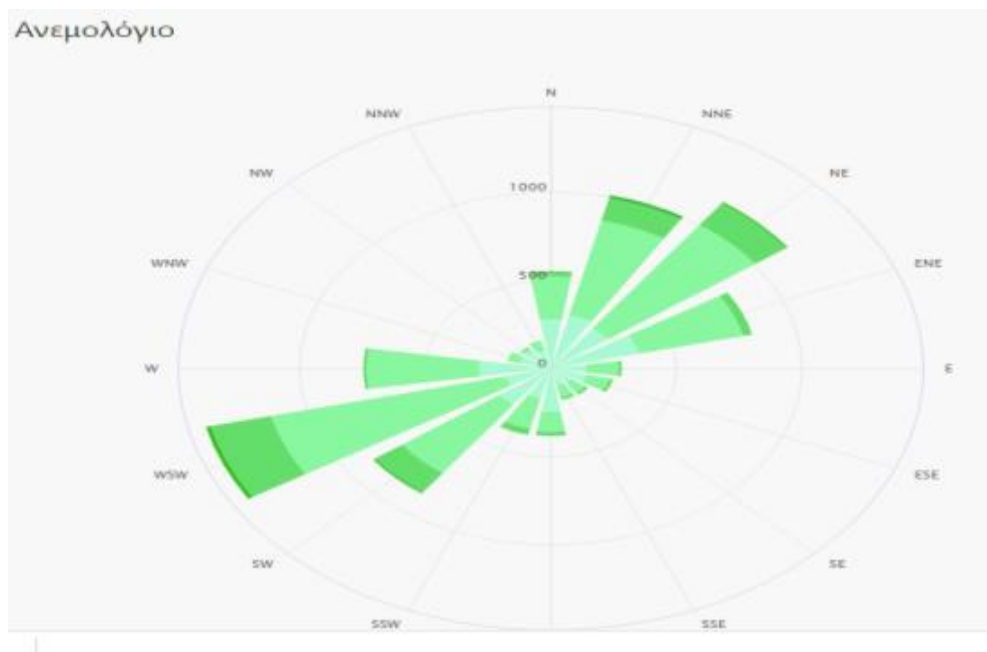


Πίνακας 6.1 Μηνιαίες τιμές ταχυτήτων ανέμου περιοχή Ναύπακτος.
(www.meteoblue.com)

Ιαν <ul style="list-style-type: none">0.0 : 0 ημέρες>0.3 : 1.2 ημέρες>1.6 : 18.4 ημέρες>3.4 : 10.7 ημέρες>5.5 : 0.7 ημέρες>8.0 : 0 ημέρες>10.8 : 0 ημέρες>13.9 : 0 ημέρες>17.2 m/s : 0 ημέρες	Φεβ <ul style="list-style-type: none">0.0 : 0 ημέρες>0.3 : 0.7 ημέρες>1.6 : 14.8 ημέρες>3.4 : 11.3 ημέρες>5.5 : 1.2 ημέρες>8.0 : 0.2 ημέρες>10.8 : 0 ημέρες>13.9 : 0 ημέρες>17.2 m/s : 0 ημέρες	Μαρ <ul style="list-style-type: none">0.0 : 0 ημέρες>0.3 : 0.9 ημέρες>1.6 : 17.7 ημέρες>3.4 : 10.9 ημέρες>5.5 : 1.2 ημέρες>8.0 : 0.2 ημέρες>10.8 : 0.1 ημέρες>13.9 : 0 ημέρες>17.2 m/s : 0 ημέρες	Απρ <ul style="list-style-type: none">0.0 : 0 ημέρες>0.3 : 1 ημέρες>1.6 : 18.2 ημέρες>3.4 : 9.5 ημέρες>5.5 : 1.3 ημέρες>8.0 : 0 ημέρες>10.8 : 0 ημέρες>13.9 : 0 ημέρες>17.2 m/s : 0 ημέρες
Μάι <ul style="list-style-type: none">0.0 : 0 ημέρες>0.3 : 2 ημέρες>1.6 : 20.6 ημέρες>3.4 : 7.2 ημέρες>5.5 : 1.3 ημέρες>8.0 : 0 ημέρες>10.8 : 0 ημέρες>13.9 : 0 ημέρες>17.2 m/s : 0 ημέρες	Ιουν <ul style="list-style-type: none">0.0 : 0 ημέρες>0.3 : 2.4 ημέρες>1.6 : 18.6 ημέρες>3.4 : 7.2 ημέρες>5.5 : 1.7 ημέρες>8.0 : 0.1 ημέρες>10.8 : 0 ημέρες>13.9 : 0 ημέρες>17.2 m/s : 0 ημέρες	Ιουλ <ul style="list-style-type: none">0.0 : 0 ημέρες>0.3 : 3.5 ημέρες>1.6 : 19.3 ημέρες>3.4 : 6.4 ημέρες>5.5 : 1.8 ημέρες>8.0 : 0.1 ημέρες>10.8 : 0 ημέρες>13.9 : 0 ημέρες>17.2 m/s : 0 ημέρες	Αυγ <ul style="list-style-type: none">0.0 : 0 ημέρες>0.3 : 4.2 ημέρες>1.6 : 18.8 ημέρες>3.4 : 6.2 ημέρες>5.5 : 1.6 ημέρες>8.0 : 0.2 ημέρες>10.8 : 0 ημέρες>13.9 : 0 ημέρες>17.2 m/s : 0 ημέρες
Σεπ <ul style="list-style-type: none">0.0 : 0 ημέρες>0.3 : 3.8 ημέρες>1.6 : 20.2 ημέρες>3.4 : 5.2 ημέρες>5.5 : 0.8 ημέρες>8.0 : 0 ημέρες>10.8 : 0 ημέρες>13.9 : 0 ημέρες>17.2 m/s : 0 ημέρες	Οκτ <ul style="list-style-type: none">0.0 : 0 ημέρες>0.3 : 2.7 ημέρες>1.6 : 21.2 ημέρες>3.4 : 6.8 ημέρες>5.5 : 0.3 ημέρες>8.0 : 0 ημέρες>10.8 : 0 ημέρες>13.9 : 0 ημέρες>17.2 m/s : 0 ημέρες	Νοε <ul style="list-style-type: none">0.0 : 0 ημέρες>0.3 : 1.9 ημέρες>1.6 : 20.6 ημέρες>3.4 : 7.2 ημέρες>5.5 : 0.4 ημέρες>8.0 : 0 ημέρες>10.8 : 0 ημέρες>13.9 : 0 ημέρες>17.2 m/s : 0 ημέρες	Δεκ <ul style="list-style-type: none">0.0 : 0 ημέρες>0.3 : 1.5 ημέρες>1.6 : 19.5 ημέρες>3.4 : 9.5 ημέρες>5.5 : 0.5 ημέρες>8.0 : 0 ημέρες>10.8 : 0 ημέρες>13.9 : 0 ημέρες>17.2 m/s : 0 ημέρες

Πίνακας 6.2 : Ετήσιες ώρες ανέμου ανά διεύθυνση (www.meteoblue.com).

N <ul style="list-style-type: none">0.0 : 13 ώρες/έτος>0.3 : 264 ώρες/έτος>1.6 : 247 ώρες/έτος>3.4 : 26 ώρες/έτος>5.5 : 3 ώρες/έτος>8.0 : 0 ώρες/έτος>10.8 : 0 ώρες/έτος>13.9 : 0 ώρες/έτος>17.2 m/s : 0 ώρες/έτος	NNE <ul style="list-style-type: none">0.0 : 11 ώρες/έτος>0.3 : 299 ώρες/έτος>1.6 : 553 ώρες/έτος>3.4 : 131 ώρες/έτος>5.5 : 14 ώρες/έτος>8.0 : 2 ώρες/έτος>10.8 : 0 ώρες/έτος>13.9 : 0 ώρες/έτος>17.2 m/s : 0 ώρες/έτος	NE <ul style="list-style-type: none">0.0 : 4 ώρες/έτος>0.3 : 278 ώρες/έτος>1.6 : 726 ώρες/έτος>3.4 : 151 ώρες/έτος>5.5 : 8 ώρες/έτος>8.0 : 0 ώρες/έτος>10.8 : 0 ώρες/έτος>13.9 : 0 ώρες/έτος>17.2 m/s : 0 ώρες/έτος	ENE <ul style="list-style-type: none">0.0 : 15 ώρες/έτος>0.3 : 348 ώρες/έτος>1.6 : 425 ώρες/έτος>3.4 : 37 ώρες/έτος>5.5 : 0 ώρες/έτος>8.0 : 0 ώρες/έτος>10.8 : 0 ώρες/έτος>13.9 : 0 ώρες/έτος>17.2 m/s : 0 ώρες/έτος
E <ul style="list-style-type: none">0.0 : 0 ώρες/έτος>0.3 : 140 ώρες/έτος>1.6 : 130 ώρες/έτος>3.4 : 13 ώρες/έτος>5.5 : 0 ώρες/έτος>8.0 : 0 ώρες/έτος>10.8 : 0 ώρες/έτος>13.9 : 0 ώρες/έτος>17.2 m/s : 0 ώρες/έτος	ESE <ul style="list-style-type: none">0.0 : 11 ώρες/έτος>0.3 : 136 ώρες/έτος>1.6 : 94 ώρες/έτος>3.4 : 15 ώρες/έτος>5.5 : 0 ώρες/έτος>8.0 : 0 ώρες/έτος>10.8 : 0 ώρες/έτος>13.9 : 0 ώρες/έτος>17.2 m/s : 0 ώρες/έτος	SE <ul style="list-style-type: none">0.0 : 4 ώρες/έτος>0.3 : 98 ώρες/έτος>1.6 : 69 ώρες/έτος>3.4 : 14 ώρες/έτος>5.5 : 0 ώρες/έτος>8.0 : 0 ώρες/έτος>10.8 : 0 ώρες/έτος>13.9 : 0 ώρες/έτος>17.2 m/s : 0 ώρες/έτος	SSE <ul style="list-style-type: none">0.0 : 0 ώρες/έτος>0.3 : 99 ώρες/έτος>1.6 : 68 ώρες/έτος>3.4 : 14 ώρες/έτος>5.5 : 1 ώρες/έτος>8.0 : 0 ώρες/έτος>10.8 : 0 ώρες/έτος>13.9 : 0 ώρες/έτος>17.2 m/s : 0 ώρες/έτος



Εικόνα 53: Ροδόγραμμα περιοχής Ναυπάκτου (www.meteoblue.com).

Το ροδόγραμμα για την περιοχή της Ναυπάκτου δείχνει πόσες ώρες ετησίως ο άνεμος φυσάει από την υποδεικνυόμενη διεύθυνση. Παράδειγμα ΝΔ: ο άνεμος φυσά από τα Νότιο-Δυτικά (ΝΔ) προς τα Βορειοανατολικά (ΒΑ).

6.3 Κατανομή Weibull για το Α/Π Τρίκορφα.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μελέτη αναφέρεται σε πραγματικά δεδομένα που προσφέρονται από το Α/Π για το 2021. Έτσι είναι γνωστές οι μέσες τιμές ταχύτητας ανέμου στο ύψος των Α/Γ δηλ. σε ύψος $H=1580m$. Το υψόμετρο εγκατάστασης του

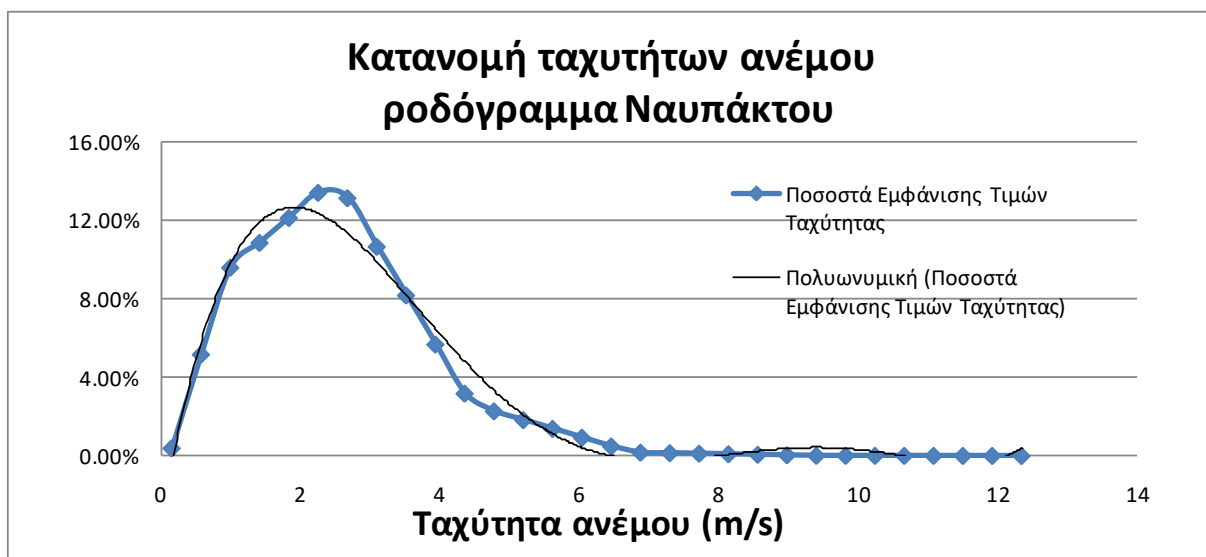


Α/Π είναι στα 1500m ενώ ο πύργος των Α/Γ είναι 80m. Είναι επίσης γνωστή η κατανομή ταχύτητας ανέμου από το ροδόγραμμα της περιοχής σε ύψος $H_0 = 10m$.

Όπως αναφέρει και ο Τσαουσανίδης (2012) για την εκπόνηση μιας μελέτης αιολικού δυναμικού που θα οδηγήσει σε ασφαλή αποτελέσματα απαιτούνται μακροχρόνιες και εκτεταμένες μετρήσεις με κόστος τόσο σε πόρους όσο και σε χρόνο. Έτσι συνήθως ο μηχανικός καταφεύγει σε ημιεμπειρικά μοντέλα για την περιγραφή του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής με βάση μικρό αριθμό παραμέτρων. Επίσης λόγω του ότι τα ανεμολογικά δεδομένα δίνονται για ένα χαρακτηριστικό ύψος ($H_0=10m$) απαιτείται η αναγωγή των δεδομένων αυτών στο ύψος των Α/Γ ή του Α/Π. Με τον τρόπο αυτό επιδιώκεται η κατασκευή μιας κατανομής Weibull για την ταχύτητα του ανέμου λειτουργώντας κατά αντίστροφο τρόπο. Δηλ. με αναγωγή μιας κατανομής στην επιφάνεια του εδάφους (ροδόγραμμα περιοχής σε ύψος $H_0 = 10m$) στο ύψος των Α/Γ. Οι μετρήσεις ταχύτητας ανέμου στο Α/Π δίνονται στον ακόλουθο πίνακα όπου η μέση τιμή ταχύτητας ανέμου υπολογίζεται 6.61 m/s.

MONTHS		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Average Wind Speed (m/s)	U_{mean} 6.61m/s	9.44	7.76	6.62	6.72	6.03	4.38	4.74	5.49	5.43	6.79	7.29	8.60

Από την κανονικοποιημένη κατανομή ταχύτητας ανέμου με βάση το ροδόγραμμα της περιοχής προκύπτει μια μέση ταχύτητα ανέμου 2.21m/s σε ένα ύψος που θεωρήθηκε $H_0 = 10m$.



Εικόνα 54: Κανονικοποιημένη κατανομή ταχύτητας ανέμου σε $H = 10m$.

Στη συνέχεια με τη χρήση της σχέσης ύψους - ταχύτητας ανέμου (4.4) υπολογίζεται ο συντελεστής α δηλ. ο συντελεστής τριβής – εκθετικός δείκτης ισχύος. Η σχέση (4.4) δηλ. επιλύεται με γνωστές ταχύτητες και ύψη ως προς τον εκθετικό δείκτη ισχύος έτσι ώστε να επιβεβαιώνονται οι μέσες ταχύτητες στα διαφορετικά ύψη αναφοράς.



$$\frac{u}{u_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^\alpha \quad (5.1)$$

Επιλύοντας τη σχέση υπολογίζεται $\alpha = 0.216$ (εκθετικός δείκτης ισχύος)

MONTHS		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Average Wind Speed (m/s)	u_{mean} 6.61m/s	9.44	7.76	6.62	6.72	6.03	4.38	4.74	5.49	5.43	6.79	7.29	8.60
Wind Rose	u_0 2.21m/s	3.16	2.60	2.22	2.25	2.02	1.47	1.59	1.84	1.82	2.27	2.44	2.88

Έχοντας υπολογίσει τον συντελεστή α μπορεί να κατασκευαστεί η κατανομή ταχυτήτων του ανέμου στο ύψος των Α/Γ.

Το επόμενο βήμα είναι η προσέγγιση της κατανομής ταχυτήτων ανέμου με την κατανομή Weibull στο δεδομένο υψόμετρο του Α/Π. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5 (παρ.5.5) η κατανομή Weibull εκφράζεται από την σχέση:

$$f(u) = \left(\frac{k}{c} \right) \left(\frac{u}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{u}{c} \right)^k \right) \quad (5.2)$$

Όπου u η ταχύτητα του ανέμου
 c η παράμετρος κλίμακας (scale factor)
 k η παράμετρος μορφής. (shape factor)

Οι παράμετροι c , k της κατανομής Weibull υπολογίζονται σύμφωνα με εμπειρικές σχέσεις (Πίνακας 5.3), με βάση τη μέση ταχύτητα της περιοχής του Α/Π. Υπολογίζεται πρώτα η παράμετρος μορφής k με δεδομένη μέση ταχύτητα του ανέμου στο ύψος του Α/Π που είναι $u_{mean} = 6.6\text{m/s}$ χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$k = 0.94\sqrt{u} = 0.94\sqrt{6.6} \Rightarrow \boxed{k = 2.41} \quad (5.3)$$

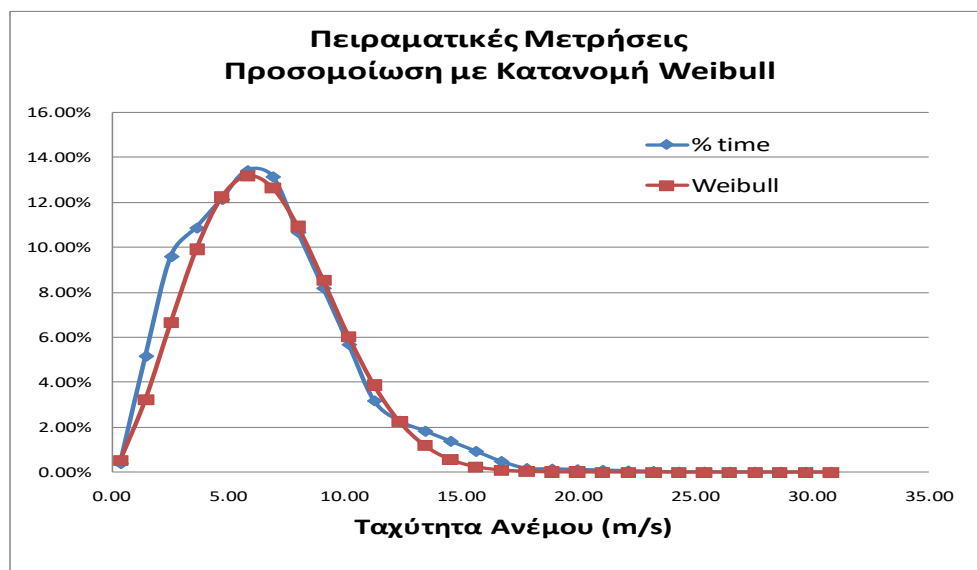
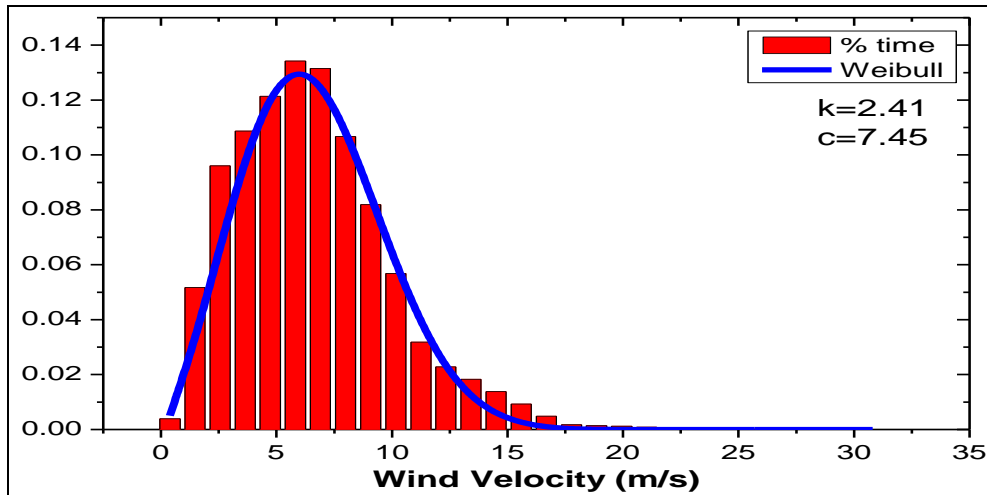
Στη συνέχεια υπολογίζεται η παράμετρος κλίμακας c που είναι μια χαρακτηριστική ταχύτητας της κατανομής Weibull ως ακολούθως:

$$c = \left[\frac{u_{mean}}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right)} \right] = \left[\frac{6.6}{\Gamma \left(1 + \frac{1}{2.41} \right)} \right] = \frac{6.6}{\Gamma(1.415)} = 7.45\text{m/s} \quad (5.4)$$

Επομένως η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Weibull για το υπό μελέτη Α/Π υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$f(u) = \left(\frac{k}{c} \right) \left(\frac{u}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{u}{c} \right)^k \right) = \left(\frac{2.41}{7.45} \right) \left(\frac{u}{7.45} \right)^{2.41-1} \exp \left(- \left(\frac{u}{7.45} \right)^{2.41} \right) \quad (5.5)$$

Η κανονικοποιημένη κατανομή Weibull που προσεγγίζει την πραγματική κατανομή ταχυτήτων ανέμου του Α/Π δίνονται στο διάγραμμα:



6.4 Υπολογισμός Πραγματικής Δεσμευόμενης Ισχύος Ανέμου.

Γενικά η θερμοκρασία μειώνεται ανεπαίσθητα με την αύξηση του υψόμετρου ενώ η πίεση ελαττώνεται αισθητά. (Μαρνέλλος 2020). Η μεταβολή της πυκνότητας με το ύψος περιγράφεται από τη σχέση (4.7) σύμφωνα με την οποία:

$$\rho = \rho_0 - 1.194 \cdot 10^{-4} \cdot H \quad (\text{kg} / \text{m}^3) \quad (5.6)$$

Με εφαρμογή της παραπάνω σχέσης προκύπτει ότι στο ύψος των Α/Γ ($H=1580 \text{ m}$) η πυκνότητα του αέρα είναι $\rho=1.0364 \text{ kg/m}^3$.

Με γνωστή την πυκνότητα του αέρα στο δεδομένο ύψος του Α/Π είναι εφικτός ο υπολογισμός της ειδικής ισχύος του ανέμου. Με την έννοια ειδική ισχύς νοείται η ισχύς ανά m^2 επιφάνειας. Η ειδική ισχύς υπολογίζεται σε συμφωνία με τις μετρούμενες ταχύτητες ανέμου σύμφωνα με τη σχέση:

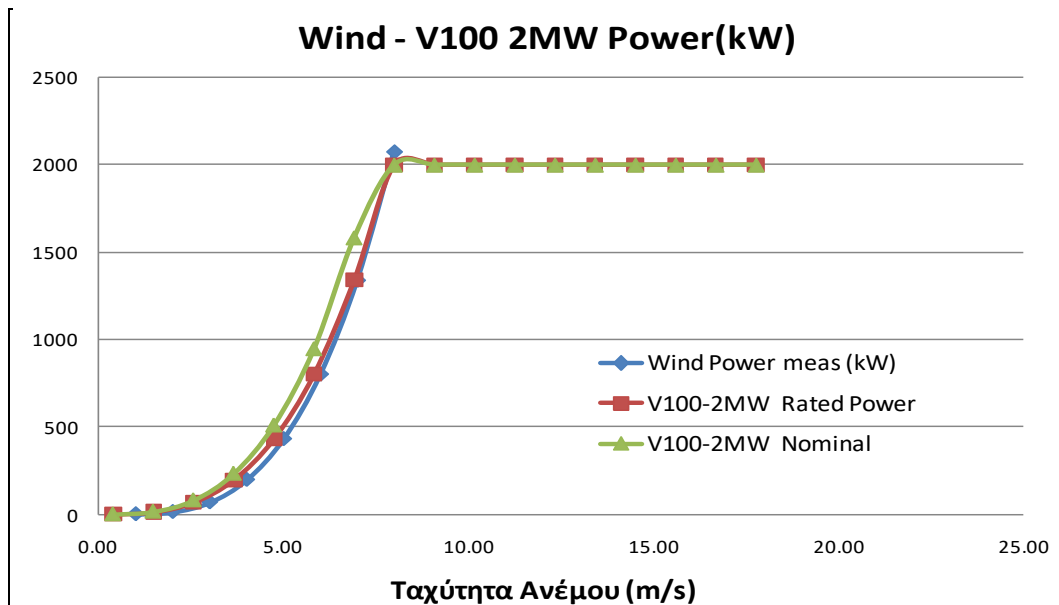
$$P^* = \left(\frac{1}{2} \right) (\rho \cdot u^3) \quad (\text{W/m}^2) \quad (5.7)$$



Μπορεί να γίνει υπολογισμός της ισχύος του ανέμου στο δεδομένο υψόμετρο με τη διόρθωση της πυκνότητας θεωρώντας ως επιφάνεια κάλυψης (swept area) αυτήν της Α/Γ. Επίσης υπολογίζεται η ονομαστική ισχύς της Α/Γ σε συνθήκες αναφοράς από τον κατασκευαστή στο δεδομένο υψόμετρο χωροθέτησης των Α/Γ.

Υπενθυμίζεται ότι το μοντέλο Α/Γ είναι V-100 2MW δηλ. με διάμετρο δρομέα $D = 100\text{m}$ που σημαίνει επιφάνεια κάλυψης $A = 7854\text{m}^2$. Σύμφωνα με τη σχέση που δίνει την ισχύ καταγράφεται ισχύς ανέμου και Α/Γ.

$$P = \left(\frac{1}{2}\right)(\rho \cdot A \cdot u^3)$$



Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας 2MW(προσαρμοσμένη στα χαρακτηριστικά του αιολικού πάρκου)

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι θεωρώντας και τον συντ. ισχύος C_p που προκύπτει από το όριο Betz, η εκμεταλλεύσιμη ισχύς του ανέμου από την Α/Γ είναι το 59.26% της διαθέσιμης.

$$P = \left(\frac{1}{2}\right)C_p \cdot (\rho \cdot A \cdot u^3)$$



6.5 Υπολογισμός Ενεργειακών Απωλειών.

Η παραγόμενη ενέργεια που προκύπτει στο Α/Π των 7 Α/Γ υπολογίζεται με βάση την ονομαστική ισχύ των Α/Γ προσαρμοσμένη στο όριο Betz ως:

$$E_{nominal} (kWh) = 7(\text{ΑΓ}) \cdot 2(\text{MW} / \text{ΑΓ}) \cdot (365 \text{ } \cancel{\text{d}} \cdot 24 \text{h} / \cancel{\text{d}}) \cdot 0.592 = 72,602,880 \text{ kWh}$$

Πάνω στην ενέργεια που υπολογίστηκε θα πρέπει να θεωρηθούν και επιπλέον απώλειες που σχετίζονται με παραμέτρους όπως:

- Απώλειες λόγω όμορου που οφείλονται στην επίδραση σκίασης των Α/Γ, μειώνοντας έτσι την ταχύτητα του ανέμου μετά την επαφή του με τα πτερύγια της Α/Γ, καθώς και κατά την πρόσπτωση του ανέμου στην επόμενη Α/Γ.
- Απώλειες λόγω πλαγιολίσθησης του πτερυγίου, η οποία ορίζεται ως η στροφή περί τον κάθετο της διεύθυνσης της κίνησης του άξονα, η οποία στρέφει παράλληλα της διεύθυνσης του επιπέδου της ανεμογεννήτριας.
- Απώλειες του ηλεκτρικού δικτύου μεταφοράς αλλά και του μετασχηματιστή.
- Απώλειες λόγω του συντελεστή τεχνικής διαθεσιμότητας όπως οι ριπές ανέμου, τυχαίες βλάβες, προβλήματα συχνότητας-τάσης. Απώλειες λόγω απότομων αλλαγών στη διεύθυνση του ανέμου.

Συνήθως οι κατασκευαστές υπολογίζουν το σύνολο των ενεργειακών απωλειών σε ποσοστό (10-15)% κάτω από το θεωρητικό ποσοστό (που υποδεικνύει το όριο Betz).

Οι παραπάνω ενεργειακές απώλειες διαχωρίζονται σε 2 κατηγορίες που σχετίζονται με τις απώλειες κάθε Α/Γ και με τις απώλειες της όλης εγκατάστασης του Α/Π και υπολογίζονται σε ετήσια βάση στον Πίνακα.

Πίνακας Απώλειες Α/Π σε kWh/χρόνο.

Απώλειες Α/Γ	Ποσοστό (%)	Απώλειες (kWh/year)
1. Κιβώτιο Ταχυτήτων	1.0	726,029
2. Σκόνη στα πτερύγια	1.0	726,029
3. Πλαγιολίσθηση πτερυγίου	1.0	726,029
4. Μετασχηματιστής	2.0	1,452,058
Απώλειες Α/Π		
1. Τεχνικές διασύνδεσης δικτύου	3.0	2,178,086
2. Διαθεσιμότητα	1.0	726,029
3. Όμορου	4.0	2,904,116
4. Ασφαλής λειτουργία	2.0	1,452,058
ΣΥΝΟΛΑ	15.0%	10,890,435

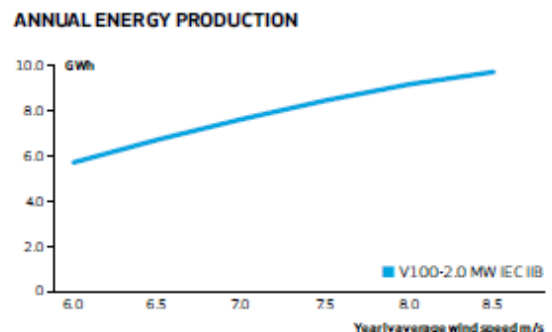


6.6 Τεχνικά Χαρακτηριστικά των Α/Γ του Α/Π.

Στα επόμενα δίνονται κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά των Α/Γ που συγκροτούν το υπό ανάλυση Α/Π όπως δίνονται στο τεχνικό φυλλάδιο προδιαγραφών της κατασκευάστριας εταιρείας.

V100-2.0 MW[®] IEC IIB Facts & figures

POWER REGULATION	Pitch regulated with variable speed	HUB DIMENSIONS	
		Max. transport height	3.4 m
		Max. transport width	4 m
		Max. transport length	4.2 m
OPERATING DATA		BLADE DIMENSIONS	
Rated power	2,000 kW	Length	49 m
Cut-in wind speed	3 m/s	Max. chord	3.9 m
Cut-out wind speed	22 m/s		
Re cut-in wind speed	20 m/s		
Wind class	IEC IIB		
Standard operating temperature range from	-20°C to 45°C	Max. weight per unit for transportation	70 metric tonnes
SOUND POWER			
Maximum	105 dB*	TURBINE OPTIONS	
* Sound Power Modes available			
ROTOR		• Power Optimised Modes up to 2.2 MW (site specific)	
Rotor diameter	100 m	• Condition Monitoring System	
Swept area	7,854 m ²	• Vestas Ice Detection	
Air brake	full blade feathering with 3 pitch cylinders	• Smoke Detection	
		• Shadow Detection	
		• Low Temperature Operation to -30°C	
ELECTRICAL		• Aviation Lights	
Frequency	50/60 Hz	• Aviation Markings on the Blades	
Generator type	4-pole (50 Hz)/6-pole (60 Hz) doubly fed generator, slip rings	• Vestas IntelliLight™	
		• Vestas Bat Protection System	
GEARBOX			
Type	one planetary stage and two helical stages	ANNUAL ENERGY PRODUCTION	
TOWER			
Hub heights	80 m (IEC IIB) and 95 m (IEC IIB)		
NACELLE DIMENSIONS			
Height for transport	4 m		
Height installed (incl. CoolerTop*)	5.4 m		
Length	10.4 m		
Width	3.5 m		





7. Οικονομοτεχνική Ανάλυση του Α/Π.

Στο σημείο αυτό γίνεται η κοστολόγηση του έργου σύμφωνα με τις κατευθυντήριες οδηγίες της τεχνικής έκθεσης Technical Report NREL/TP-500-40566 December 2006. Στο συγκεκριμένο εγχειρίδιο δίνονται οι σχέσεις υπολογισμού κόστους των επιμέρους τμημάτων μιας Α/Γ σύμφωνα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της.

Γενικά το κόστος ενός Α/Π προκύπτει ως άθροισμα μιας σειράς δαπανών όπως:

- Δαπάνη μελέτης σκοπιμότητας που περιλαμβάνει τη στατιστική ανάλυση ανεμολογικών δεδομένων, την περιβαλλοντική μελέτη και τα οικονομικά μοντέλα.
- Δαπάνη μελέτης ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού προς κατασκευή.
- Δαπάνη μελέτης εφαρμογής νομικού πλαισίου (νομικές άδειες, συμφωνίες αγοράς – πώλησης ενέργειας).
- Δαπάνη αγοράς Α/Γ.
- Δαπάνη κατασκευών υπόλοιπων εγκαταστάσεων (έξοδα θεμελίωσης, επέκτασης οδικού δικτύου, καλωδίωσης μέσης τάσης εξοπλισμού υποσταθμού).
- Δαπάνη χρηματοοικονομικού κόστους (δανειοδοτήσεις) και ασφάλισης.
- Δαπάνη κόστους λειτουργίας και συντήρησης του Α/Π.

7.1 Υπολογισμός κόστους Υποσυστημάτων Α/Γ.

Το κόστος μιας Α/Γ υπολογίζεται αθροίζοντας τα κόστη επιμέρους τμημάτων της, όπως των πτερυγίων, της πλήμνης, των βηματικών μηχανισμών και εδράνων ολίσθησης (ρουλεμάν), του κώνου μύτης του στροφείου, του άξονα χαμηλής ταχύτητας, του κιβωτίου ταχύτητας, του μηχανικού φρένου, της γεννήτριας, των ηλεκτρονικών συστημάτων, της κεντρικής μονάδας ελέγχου, των υδραυλικών, του καλύμματος της νασέλας, του πύργου, των θεμελιώσεων και τέλος της ασφάλειας λειτουργίας. Στη συνέχεια δίνεται αναλυτικά ο υπολογισμός κόστους για κάθε επιμέρους σύστημα που συνήθως προκύπτει από εμπειρική σχέση η οποία έχει προκύψει από μεγάλο όγκο δεδομένων ώστε να προσεγγίζει όσο καλύτερα την πραγματικότητα. Συγκεντρωτικά οι σχέσεις υπολογισμού και οι συνακόλουθες τιμές κόστους δίνονται στους Πίνακες 7.1, 7.2 μετά τη συνοπτική παρουσίαση στις παραγράφους που ακολουθούν.

7.1.1. Υπολογισμός κόστους Πτερυγίων.

Καταρχήν η μάζα κάθε πτερυγίου υπολογίζεται σύμφωνα με την ακτίνα του δρομέα με τη βοήθεια της εμπειρικών σχέσεων. Οι σχέσεις αυτές της μάζας κάθε πτερυγίου προέκυψαν κατά το WindPact και αναφέρονται σε Α/Γ κλάσης III κατά IEC.



$$m_{blade,i} = 0.1452 \cdot R^{2.9158} = 0.1452 \cdot (50m)^{2.9158} = 13,056 \text{ kg} \Rightarrow$$

$$m_{3blades} = 3 \cdot 13,056 \text{ kg} \Rightarrow \boxed{m_{3blades} = 39,168 \text{ kg}}$$

Κατά το εγχειρίδιο δίνεται και μια 2^η εμπειρική σχέση πιο αναβαθμισμένη.

$$m_{blade,i} = 0.4948 \cdot R^{2.53} = 0.4948 \cdot (50m)^{2.53} = 9,836 \text{ kg} \Rightarrow$$

$$m_{3,blades} = 3 \cdot 9,836 \text{ kg} \Rightarrow \boxed{m_{3,blades} = 29,508 \text{ kg}}$$

Το κόστος κάθε πτερυγίου υπολογίζεται ως προς την ακτίνα του δρομέα:

$$Blade_{Cost} = 0.5582R^3 + 3.8118R^{2.5025} - 955.24 \quad (6.1.1)$$

7.1.2. Υπολογισμός κόστους Πλήμνης.

Το κόστος της πλήμνης υπολογίζεται με βάση τη μάζα της η οποία επίσης δίνεται από εμπειρική σχέση που έχει αναπτυχθεί.

$$m_{hub} = 0.954 \cdot m_{blade} + 5680.3 = 0.954 \cdot (9,836 \text{ kg}) + 5680.3 \Rightarrow \boxed{m_{hub} = 15,064 \text{ kg}}$$

Το κόστος της πλήμνης υπολογίζεται ως συνάρτηση της μάζας της σύμφωνα με τη σχέση:

$$hub_{Cost} = 4.25 \cdot m_{hub} \quad (6.1.2)$$

7.1.3. Υπολογισμός κόστους Βηματικών Μηχανισμών – Ρουλεμάν.

Το μοντέλο των βηματικών μηχανισμών δημιουργήθηκε με δεδομένα του σχεδιασμού ρότορα (WindPact) και συμπληρώθηκε με επιπλέον διαθέσιμα δεδομένα της βιομηχανίας από αναφορές LWST.

Η μάζα έδρασης βήματος (του ρουλεμάν) υπολογίζεται ως προς τη μάζα όλων των πτερυγίων (3) σύμφωνα με εμπειρική σχέση

$$m_{pitch \ bearing} = 0.1295 \cdot m_{total \ blades} + 491.31 = 0.1295 \cdot (3 \cdot 9,836 \text{ kg}) + 491.31 \Rightarrow$$

$$\boxed{m_{pitch \ bearing} = 4,313 \text{ kg}}$$

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι οδηγοί και συστήματα ενεργοποίησης υπολογίζονται ως το 32.8% της μάζας του ρουλεμάν +555kg. Στη συνέχεια υπολογίζεται η συνολική μάζα του συστήματος βήματος ως προς τη μάζα του ρουλεμάν σύμφωνα με την σχέση.

$$m_{total \ pitch \ system} = (1.328 \cdot m_{pitch \ bearing}) + 555 = (1.328 \cdot 4,313) + 555$$

$$\boxed{m_{total \ pitch \ system} = 6,283 \text{ kg}}$$



Το κόστος του όλου συστήματος pitch πλέον αναφερόμενο και στα 3 πτερύγια της Α/Γ υπολογίζεται ως συνάρτηση της διαμέτρου του ρότορα (δρομέα) σύμφωνα με εμπειρική σχέση.

$$pitch\ system_{Cost} = 2.28 \cdot (0.2106 \cdot D_{rotor}^{2.6578}) \quad (6.1.3)$$

7.1.4. Υπολογισμός κόστους – Κώνου μύτης (Nose cone).

Το στροφέιο – κώνος μύτης υπολογίζεται από τα εξαγόμενα κατά κύριο λόγο δεδομένων του Wind PACT και των αναφορών LWST που συμπληρώνονται με δεδομένα του εθνικού κέντρου αιολικής τεχνολογίας και προηγμένης έρευνας στορβιλομηχανών (Advanced Research Turbine – National Wind Technology Center). Από αυτά τα δεδομένα προκύπτουν εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού τόσο της μάζας του κώνου ως προς τη διάμετρο του δρομέα όσο και του κόστους στη συνέχεια του κώνου ως προς τη μάζα του. Πιο αναλυτικά:

$$m_{nose\ cone} = 18.5 \cdot D - 520.5 = 18.5 \cdot (100m) - 520.5 \Rightarrow m_{nose\ cone} = 1,330\ kg$$

Το κόστος του κώνου μύτης υπολογίζεται από εμπειρική σχέση ως συνάρτηση της μάζας του:

$$Nose\ cone_{Cost} = 5.57 \cdot m_{nose\ cone} \quad (6.1.4)$$

7.1.5. Υπολογισμός κόστους Άξονα Χαμηλής Ταχύτητας (Low –Speed Shaft).

Τόσο η μάζα του άξονα όσο και το κόστος του υπολογίζονται ως προς τη διάμετρο του δρομέα. Έτσι αρχικά η μάζα υπολογίζεται:

$$m_{low-speed\ shaft} = 0.0142 \cdot D^{2.888} = 0.0142 \cdot (100m)^{2.888} \Rightarrow m_{low-speed\ shaft} = 8,478\ kg$$

Το κόστος του άξονα χαμηλής ταχύτητας υπολογίζεται ως προς τη διάμετρο του δρομέα.

$$Low-speed\ shaft_{Cost} = 0.01 \cdot D_{Rotor}^{2.887} \quad (6.1.5)$$

7.1.6. Υπολογισμός κόστους Κύριων Εδράνων (Main Bearings).

Ο υπολογισμός του κόστους των κυρίων εδράνων γίνεται αφού πρώτα υπολογιστεί η μάζα σύμφωνα με την εμπειρική σχέση που ακολουθεί. Η μάζα του κελύφους των εδράνων θεωρείται ίση με τη μάζα τους. Για το λόγο αυτό κατά τον υπολογισμό του κόστους υπάρχει πολλαπλασιαστικός παράγοντας 2 στην εμπειρική σχέση υπολογισμού.



$$m_{bearing} = (8/600 \cdot D - 0.033) \cdot 0.0092 \cdot D^{2.5} = (8/600 \cdot (100m) - 0.033) \cdot 0.0092 \cdot (100m)^{2.5}$$
$$\Rightarrow m_{bearing} = 1,197kg$$

Το κόστος των κυρίων εδράνων υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση

$$Total\ bearing\ System_{Cost} = 2 \cdot 17.6 \cdot m_{bearing} \quad (6.1.6)$$

7.1.7. Υπολογισμός κόστους Κιβωτίου Ταχυτήτων (Gear Box).

Το κιβώτιο ταχυτήτων και οι γεννήτριες ίσως είναι οι πιο σύνθετες συνιστώσες για να υπολογίσει κανείς τη μάζα και το κόστος τους. Υπάρχει μεγάλο εύρος σχεδίων και πολλοί τρόποι για τον υπολογισμό του κόστους αυτών των διατάξεων. Τα 4 σχέδια που περιλαμβάνει το μοντέλο υπολογισμού WindPACT περιλαμβάνει

- ένα 3βάθμιο πλανητικό / ελικοειδές κιβώτιο με γεννήτρια υψηλής ταχύτητας,
- μονής βαθμίδας οδηγό με μέσης ταχύτητας γεννήτρια,
- πολυβάθμια οδήγηση με πολυβάθμια γεννήτρια και
- ένα άμεσο οδηγό χωρίς κιβώτιο.

Επιπλέον πληροφορίες συμπληρώνουν τα δεδομένα υπολογισμού από αναφορές του LWST. Η μάζα των κιβωτίων κλιμακώνεται με βάση τη ροπή του άξονα χαμηλής ταχύτητας και με τον τρόπο αυτό διορθώνονται οι διαφορές που μπορεί να προκύπτουν στη διάμετρο του δρομέα και της ταχύτητας του ακροπτερυγίου. Συνολικά το κόστος στη συνέχεια είναι συνάρτηση της μηχανικής ισχύος σε kW.

Στη συνέχεια υπολογίζεται το κόστος κιβωτίου τριών βαθμίδων που είναι και το δημοφιλέστερο στις Α/Γ. Ο υπολογισμός γίνεται με εμπειρική σχέση ως προς την ονομαστική ισχύ (MR – machine rating σε kW) της Α/Γ ως ελεύθερη παράμετρο.

$$Gearbox_{Cost} = 16.45 \cdot (MR)^{1.249} \quad (6.1.7)$$

7.1.8. Υπολογισμός κόστους Μηχανικού Φρένου – Συνδέσεων (High Speed Coupling).

Ο υπολογισμός του κόστους του φρένου γίνεται ως προς την ονομαστική ισχύ της μηχανής (MR – machine rating σε kW) σύμφωνα με εμπειρική σχέση.

$$Brake / Coupling_{Cost} = 1.9894 \cdot MR - 0.1141 \quad (6.1.8)$$

7.1.9. Υπολογισμός κόστους Γεννήτριας (Generator).

Ο υπολογισμός της μάζας και του κόστους της γεννήτριας γίνεται ως προς την ονομαστική ισχύ της σύμφωνα με εμπειρική σχέση. Προσφέρονται σχέσεις για υπολογισμό διαφόρων τύπων γεννητριών στη συγκεκριμένη περίπτωση επιλέγεται η γεννήτρια με οδήγηση 3 σταδίων με γεννήτρια υψηλών ταχυτήτων.

Η μάζα της γεννήτριας υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:



$$m_{Generator} = 6.47 \cdot (MR)_{kW}^{0.9223} = 6.47 \cdot (2000)_{kW}^{0.9223} \Rightarrow m_{Generator} = 7,169kg$$

Το κόστος της γεννήτριας υπολογίζεται ως προς την ονομαστική ισχύ της (MR),

$$Generator_{Cost} = 65 \cdot (MR) \quad (6.1.9)$$

7.1.10. Υπολογισμός κόστους Ηλεκτρονικών Μεταβλητής Ταχύτητας.

Όλα τα σχέδια του μοντέλου υπολογισμών διαθέτουν ένα μετατροπέα ισχύος ικανό να διαχειρίζεται όλη την ισχύ εξόδου. Αυτή η ικανότητα επιτρέπει τη λειτουργία σε μεταβλητές ταχύτητες όσο και στη λειτουργία χαμηλής τάσης με κατάλληλο προγραμματισμό του μετατροπέα (converter). Ο υπολογισμός του κόστους του μετατροπέα γίνεται με βάση την ονομαστική ισχύ της ΑΓ.

$$Converter_{Cost} = 79 \cdot (MR)_{kW} \quad (6.1.10)$$

7.1.11. Υπολογισμός κόστους Συστήματος προσανατολισμού (Yaw).

Το κόστος του μηχανισμού εκτροπής (yaw) και του συνοδευτικού ρουλεμάν υπολογίζεται με βάση τις κατευθυντήριες οδηγίες της Avon Bearing. Αυτοί οι υπολογισμοί βασίζονται στη διάμετρο του δρομέα. Το συνολικό κόστος του συστήματος εκτροπής είναι διπλάσιο του κόστους του ρουλεμάν. Επίσης η μάζα του όλου συστήματος υπολογίζεται ως συνάρτηση της διαμέτρου του δρομέα. Η μάζα του καλύματος επίσης του συστήματος υπολογίζεται ως το 60% της μάζας του ρουλεμάν. Σύμφωνα με την εμπειρική σχέση υπολογισμού της μάζας του όλου συστήματος:

$$m_{Yaw System} = 1.6 \cdot (0.0009 \cdot D_{rotor}^{3.314}) = 1.6 \cdot (0.0009 \cdot 100_{rotor}^{3.314}) \Rightarrow m_{Yaw System} = 6,115kg$$

Το κόστος του συστήματος προσανατολισμού (yaw) υπολογίζεται ως προς τη διάμετρο του δρομέα:

$$Yaw System_{Cost} = 2 \cdot (0.0339 \cdot D_{rotor}^{2.964}) \quad (6.1.11)$$

7.1.12. Υπολογισμός κόστους Κεντρικής Μονάδας Ελέγχου (Mainframe).

Το κόστος της κεντρικής μονάδας ελέγχου δίνεται ως συνάρτηση της διαμέτρου του δρομέα. Δευτερεύουσες διορθώσεις επί της σχέσης υπολογισμού έχουν συμπεριλάβει δεδομένα της βιομηχανίας ή του LWST όπου αυτά είναι διαθέσιμα. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι αν και ο υπολογισμός του κόστους δεν προκύπτει ως συνάρτηση της μάζας της κεντρικής μονάδας, εντούτοις ο υπολογισμός της μάζας της κεντρικής μονάδας απαιτείται για τον μετέπειτα υπολογισμό του κόστους για εξέδρες και κιγκλιδώματα που ακολουθεί. Έτσι η μάζα της κεντρικής μονάδας ελέγχου για 3βάθμια οδήγηση με υψηλής ταχύτητας γεννήτρια υπολογίζεται από την εμπειρική σχέση:



$$m_{Mainframe} = 2.233 \cdot D_{rotor}^{1.953} = 2.233 \cdot (100m)^{1.953} \Rightarrow m_{Mainframe} = 17,984kg$$



Το κόστος της κεντρικής μονάδας ελέγχου υπολογίζεται ως συνάρτηση της διαμέτρου του δρομέα:

$$Mainframe_{Cost} = 9.489 \cdot D_{rotor}^{1.953} \quad (6.1.12)$$

7.1.13. Υπολογισμός κόστους για Εξέδρες – Κιγκλιδώματα (Platforms – Railings).

Το κόστος κιγκλιδωμάτων και εξεδρών υπολογίζεται με βάση τη μάζα τους η οποία με τη σειρά της υπολογίζεται ως προς τη μάζα της κεντρικής μονάδας ελέγχου σύμφωνα με την σχέση:

$$m_{Platform/Rail} = 0.125 \cdot m_{Mainframe} \Rightarrow m_{Platform/Rail} = 2,248kg$$

Με βάση πλέον τη μάζα εξεδρών και κιγκλιδωμάτων υπολογίζεται το κόστος σύμφωνα με εμπειρική σχέση:

$$Platform / Railing_{Cost} = 8.7 \cdot m_{Platform/Rail} \quad (6.1.13)$$

7.1.14. Υπολογισμός κόστους Ηλεκτρικών Συνδέσεων.

Ο υπολογισμός του κόστους των ηλεκτρικών συνδέσεων συμπεριλαμβάνει διακόπτες και οποιεσδήποτε καλωδιώσεις του πύργου και υπολογίζονται ως 40€ / kW επί της ονομαστικής ισχύος της Α/Γ (MR – machine rating).

$$ElectricalConnection_{Cost} = 40 \cdot (MR)_{kW} \quad (6.1.14)$$

7.1.15. Υπολογισμός κόστους Υδραυλικών και Συστημάτων Ψύξης.

Οι εκτιμήσεις κόστους του υδραυλικού συστήματος και των συστημάτων ψύξης λαμβάνονται από τις τεχνικές αναφορές LWST. Αναφορικά με τη μάζα των συστημάτων υπολογίζεται σύμφωνα με την ονομαστική ισχύ της Α/Γ από την εμπειρική σχέση:

$$m_{hydraulic/cooling} = 0.08 \cdot (MR)_{kW} \Rightarrow m_{hydraulic/cooling} = 160kg$$

Το κόστος υδραυλικών συστημάτων και συστημάτων ψύξης υπολογίζεται ως προς την ονομαστική ισχύ της Α/Γ:

$$Hydraulic / Cooling_{Cost} = 12 \cdot (MR)_{kW} \quad (6.1.15)$$

7.1.16. Υπολογισμός καλύμματος Νασέλας (Nacelle cover).

Το κόστος κάλυψης της νασέλας προκύπτει από δεδομένα του WindPACT, σε συνδυασμό με τα δεδομένα του συστήματος μετάδοσης κίνησης και δεδομένα της τεχνικής αναφοράς LWST. Από τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει μια συνάρτηση για όλα τα συστήματα μετάδοσης κίνησης λόγω των λίγων δεδομένων. Τα δεδομένα



αυτά δεν ήταν αρκετά ώστε να αναπτυχθούν σχέσεις μεμονωμένα για διαφορετικά συστήματα μετάδοσης κίνησης. Ο υπολογισμός γίνεται ως προς την ονομαστική ισχύ της Α/Γ. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μάζα της νασέλας προκύπτει από το κόστος της νασέλας. Το κόστος /kg της νασέλας προκύπτει από τη μελέτη του ρότορα στο WindPACT. Έτσι το κόστος της νασέλας υπολογίζεται ως προς την ονομαστική ισχύ της Α/Γ από εμπειρική σχέση:

$$Nacelle_{Cost} = 11.537 \cdot (MR)_{kW} + 3849.7 \quad (6.1.16)$$

$$m_{nacelle} = nacelle_{cost} / 10 = 26,924 / 10 \Rightarrow m_{nacelle} = 2,692kg$$

7.1.17. Υπολογισμός κόστους Πύργου (Tower).

Το κόστος του πύργου υπολογίζεται ως προς την επιφάνεια κάλυψης του δρομέα (swept area) καθώς και του ύψους της πλήμνης. Κατά τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται και η μάζα του πύργου σύμφωνα με την εμπειρική σχέση:

$$m_{tower/baseline} = 0.3973 \cdot A_{swept} \cdot H_{hub} - 1414 = 0.3973 \cdot 7854 \cdot 80 - 1414$$

$$\Rightarrow m_{tower/baseline} = 248,218 kg$$

$$m_{tower/advanced} = 0.2694 \cdot A_{swept} \cdot H_{hub} + 1779 = 0.2694 \cdot 7854 \cdot 80 + 1779$$

$$\Rightarrow m_{tower/baseline} = 171,048 kg$$

Ο υπολογισμός του κόστους του πύργου γίνεται με τη 1^η σχέση και θεωρώντας τιμή σιδήρου 1.5€/kg και με αναφορά τη μάζα του πύργου που υπολογίστηκε νωρίτερα:

$$Tower_{Cost} = 1.5 \cdot m_{tower} \quad (6.1.17)$$

7.1.18. Υπολογισμός κόστους Θεμελίωσης (Foundation).

Οι εκτιμήσεις του κόστους θεμελίωσης βασίζονται μόνο στην τεχνική αναφορά λειτουργίας του ρότορα (WindPACT). Οι θεμελιώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη σχέσεων – εκτιμήσεων βασίστηκαν στο σχέδιο των Patrick και Henderson που γενικά μπορεί να αναπαραστήσει τη θεμελίωση ως διάτρητη κούφια προβλήτα (hollow drilled pier). Οι θεμελιώσεις αυτού του τύπου προσεγγίζουν περίπου τη διάμετρο της βάσης του πύργου και μπορούν να έχουν βάθος το λιγότερο 30πόδια ένα βάθος που ισοδυναμεί περίπου σε 10m.

Γενικά το κόστος των θεμελιώσεων κλιμακώνονται ως συνάρτηση του ύψους της πλήμνης και της επιφάνειας κάλυψης του δρομέα σύμφωνα με εμπειρική σχέση:

$$Foundation_{Cost} = 303.24 \cdot (A_{swept} \cdot H_{hub})^{0.4037} \quad (6.1.18)$$



7.1.19. Υπολογισμός κόστους Ελέγχου, Ασφάλειας, Παρακολούθησης Συνθηκών Λειτουργίας του Συστήματος.

Οι μελέτες WindPACT προσδιόρισαν ένα κόστος 10.000\$ για τον έλεγχο, την ασφάλεια και την παρακολούθηση της εγκατάστασης μιας Α/Γ ονομαστικής ισχύος 750kW. Εφαρμόστηκε ένας συντελεστής διόρθωσης για την κλιμάκωση σε μηχανές μεγαλύτερης ισχύος, λαμβάνοντας υπόψη πρόσθετες καλωδιώσεις και αισθητήρες. Ωστόσο, αυτά τα δεδομένα βασίστηκαν σε σχέδια του 1999. Στις αρχές της δεκαετίας του 2000, οι χειριστές συνειδητοποίησαν την αξία της πρόσθετης ανίχνευσης και παρακολούθησης των συστημάτων. Για να ληφθεί αυτό υπόψη, το κόστος ελέγχου αναπροσαρμόστηκε για επίγειες εγκαταστάσεις και αυξήθηκε στα 35.000 \$ το 2002, ανεξάρτητα από το μέγεθος ή την ονομαστική ισχύ της μηχανής. Το νέο κοστολόγιο προέκυψε μετά από συζητήσεις και ανατροφοδότηση μεταξύ της βιομηχανίας και των αναπτυξιακών εταιρών της αγοράς. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω το κόστος του συστήματος ελέγχου, ασφάλειας, παρακολούθησης της όλης εγκατάστασης μιας Α/Γ θεωρείται

Κόστος Ελέγχου = 35,000€

(6.1.19)

Πίνακας 7.1

Αναλυτική Περιγραφή Υπολογισμών Κόστους εγκατάστασης υποσυστημάτων Α/Γ κατά το εγχειρίδιο Wind Turbine Design Cost and Scaling Model Technical Report NREL/TP-500-40566 Dec2006 (Fingersh,, L., Hand, M., Laxson, A.)

1	Κόστος Πτερυγίου	$Blade_{Cost} = 0.5582R^3 + 3.8118R^{2.5025} - 955.24$
2	Κόστος Πλήμνης	$hub_{Cost} = 4.25 \cdot m_{hub}$
3	Κόστος pitch system	$pitch\ system_{Cost} = 2.28 \cdot (0.2106 \cdot D_{rotor}^{2.6578})$
4	Κόστος Κώνου μύτης	$Nose\ cone_{Cost} = 5.57 \cdot m_{nose\ cone}$
5	Κόστος Άξονα χαμηλών στροφών	$Low - speed\ shaft_{Cost} = 0.01 \cdot D_{Rotor}^{2.887}$
6	Κόστος Εδράνων	$Total\ bearing\ System_{Cost} = 2 \cdot 17.6 \cdot m_{bearing}$
7	Κόστος Κιβωτίου ταχυτήτων	$Gearbox_{Cost} = 16.45 \cdot (MR)^{1.249}$
8	Κόστος Φρένου –συνδέσεων	$Brake / Coupling_{Cost} = 1.9894 \cdot MR - 0.1141$
9	Κόστος Γεννήτριας	$Generator_{Cost} = 65 \cdot (MR)$
10	Κόστος Μετατροπέα	$Converter_{Cost} = 79 \cdot (MR)_{kW}$
11	Κόστος Συστήματος Εκτροπής (yaw)	$Yaw\ System_{Cost} = 2 \cdot (0.0339 \cdot D_{rotor}^{2.964})$
12	Κόστος Mainframe	$Mainframe_{Cost} = 9.489 \cdot D_{rotor}^{1.953}$
13	Κόστος Εξεδρών κιγκλιδωμάτων	$Platform / Railing_{Cost} = 8.7 \cdot m_{Platform / Rail}$
14	Κόστος Ηλεκτρικών Συνδέσεων	$Electrical\ Connection_{Cost} = 40 \cdot (MR)_{kW}$
15	Κόστος Υδραυλικών – Ψύξης Α/Γ	$Hydraulic / Cooling_{Cost} = 12 \cdot (MR)_{kW}$
16	Κόστος Νασέλας Α/Γ	$Nacelle_{Cost} = 11.537 \cdot (MR)_{kW} + 3849.7$
17	Κόστος Πύργου Α/Γ	$Tower_{Cost} = 1.5 \cdot m_{tower}$



18	Κόστος θεμελίωσης Α/Γ	$Foundation_{Cost} = 303.24 \cdot (A_{swept} \cdot H_{hub})^{0.4037}$
19	Κόστος Παρακολούθησης Ασφάλειας Συνθηκών Λειτουργίας	$Control_{Cost} = 35,000 \text{ €}$

Πίνακας 7.2

Κοστολόγιο εγκατάστασης υποσυστημάτων Α/Γ κατά το εγχειρίδιο Wind Turbine Design Cost and Scaling Model Technical Report NREL/TP-500-40566 Dec2006 (Fingersh., L., Hand, M., Laxson, A.)

1	$Blade_{Cost} = 0.5582R^3 + 3.8118R^{2.5025} - 955.24$	136,866 €
	$3 - Blade_{Cost} = 3 \cdot 136,866\text{€}$	410,598 €
2	$hub_{Cost} = 4.25 \cdot m_{hub}$	64,022 €
3	$pitch\ system_{Cost} = 2.28 \cdot (0.2106 \cdot D_{rotor}^{2.6578})$	99,310 €
4	$Nose\ cone_{Cost} = 5.57 \cdot m_{nose\ cone}$	7,406 €
5	$Low - speed\ shaft_{Cost} = 0.01 \cdot D_{Rotor}^{2.887}$	5,943 €
6	$Total\ bearing\ System_{Cost} = 2 \cdot 17.6 \cdot m_{bearing}$	42,135 €
7	$Gearbox_{Cost} = 16.45 \cdot (MR)^{1.249}$	218,350 €
8	$Brake / Coupling_{Cost} = 1.9894 \cdot MR - 0.1141$	3,979 €
9	$Generator_{Cost} = 65 \cdot (MR)$	130,000 €
10	$Converter_{Cost} = 79 \cdot (MR)_{kW}$	158,000 €
11	$Yaw\ System_{Cost} = 2 \cdot (0.0339 \cdot D_{rotor}^{2.964})$	57,442 €
12	$Mainframe_{Cost} = 9.489 \cdot D_{rotor}^{1.953}$	76,422 €
13	$Platform / Railing_{Cost} = 8.7 \cdot m_{Platform / Rail}$	19,558 €
14	$Electrical\ Connection_{Cost} = 40 \cdot (MR)_{kW}$	80,000 €
15	$Hydraulic / Cooling_{Cost} = 12 \cdot (MR)_{kW}$	24,000 €
16	$Nacelle_{Cost} = 11.537 \cdot (MR)_{kW} + 3849.7$	26,924 €
17	$Tower_{Cost} = 1.5 \cdot m_{tower}$	372,327 €
18	$Foundation_{Cost} = 303.24 \cdot (A_{swept} \cdot H_{hub})^{0.4037}$	66,453 €
19	$Control_{Cost}$	35,000 €
	Συνολικό Κόστος μονάδας Α/Γ	1,897,869 €

Αθροίζοντας τα επιμέρους χρηματικά ποσά για τα υποσυστήματα της Α/Γ προκύπτει ότι το συνολικό κόστος αυτής ανέρχεται σε 1,897,869 €.

Επομένως για το Α/Π 14MW υπολογίζεται το συνολικό κόστος των Α/Γ το παραπάνω ποσό πολλαπλασιασμένο x7. Ήτοι το συνολικό κόστος θα είναι: 13,285,083 €.



7.2 Υπολογισμός κόστους υπόλοιπων έργων Α/Π.

Πέρα από την αναλυτική περιγραφή για το κοστολόγιο των υποσυστημάτων έκαστης Α/Γ που ολοκληρώθηκε μέχρι αυτού του σημείου, θα πρέπει για την εκτίμηση του κόστους όλου του Α/Π να συνυπολογιστούν και κάποια ακόμα έξοδα αναφορικά με:

7.2.1. Υπολογισμός κόστους Μεταφοράς Εξοπλισμού.

Το κόστος μεταφοράς του εξοπλισμού λαμβάνεται από την τεχνική αναφορά WindPACT και ειδικότερα υπολογίζεται σύμφωνα με την ονομαστική ισχύ της μηχανής. Η σχέση υπολογισμού του κόστους αντανακλά τη μεγάλη αύξηση στο σχετικό κόστος για Α/Γ διαφορετικών μεγεθών ισχύος. Πιο αναλυτικά το κόστος περιγράφεται από τις σχέσεις:

$$\text{Transportation factor} = 1.581 \cdot 10^{-5} \cdot (MR)_{kW}^2 - 0.0375 \cdot (MR) + 54.7 = 42.94$$

$$\text{Transportation}_{\text{cost}} = T_f \cdot (MR)_{kW} = 42.94 \cdot (MR)_{kW} \quad (6.2.1)$$

7.2.2. Υπολογισμός κόστους Παρεμβάσεων Οδικού Δικτύου.

Ο υπολογισμός του κόστους αναφορικά με παρεμβάσεις του οδικού δικτύου λαμβάνονται από την τεχνική αναφορά WindPACT και ειδικότερα τα αναφερόμενα στη μελέτη logistics. Οι εκτιμήσεις περιλαμβάνουν το κόστος που μπορεί να σχετίζεται με διαπλάτυνση δρόμων ώστε να μπορούν να περνούν τα γερανοφόρα οχήματα φορτωμένα με τμήματα των Α/Γ όπως και το κόστος των γερανών. Το κόστος προκύπτει ως προς την ονομαστική ισχύ των Α/Γ.

$$\text{Road Civil factor} = 2.17 \cdot 10^{-6} \cdot (MR)_{kW}^2 - 0.0145 \cdot (MR) + 69.54 = 49.22$$

$$\text{Road Civil}_{\text{cost}} = RC_f \cdot (MR)_{kW} = 49.22 \cdot (MR)_{kW} \quad (6.2.2)$$

7.2.3. Υπολογισμός κόστους Συναρμογής & Εγκατάστασης.

Τα δεδομένα για αυτή τη σχέση προέρχονται από τη μελέτη ρότορα WindPACT. Σύμφωνα με μελέτη αναπτύχθηκε μια μαθηματική έκφραση που βασίζεται στην ονομαστική ισχύ της μηχανής. Παρά ταύτα αυτή η σχέση δεν χρησιμοποιήθηκε.

Αντίθετα, αναπτύχθηκε μια σχέση με βάση το ύψος πλήμνης επί τη διάμετρο του δρομέα που έδωσε σχεδόν μια γραμμική (ευθύγραμμη) σχέση. Αν και οι δύο παραπάνω σχέσεις έχουν σχεδόν γραμμική μορφή πιστεύεται ότι μια συνάρτηση που θα λαμβάνει υπόψη το φυσικό μέγεθος των μεγαλύτερων συνιστωσών θα δώσει μια πιο άμεση σχέση καθώς αυτά τα στοιχεία αλλάζουν σε μέγεθος. Ο υπολογισμός αυτός χρησιμοποιήθηκε τελικά στο μοντέλο.



Είναι πιθανό ότι κάποιος τύπος βηματικής συνάρτησης θα είναι πιο κατάλληλος στο μέλλον για να ληφθούν υπόψη αλλαγές στις απαιτήσεις για διαφορετικά μοντέλα γερανών καθώς αυξάνεται το ύψος του πύργου.

$$Assembly\ Installation_{cost} = 1.965 \cdot (H_{hub} \cdot D_{rotor})^{1.1736} \quad (6.2.3)$$

7.2.4. Υπολογισμός κόστους Ηλεκτρικών Συνδέσεων με το Δίκτυο Χαμηλής Τάσης.

Ο υπολογισμός του κόστους των ηλεκτρικών συνδέσεων καλύπτει τη σύνδεση του μετασχηματιστή με το στρόβιλο και κομμάτι της καλωδίωσης του στρόβιλου με τον υποσταθμό. Αυτά τα δεδομένα προήλθαν αρχικά από τη μελέτη ισορροπίας σταθμού WindPACT και χρησιμοποιήθηκαν σε αυτό το μοντέλο. Ο υπολογισμός γίνεται ως προς την ονομαστική ισχύ της Α/Γ σύμφωνα με την εμπειρική σχέση:

$$Electrical\ interface / connection\ factor = 3.49 \cdot 10^{-6} (MR)_{kW}^2 - 0.0221 \cdot MR + 109.7 = 79.46$$

$$Electrical\ interface / connection\ cost = Eic_f \cdot (MR)_{kW} = 79.46 \cdot (MR)_{kW} \quad (6.2.4)$$

7.2.5. Υπολογισμός κόστους Αδειών Μηχανικών.

Το κόστος αδειών μηχανικού καλύπτουν το κόστος σχεδιασμού και αδειοδότησης ολόκληρης της αιολικής εγκατάστασης, όπως κατανέμεται ανά τουρμπίνα. Αυτά τα κόστη εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την τοποθεσία, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, την προσβασιμότητα στο ηλεκτρικό δίκτυο και τις απαιτήσεις τοπικών αδειών από δήμους κοινότητα περιφέρεια. Ο υπολογισμός του κόστους γίνεται ως προς την ονομαστική ισχύ της Α/Γ σύμφωνα με τις εμπειρικές σχέσεις:

$$Eng\ permits\ cost\ factor = 9.94 \cdot 10^{-4} (MR)_{kW} + 20.31 = 22.30$$

$$Eng\ permits\ cost = Ep_f \cdot (MR)_{kW} = 22.30 \cdot (MR)_{kW}$$



Πίνακας 7.3

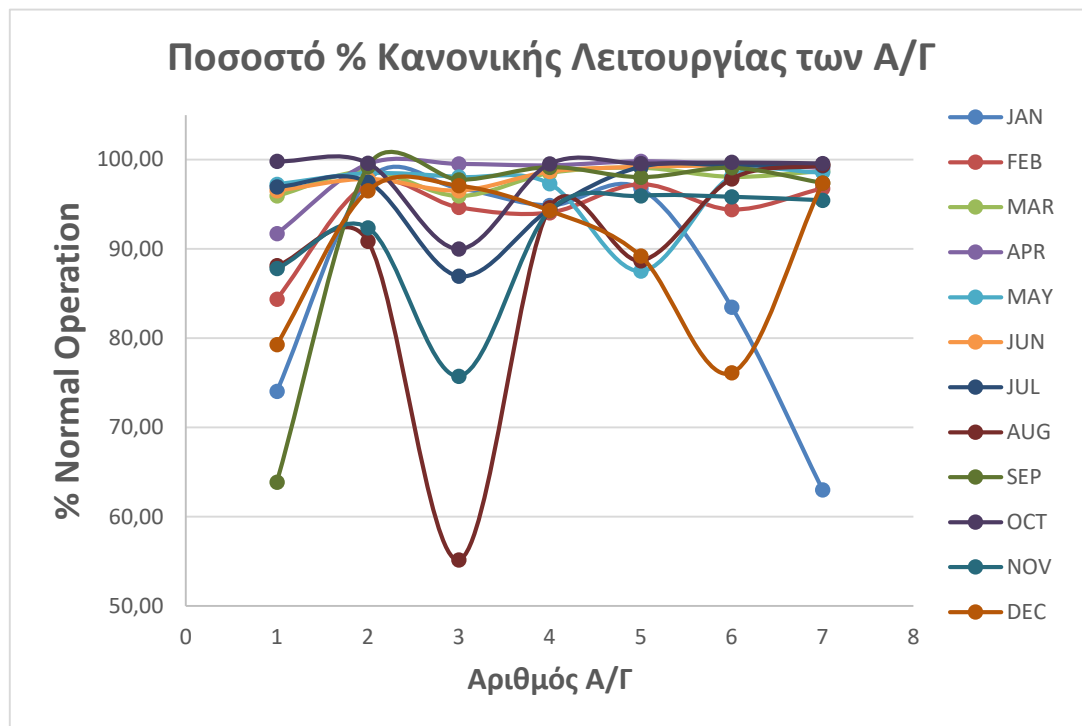
Κοστολόγιο εγκατάστασης συμπληρωματικών έργων εγκατάστασης Α/Π κατά το εγχειρίδιο Wind Turbine Design Cost and Scaling Model Technical Report NREL/TP-500-40566 Dec2006 (Fingersh,, L., Hand, M., Laxson, A.)

1	Total cost Α/Γ (7) V-100 2MW	13,285,083 €
	$Transportation\ factor = 1.581^{-5} \cdot (MR)_{kW}^2 - 0.0375 \cdot (MR) + 54.7$	
2	$Transportation_{cost} = 42.94 \cdot (MR)_{kW}$	85,880 €
	$Road\ Civil\ factor = 2.17 \cdot 10^{-6} \cdot (MR)_{kW}^2 - 0.0145 \cdot (MR) + 69.54$	
3	$Road\ Civil_{cost} = 49.22 \cdot (MR)_{kW}$	98,440 €
4	$Assembly\ Installation_{cost} = 1.965 \cdot (H_{hub} \cdot D_{rotor})^{1.1736}$	74,822 €
	$Electrical\ interface / connection\ factor = 3.49 \cdot 10^{-6} (MR)_{kW}^2 - 0.0221 \cdot MR + 109.7$	
5	$Electrical\ interface / connection_{cost} = 79.46 (MR)_{kW}$	158,920 €
	$Eng\ permits\ cost\ factor = 9.94 \cdot 10^{-4} (MR)_{kW} + 20.31$	
6	$Eng\ permits\ cost = 22.30 \cdot (MR)_{kW} = 44,600€$	44,600 €
	Συνολικό Κόστος μονάδας Α/Π	13,747,745 €



8. Σενάριο λειτουργίας Α/Π.

Στη συνέχεια δίνονται ενδεικτικά κάποια πειραματικά δεδομένα για ένα έτος αναφοράς πάνω στη λειτουργία του Α/Π. Στα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται η απόκλιση της πραγματικής εικόνας και της πραγματικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενός Α/Π ως προς την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια που δίνουν τα διάφορα υπολογιστικά πακέτα και η οποία μπορεί να αποκλίνει έως και αρκετά σημαντικά ως προς την απόδοσή του.



Διάγραμμα 8.1.1 Ποσοστά κανονικής λειτουργίας των Α/Γ του Α/Π.

Στο Διάγραμμα 8.1.1 δίνονται τα ποσοστά κανονικής λειτουργίας των Α/Γ που απαρτίζουν το Α/Π. Με την έννοια κανονική λειτουργία σημαίνει ότι οι Α/Γ παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσα στο επιτρεπτό εύρος ταχυτήτων ανέμου δηλ. μεταξύ της ταχύτητας έναρξης λειτουργίας και της ταχύτητας διακοπής.

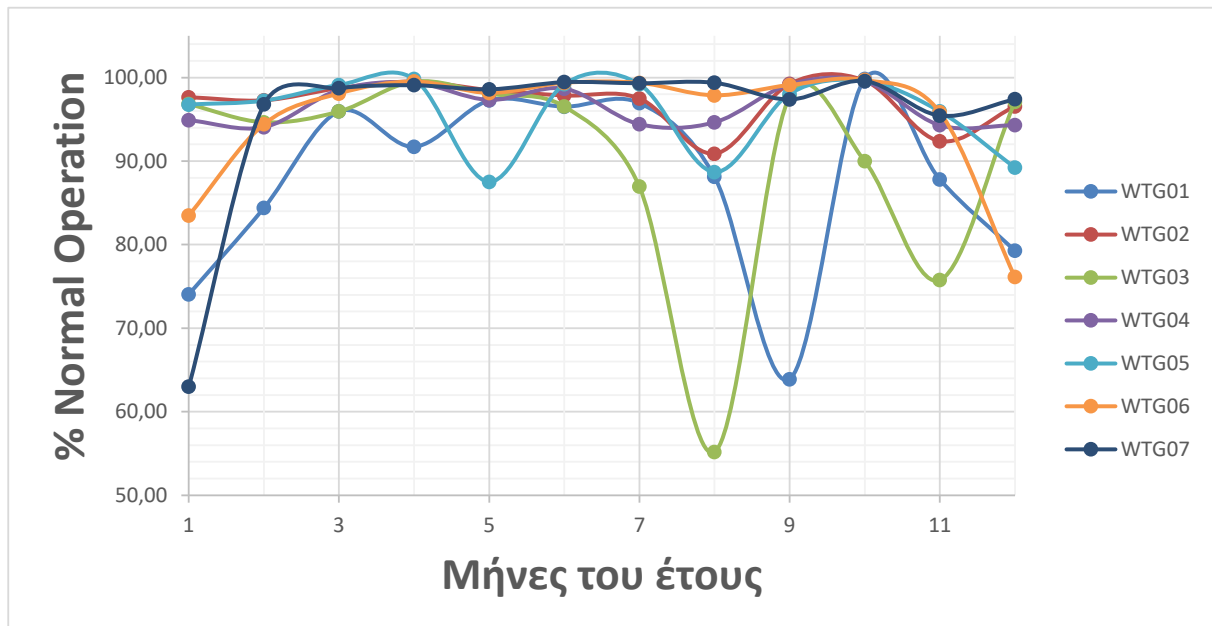
Κάθε καμπύλη διαφορετικού χρώματος αποτελεί και έναν μήνα όπως δείχνει και η λεζάντα δεξιά του διαγράμματος. Φαίνεται χαρακτηριστικά ότι η καμπύλη του Ιανουαρίου (χρώματος μπλε) παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις που οφείλονται στη λειτουργία των WG01, 03, 06, 07. Ειδικότερα φαίνεται ότι μεγαλύτερη δυσλειτουργία παρουσιάζει η WG07 που τον Ιανουάριο το ποσοστό κανονικής λειτουργίας της βάνει μειούμενο προς λίγο υψηλότερο του 60%.

Επίσης η καμπύλη του Αυγούστου σχηματίζει δύο κοιλάδες που οφείλονται στη λειτουργία της WG03 η οποία και είναι πιο φανερά και της WG05. Ειδικότερα η WG03 φαίνεται να δυσλειτουργεί και σε αρκετούς άλλους μήνες του έτους. Για το μήνα Αύγουστο η WG03 παρουσιάζει το χαμηλότερο ποσοστό κανονικής λειτουργίας



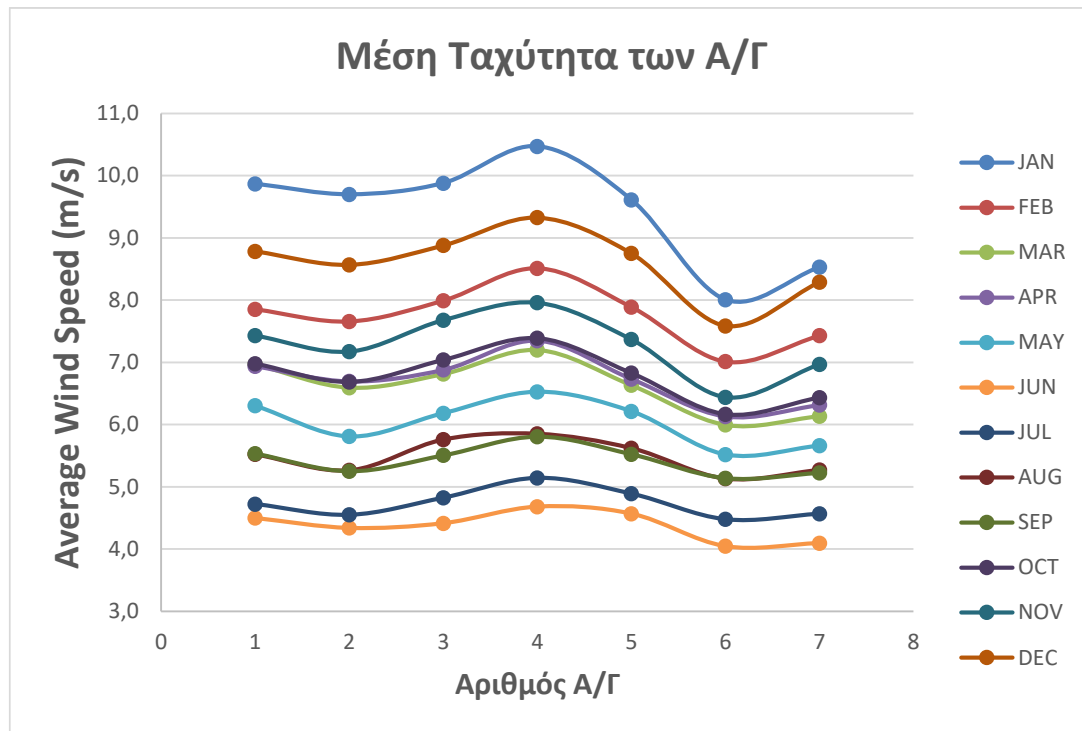
τόσο ως προς τις υπόλοιπες Α/Γ όσο και ως προς όλη τη διάρκεια του έτους, που φθάνει περίπου στο 55%. Γενικότερα η WG03 παρουσιάζει ελάχιστο και σε καμπύλες λειτουργίας άλλων μηνών κάτι που είναι αναγνωριστικό προβλήματος.

Γενικότερα πάντως φαίνεται ότι η κανονική λειτουργία των Α/Γ πέραν των παραπάνω εξαιρέσεων κυμαίνεται σε ποσοστά άνω του 90%.



Διάγραμμα 8.1.2 Ποσοστά κανονικής λειτουργίας των Α/Γ του Α/Π ως προς τους μήνες του έτους.

Στο Διάγραμμα 8.1.2 δίνονται τα ποσοστά κανονικής λειτουργίας των 7 Α/Γ ως προς τους μήνες του έτους. Όπως φαίνεται από τις καμπύλες που αντιστοιχούν στη λειτουργία κάθε μίας Α/Γ τις πιο έντονες βυθίσεις παρουσιάζουν οι WG03, WG01. Ειδικότερα η WG03 δίνει το χαμηλότερο ποσοστό τον Αύγουστο που κυμαίνεται στο 55% ενώ και η WG01 δίνει το χαμηλότερο ποσοστό κανονικής λειτουργίας της το Σεπτέμβριο που κυμαίνεται κοντά στο 65%. Παρά και κάποιες ακόμα μικρότερες διακυμάνσεις – βυθίσεις της λειτουργίας των Α/Γ το μεγαλύτερο ποσοστό κανονικής λειτουργίας τους βρίσκεται άνω του 90%.



Διάγραμμα 8.2.1 Κατανομές μέσης ταχύτητας των Α/Γ στους μήνες του έτους.

Στο Διάγραμμα 8.2.1 δίνονται οι μηνιαίες κατανομές της ταχύτητας του ανέμου που πνέει στις Α/Γ. Οι κατανομές δείχνουν καθαρά διαφοροποίηση ως προς τους μήνες του έτους. Η ένταση του ανέμου διατηρεί ευκρινώς διαφορετικά επίπεδα τιμών ανά μήνα ενώ σε κάποιες περιπτώσεις οι καμπύλες συμπλέκονται γύρω από παρόμοιες μέσες τιμές.

Για παράδειγμα η υψηλότερη καμπύλη του διαγράμματος αναφέρεται στο μήνα Ιανουάριο όπου η μέση ταχύτητα για τις περισσότερες από τις Α/Γ (π.χ τις πρώτες πέντε εξ αυτών) κυμαίνεται γύρω από τα 10m/s. Ειδικότερα στην καμπύλη του Ιανουαρίου η WG04 φθάνει στη μέγιστη ταχύτητα 10.5m/s.

Η ακριβώς χαμηλότερη καμπύλη που ακολουθεί αναφέρεται στο μήνα Δεκέμβριο με μέση ταχύτητα περί τα 9m/s, ενώ η επόμενη καμπύλη που αναφέρεται στο Φεβρουάριο η μέση ταχύτητα κυμαίνεται στο εύρος (8.0 – 8.5) m/s. Ακολουθεί η καμπύλη Νοεμβρίου σε λίγο πιο χαμηλές ταχύτητες. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι στην αμέσως χαμηλότερη στάθμη συμπλέκονται οι καμπύλες μέσης ταχύτητας μηνών Οκτωβρίου, Απριλίου και Μαρτίου γύρω από τα 7m/s. Ακολουθεί η καμπύλη Μαΐου ενώ μαζί στη συνέχεια έρχονται οι καμπύλες Σεπτεμβρίου και Αυγούστου. Όπως είναι μάλλον αναμενόμενο η χαμηλότερη ένταση ανέμου καταγράφεται για τον Ιούνιο και η αμέσως υψηλότερη για τον Ιούλιο.

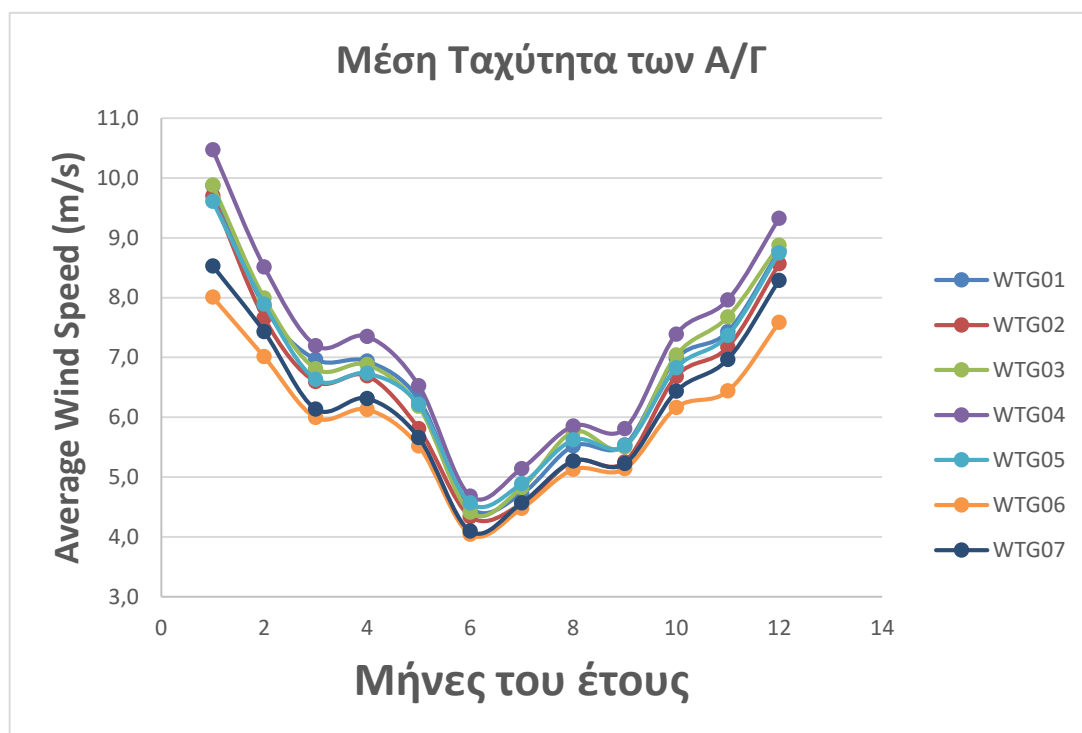
Με την καταγραφή αυτή φαίνεται πως κατανέμεται η ένταση του ανέμου στην περιοχή του Α/Π. Για το συγκεκριμένο έτος φαίνεται ότι το καλοκαιρινό μελέμι δεν δίνει κάποιες ιδιαίτερα αξιολογικές μέσες ταχύτητες.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό που προκύπτει από τις καμπύλες της μέσης ταχύτητας των Α/Γ είναι ότι οι WG06, WG07 αναγνωρίζουν εμφανώς χαμηλότερες μέσες ταχύτητες



με τις μεγαλύτερες βυθίσεις να φαίνονται στην WG06. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τον Ιανουάριο η διαφορά στάθμης των πρώτων 5 Α/Γ με εκείνη των 2 τελευταίων είναι ίσως η μεγαλύτερη. Αυτός είναι και ο μήνας των υψηλότερων μέσων ταχυτήτων. Καθώς σε επόμενους μήνες η ένταση του ανέμου στις Α/Γ πέφτει σε χαμηλότερες στάθμες μέσων τιμών ταχυτήτων η παραπάνω διαφοροποίηση αμβλύνεται, δηλ. η διαφορά των σταθμών μέσων ταχυτήτων μειώνεται.

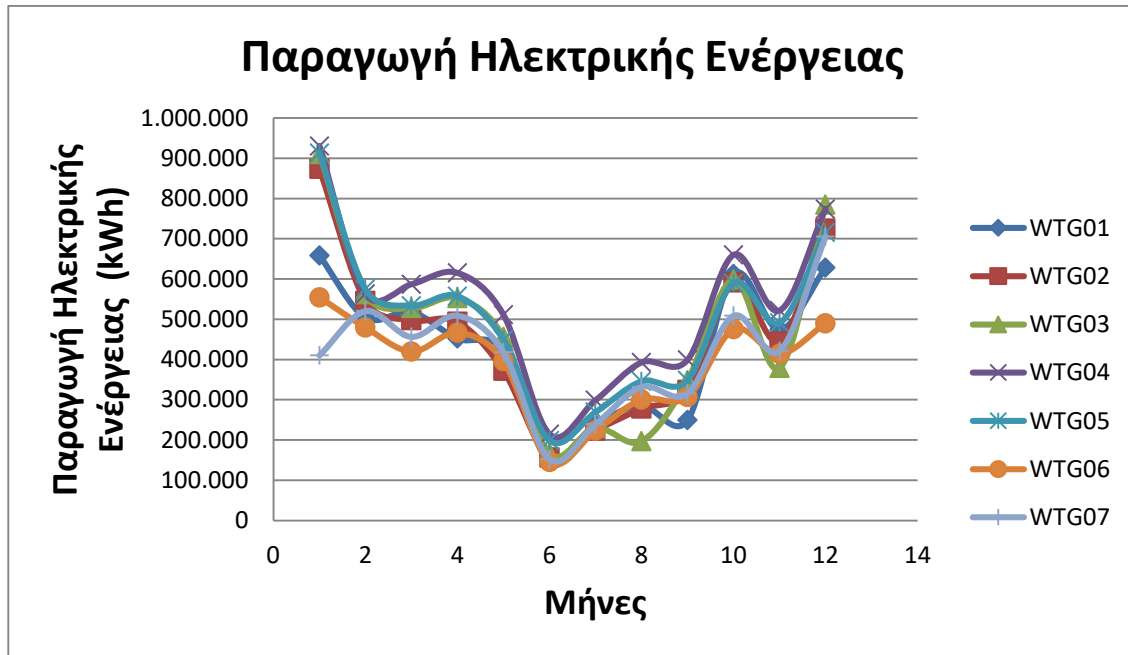
Η συμπεριφορά των Α/Γ παρά τη διαφορά επιπέδων ανά μήνα διατηρεί περίπου ίδια χαρακτηριστικά κάτι που μπορεί να σχετίζεται με τον τρόπο χωροθέτησης αυτών στην συγκεκριμένη τοποθεσία του Α/Π.



Διάγραμμα 8.2.2 Κατανομές μέσης ταχύτητας των Α/Γ του Α/Π ως προς τους μήνες του έτους.

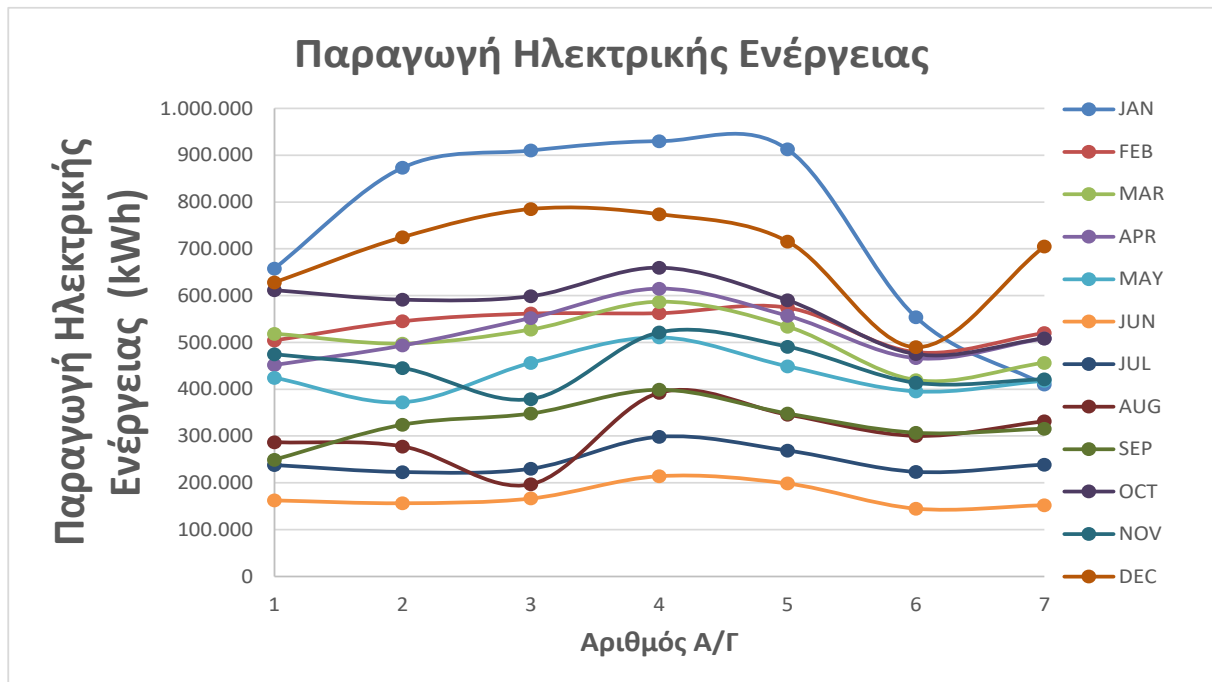
Στο Διάγραμμα 8.2.2 δίνεται η μέση τιμή του ανέμου σε κάθε Α/Γ σε σχέση με τους μήνες του έτους. Οι κατανομές γενικά έχουν παρόμοια συμπεριφορά σχηματίζοντας μια κοιλάδα τους καλοκαιρινούς μήνες. Ειδικότερα τον Ιούνιο φαίνεται ότι σημειώνονται οι μικρότερες τιμές ταχυτήτων του ανέμου που αποτελούν και ελάχιστο των καμπυλών.

Τον Ιανουάριο φαίνεται ένα εύρος τιμών ταχύτητας (8.0 – 10.5)m/s ενώ στο άλλο άκρο το Δεκέμβρη το εύρος έχει μειωθεί σε (7.5 – 9.3)m/s. Τον Ιούνιο επίσης το εύρος είναι το πιο μικρό και περιορίζεται σε (4.0 – 4.7)m/s.



Διάγραμμα 8.3.1 Κατανομές μηνιαίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του Α/Π για κάθε μία Α/Γ.

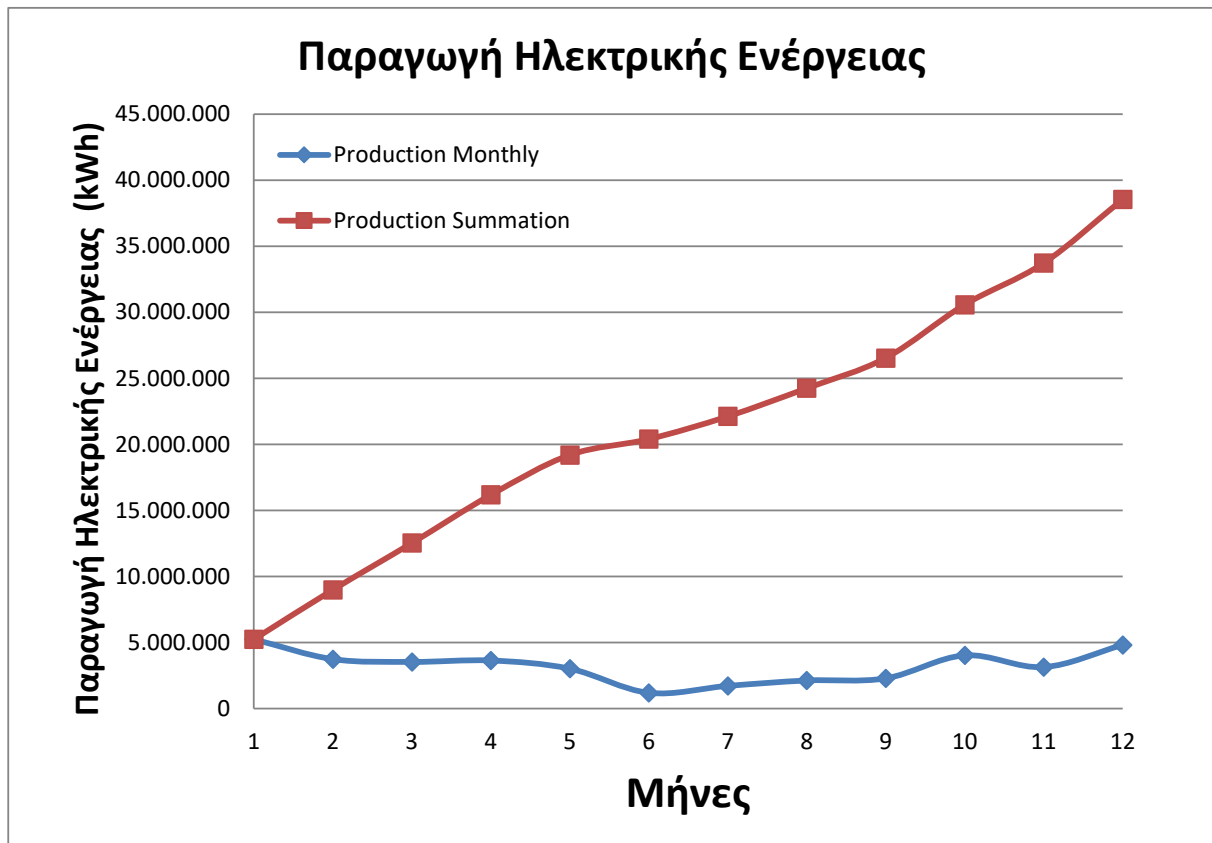
Στο Διάγραμμα 8.3.1 φαίνεται ότι οι καμπύλες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθούν περίπου τις καμπύλες μέσης ταχύτητας ανέμου. Φαίνεται γενικά ότι τον Ιανουάριο οι περισσότερες Α/Γ αποδίδουν μέγιστες τιμές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με μικρές εξαιρέσεις. Φαίνεται ότι 3 εκ των Α/Γ παρουσιάζουν αποκλίσεις στη συμπεριφορά ως προς τις υπόλοιπες. Ειδικότερα τον Ιανουάριο ξεκινώντας από τη χαμηλότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας η σειρά των Α/Γ είναι WG07, WG06 και WG01. Οι υπόλοιπες φαίνεται όπως αναφέρθηκε και παραπάνω ότι διατηρούν πανομοιότυπη συμπεριφορά αποδίδοντας αρκετά μεγαλύτερα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας. Από την άλλη πλευρά του διαγράμματος φαίνεται ότι το Δεκέμβρη η συμπεριφορά της WG07 έχει διορθωθεί και ακολουθεί την πορεία των περισσότερων Α/Γ ενώ χαμηλότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εξακολουθεί να δίνουν οι WG06 και WG07.



Διάγραμμα 8.3.2 Κατανομές μηνιαίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του Α/Π για κάθε μία Α/Γ ως προς τους μήνες του έτους.

Στο Διάγραμμα 8.3.2 δίνονται μηνιαίες κατανομές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τις 7 Α/Γ του Α/Π. Η παραγωγή διακρίνεται σε διαφορετικές στάθμες με την υψηλότερη στάθμη να αντιστοιχεί στον Ιανουάριο που ακολουθείται από το Δεκέμβρη και τον Οκτώβρη. Πιο χαμηλά οι καμπύλες των μηνών Φεβρουαρίου, Απριλίου, Νοεμβρίου φαίνεται ότι δίνουν παρόμοια ποσά ηλεκτρικής ενέργειας. Παρατηρώντας επίσης από τα πιο χαμηλά επίπεδα, η χαμηλότερη στάθμη αντιστοιχεί στον Ιούνιο, λίγο ψηλότερα είναι η κατανομή Ιουλίου και μετά οι καμπύλες Αυγούστου Σεπτεμβρίου ακολουθούν παρόμοια συμπεριφορά αποδίδοντας περίπου ίδια ποσά ηλεκτρικής ενέργειας. Αξίζει να σημειωθεί μια βύθιση που παρουσιάζει η WG03 τον Αύγουστο που μπορεί να οφείλεται σε έργα συντήρησης που την θέτουν εκτός λειτουργίας για κάποιες μέρες του μήνα.

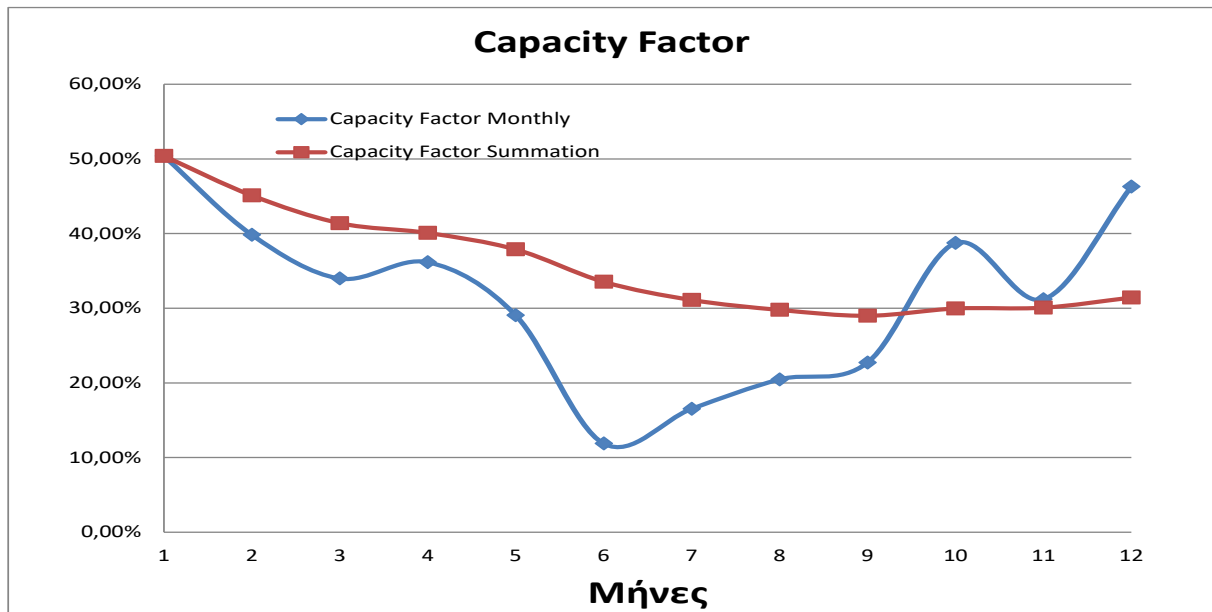
Ακόμα τον Ιανουάριο φαίνεται ότι οι WG06, WG07 αποδίδουν σημαντικά χαμηλότερα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας κάτι που δεν φαίνεται για το Φεβρουάριο στην WG07. Γενικά φαίνεται ότι του χειμερινούς μήνες η παραγωγή είναι η μεγαλύτερη λόγω των έντονων καιρικών φαινομένων στην περιοχή ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες η παραγωγή βρίσκεται στις χαμηλότερες στάθμες.



Διάγραμμα 8.4 Κατανομές μηνιαίας και αθροιστικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του Α/Π για κάθε μία Α/Γ ως προς τους μήνες του έτους.

Στο Διάγραμμα 8.4 δίνεται η μέση μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η αθροιστική κατανομή που οδηγεί στην ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα η καμπύλη μηνιαίας κατανομής έχει σχεδόν σταθερή συμπεριφορά με μικρές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια των περισσότερων μηνών του έτους με εξαίρεση τους καλοκαιρινούς που φαίνεται να πέφτει επίπεδο σε σημαντικά χαμηλότερη παραγωγή, η οποία φθάνει μέχρι και το Σεπτέμβριο.

Σε ότι αφορά την καμπύλη αθροιστικής κατανομής φαίνονται διαφορετικές κλίσεις. Οι οξύτερες κλίσεις αναφέρονται σε μεγαλύτερο ρυθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κάτι που φαίνεται στο τμήμα των πρώτων 5 μηνών του έτους (1-5) και παρόμοια είναι η κλίση στους τελευταίους μήνες από το Σεπτέμβρη μέχρι και το Δεκέμβρη. Αντίθετα η κλίση της καμπύλης διαφοροποιείται από τον Μάη μέχρι το Σεπτέμβρη και φαίνεται μικρότερη των υπόλοιπων 2 τμημάτων κάτι που δείχνει ότι ο ρυθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι μικρότερος.



Διάγραμμα 8.5 Κατανομές του συντελεστή ισχύος σε μηνιαία και αθροιστική βάση για όλο το έτος.

Στο Διάγραμμα 8.5 δίνεται η συμπεριφορά του συντελεστή ισχύος καθόλη τη διάρκεια του έτους για όλο το Α/Π. Η μηνιαία καμπύλη δείχνει αρκετές διακυμάνσεις με τις χαμηλότερες τιμές πάλι να φαίνονται στους καλοκαιρινούς μήνες ενώ οι υψηλότερες τιμές φαίνονται για Ιανουάριο (50%) και Δεκέμβριο (περίπου 45%).

Η αθροιστική καμπύλη του συντελεστή ισχύος δείχνει μια συνεχή πτωτική τάση ξεκινώντας από την υψηλότερη τιμή τον Ιανουάριο και πέφτει μέχρι και 30% μέχρι το Δεκέμβριο του έτους.



9 Συμπεράσματα.

Όπως αναφέρει και ο Ζερβός (2018) «Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια καθαρή, αποτελεσματική και αξιόπιστη τεχνολογία, αλλά και την κύρια εναλλακτική ενεργειακή λύση για ένα καθαρό περιβάλλον και την αιεφόρο ανάπτυξη. Η Ευρώπη υπήρξε πρωτοπόρος στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας και συνετέλεσε με την πολιτική της στην ραγδαία τεχνολογική πρόοδο που ακολούθησε την εμφάνιση των πρώτων εφαρμογών στις αρχές τις δεκαετίας του 80. Οι σημερινές, σύγχρονες ανεμογεννήτριες επιδεικνύουν υψηλό τεχνολογικό επίπεδο, εξελιγμένους τρόπους παραγωγής, γρήγορη εγκατάσταση, υψηλή διαθεσιμότητα και αξιοπιστία».

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται μεγέθη μηχανών που μπορούν να κυμαίνονται από λίγα kW έως μερικά MW. Οι Α/Γ μπορούν πλέον να ξεπερνούν τα 160m ύψος και φθάνουν σε ονομαστική ισχύ τα 8MW. Το κόστος των Α/Γ ακολουθεί μια σταθερά πτωτική πορεία κάτι που κάνει και πιο φθηνή την ενέργεια στον καταναλωτή. Αξίζει να σημειωθεί ότι στα αρχικά στάδια ανάπτυξης των Α/Γ το κόστος της kWh μπορεί να έφθανε έως και 7 φορές ακριβότερο από το συμβατικό καύσιμο (πετρέλαιο).

Στις μέρες μας με την ακρίβεια που πέφτει πάνω σε όλη την Ευρώπη λόγω της μακρόχρονης εξάρτησής της από το Ρωσικό φυσικό αέριο οι ΑΠΕ και ειδικότερα η ενέργεια από Α/Π μοιάζει να είναι μια ασφαλής λύση στο ενεργειακό πρόβλημα. Το κόστος παραγόμενης ενέργειας είναι πλέον ανταγωνιστικό σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (πυρηνική ενέργεια, άνθρακας-λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο). Επιπλέον, το κόστος δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις των καυσίμων, και είναι γνωστό εξαρχής για όλη τη διάρκεια ζωής του έργου.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την αιολική ενέργεια, οδηγεί στην προστασία του περιβάλλοντος στον περιορισμό του φαινομένου του θερμοκηπίου και της κλιματικής αλλαγής αφού είναι μια διαδικασία με σχεδόν μηδενικούς ρύπους προς την ατμόσφαιρα.

Σε εθνικό επίπεδο η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, συμβάλει στην ενεργειακή ανεξάρτηση και την ασφαλή τροφοδοσία, καθώς το «καύσιμο», δηλαδή ο άνεμος είναι εγχώριο, άφθονο, ανεξάντλητο και παρέχεται δωρεάν από τη φύση. Τέλος, η ραγδαία ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, συντελεί στην δημιουργία απασχόλησης σε εθνικό, περιφερειακό και τοπικό επίπεδο.

Η ταχύτατη και συνεχής ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας τα τελευταία σχεδόν 30 χρόνια αποτελεί ένα παγκόσμιο φαινόμενο ανάπτυξης. Η Δανία υπήρξε η πρώτη Ευρωπαϊκή χώρα που υιοθέτησε μια επιτυχημένη πολιτική ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας και παρέμεινε η κυρίαρχη χώρα αναφορικά με την παραγωγή ηλεκτρισμού από αιολική ενέργεια μέχρι σήμερα. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, η κλίμακα ανεμογεννητριών μεγέθους 300 με 500 kW άρχισε να εισάγεται με επιτυχία στην υπόλοιπη Ευρώπη, σηματοδοτώντας την έκρηξη της αιολικής ενέργειας στη Γερμανία. Η Γερμανική βιομηχανία αιολικής ενέργειας έφτασε τα τεχνολογικά επίπεδα της Δανίας και διαδραματίζει πρωταγωνιστικό ρόλο στην παγκόσμια αγορά αιολικών συστημάτων.



Με καθαρά οικονομικούς όρους χωρίς επιδοτήσεις, η αιολική ενέργεια αποτελεί την πλέον ανταγωνιστική τεχνολογία, στις περισσότερες αγορές. Σήμερα η αιολική ενέργεια καλύπτει τις ηλεκτρικές ανάγκες για περισσότερα από 540 εκατομμύρια ανθρώπους σε όλο τον κόσμο, με περισσότερες από 380.000 ανεμογεννήτριες ήδη εγκατεστημένες.

Προσφέρει απασχόληση σε περισσότερους από 320.000 ανθρώπους και αναπτύσσεται με μέσο ετήσιο ρυθμό (τα τελευταία 5 χρόνια) 14%. Στην Ευρώπη, οι εγκαταστάσεις έχουν ξεπεράσει τα 178.1 GW, με χαρακτηριστικό τη συνεχή πτώση τιμών και το άνοιγμα νέων αγορών (off shore, αντικατάσταση). Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά είναι 336TWh ετησίως και καλύπτει το 11.6% της συνολικής ηλεκτρικής κατανάλωσης στην ΕΕ (με 2900 TWh ετήσια ζήτηση) ή ισοδύναμα παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε 90 εκατομμύρια νοικοκυριά. Η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών από την αιολική ενέργεια εξοικονομεί περισσότερους από 270 εκ. τόννους CO₂, αντίστοιχα το ετήσιο κόστος καυσίμου που αποφεύγεται φτάνει στα 20 δις €. Σήμερα ένα νέο άνοιγμα προς θαλάσσιες (Offshore) εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας γίνεται τόσο στην Ευρώπη όσο και παγκοσμίως. Κάθε χρόνο προστίθενται αρκετά GW προσφερόμενης ηλεκτρικής ισχύος και ενέργειας στα δίκτυα (Ζερβός 2018).

Από τη μελέτη της παρούσας εργασίας δόθηκε η πραγματική εικόνα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα Α/Π που διαφέρει σημαντικά από μια μελέτη προσομοίωσης.



Βιβλιογραφία

Ελληνική

1. Αποστολόπουλος Ν., (2016), «Υπολογιστική μελέτη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα με τη μέθοδο στοιχείου πτερυγίου – BEM με σκοπό τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της» Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία προγράμματος «Συστήματα Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας» Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας
2. Ασλάνης Δ., Κυριακόπουλος Ι., (2020), «Μελέτη Αιολικού Πάρκου 12MW (Κάρυστος)», Πτυχιακή Εργασία Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας
3. Ασπρομάλης Ε., Ροΐδης Κ., (2020), «Οικονομοτεχνική Μελέτη Εγκατάστασης Αιολικού Πάρκου στη νήσο Σίφνο μέσω Υπολογιστικού Πακέτου», Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας
4. Ζερβός (2018) Σημειώσεις Αιολικής Ενέργειας Α. Ζερβός, Γ. Κάραλης ΕΜΠ
5. Λευθεριώτης Γ. (2015) Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας Ενότητα Αιολική Ενέργεια Έκδοση 1.0 Πάτρα 2015 Ανοικτά Ακαδ. Μαθήματα Παν/μίου Πατρών, Σχολή θετικών Επιστημών Τμήμα Φυσικής. (Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://eclass.upatras.gr/modules/units/?course=PHY1953&id=4383>)
6. Μάρης Λ., Τόσκας Κ., (2022), «Μελέτη Εγκατάστασης Αιολικού Πάρκου στο Αραχναίο Αργολίδας», Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου
7. Μαρνέλλος Γ. (2020) «Αιολική Ενέργεια – Ειδικά Κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας» Παν. Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχ/γων Μηχανικών Ανοικτά Ψηφιακά Μαθήματα του Παν/μίου Δυτικής Μακεδονίας
8. Πολυζάκης Απόστολος «Ρευστοδυναμικές μηχανές Στροβιλομηχανές-Υδροδυναμικές μηχανές (2019) Εκδόσεις Power Heat Cool
9. Τσαουσάνιδης Ν., (2012) «Επεξεργασία & Αξιολόγηση Αιολικού Δυναμικού» ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας, Τμήμα Μηχ/γων Μηχανικών & Βιομηχανικού Σχεδιασμού, Εργαστήριο ΗΜΕ Έκδοση 1.0 Γρεβενά 2012

Ξενόγλωσση

1. Justus, C.; W, H.; Amir, M.; Denise, G. Methods for Estimating Wind Speed Frequency Distribution. Journal of Applied Meteorology [Online] 1977, N° 17
2. Saaty, T. L. How to make a decision: The analytic hierarchy process. European Journal of Operational Research 1990, 48 (1), 9–26. DOI: 10.1016/0377-2217(90)90057-I.
3. Tegou, L.; Polatidis, H.; Haralambopoulos, A. Environmental management framework for wind farm siting: Methodology and case study. Journal of Environmental Management [Online] 2010, No. 91, 2134–2147



4. Zobaa, A. F.; Bansal, R. C. Handbook of renewable energy technology; World Scientific: Hackensack, NJ, 2011
5. AASHTO. Roadside Design Guide, Fourth Edition with 2015 Errata, RSDG-4. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2011

Ιστοσελίδες – Διαδίκτυο

1. <https://www.windfarmbop.com/wp-content/uploads/2014/11/Correlazione-CBR-aggregate-thickness.pdf>
2. Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (<http://www.rae.gr/>)
3. <https://eletaen.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=875b7ea838cf4fe6a937c4be90fa8edd&extent=2070592.4486%2C4027438.181%2C3489263.6936%2C5196618.9657%2C102100>
4. <https://rechneronline.de/wind-power/> (Υπολογισμός Ισχύος Α/Γ – εργαλείο)
5. <http://www.aiolikigi.gr/el/e-learning/wind-parks-annual-electricity-production/>
6. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-33052009000300006&script=sci_arttext#fig2
7. <https://keisan.casio.com/exec/system/1180573444> (Υπολογισμός Συνάρτησης Γάμμα)
8. <https://keisan.casio.com/exec/system/1180573175> (Υπολογισμός παραμέτρων Weibull)
9. https://www.meteoblue.com/el/%CE%BA%CE%B1%CE%B9%CF%81%CF%8C%CF%82/historyclimate/climatemodelled/%CE%9D%CE%B1%CF%8D%CF%80%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%BF%CF%82_%CE%95%CE%BB%CE%BB%CE%AC%CE%B4%CE%B1_256639 (Ροδόγραμμα Ναύπακτος)
10. https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%BD%CE%B1%CE%BD%CE%B5%CF%8E%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%B5%CF%82_%CF%80%CE%B7%CE%B3%CE%AD%CF%82_%CE%B5%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CF%82
11. <https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MECH283/%CE%A0%CE%B1%CF%81%CE%BF%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%AC%CF%83%CE%B5%CE%B9%CF%82/3.%20%CE%91%CE%9D%CE%95%CE%9C%CE%9F%CE%93%CE%95%CE%9D%CE%9D%CE%97%CE%A4%CE%A1%CE%99%CE%95%CE%A3.pdf> (Ανεμογεννήτριες Διδάσκων: Δρ. Βαφειάδης Κυριάκος)
12. <https://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/5049/1/Diplwmatiki.pdf>
13. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΠΑΠΑΔΑΚΗΣ
14. <http://www.gaiacomm.gr/Greek%20Version/Masts.html> (Μετεωροπλοιοί ιστοί)
15. <http://www.rae.gr/geo/?tab=panel-1386>
16. <https://meteocharilaou.gr/wind-rose/>
17. https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%95%CF%83%CF%89%CF%84%CE%B5%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82_%CE%B2%CE%B1%CE%B8%CE%BC%CF%8C%CF%82_%CE%B1%CF%80%CF%8C%CE%B4%CE%BF%CF%83%CE%B7%CF%82
18. <https://www.vestas.com>
19. <http://nozebra.ipapercms.dk/Vestas/Communication/Productbrochure/2MWbrochure/2MWProductBrochure/?page=8> Φυλλάδιο τεχνικών προδιαγραφών Vestas