

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ

ΙΔΡΥΜΑ ΠΑΤΡΑΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμός 1124

ΘΕΜΑ:

**« ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ. ΜΕΛΕΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ ΣΤΟΝ ΑΧΛΑΔΟΚΑΜΠΟ
ΑΡΓΟΛΙΔΑΣ »**

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ:

κ. ΛΙΑΡΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Η ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ:

ΚΩΤΣΙΟΠΟΥΛΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ

ΠΑΤΡΑ 2010

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής μου εργασίας κ. Γεώργιο Λιαρόπουλο για την ευκαιρία που μου έδωσε να συγγράψω την εργασία αυτή καθώς και για τις συμβουλές του.

Ιδιαιτέρως βέβαια επιθυμώ να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου που στάθηκαν δίπλα μου όλο αυτόν τον καιρό και μου έδωσαν κουράγιο σε κάθε δυσκολία που αντιμετώπισα, καθώς και την Ηλιάνα για την πολύτιμη βοήθεια της.

Περίληψη

Τόσο η σταδιακή μείωση των αποθεμάτων των «συμβατικών» φυσικών πόρων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όσο και η ολοένα αυξανόμενη απαίτηση για «καθαρή» ενέργεια έχουν εδώ και μερικά χρόνια στρέψει το ενδιαφέρον προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Από αυτές πρωτεύοντα ρόλο σε πολλά κράτη της Ε.Ε. διαδραματίζει ήδη η αιολική ενέργεια. Η πορεία της στην Ελλάδα χαρακτηρίζεται από υψηλές προσδοκίες και έντονο επενδυτικό ενδιαφέρον αλλά ταυτόχρονα υστέρηση στην υλοποίηση των έργων και αρκετές απογοητεύσεις κατά την διάρκεια αυτής της διαδικασίας. Παρόλα αυτά το ενδιαφέρον ολοένα και αυξάνεται άλλοτε με μικρά και άλλοτε, με μεγάλα αιολικά πάρκα σε κάποιες από τις πολλές ευνοϊκές τοποθεσίες που διαθέτει η χώρα μας.

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η επισκόπηση του σημερινού τεχνολογικού υπόβαθρου στο χώρο των ανεμογεννητριών και η διερεύνηση της λειτουργίας του αιολικού πάρκου στον Αχλαδόκαμπο του νομού Αργολίδας. Αιολικό πάρκο ισχύος 42 MW(14*3 MW) με ανεμογεννήτριες τύπου vestas v90/3 MW , με διάμετρο στροφείου 90 M, ύψος πυλώνα 80M, αριθμό στροφών στροφείου 16 RPM και έλεγχο στροφών στροφείου pitch required(hurdaulik). Γεννήτρια dfim, ασύγχρονη τριφασική 1000v/3mw με έλεγχο στον ρότορα (1500RPM) με μετατροπείς (σε περικοπή (CUT IN:3,5M/SEC και CUT OUT:25M/SEC). Έξοδος τάσης της ανεμογεννήτριας 20kVμε μετασχηματιστή ο οποίος βρίσκεται στην νασέλλα. Αυτά ήταν τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας vestas που υπάρχει στο αιολικό πάρκο Αχλαδόκαμπου κύριο θέμα της πτυχιακής εργασίας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Ευχαριστίες	3
Περίληψη.....	4
Κατάλογος Εικόνων.....	9
Πρόλογος	14

ΜΕΡΟΣ Α: ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Κεφάλαιο 1	16
1 Εισαγωγή – Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως λύση στο παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα	16
1.1 Το παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα.....	16
1.2 Η Ελλάδα και η εξάρτηση της από τα ορυκτά καύσιμα	18
1.3 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως λύση στο ενεργειακό πρόβλημα	21
Κεφάλαιο 2	26
2 Ο άνεμος ως πηγή ενέργειας.....	26
2.1 Ύπαρξη ανέμου.....	26
2.2 Αιολικό Δυναμικό.....	29
2.3 Μεταβολή του ανέμου λόγω εμποδίων.....	33
2.3.1 Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους.....	33
2.3.2 Επίδραση του ανάγλυφου της γης	36
Κεφάλαιο 3	39
3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο.....	39
3.1 Ιστορική αναδρομή	39
3.2 Κατηγορίες ανεμογεννητριών.....	46
3.2.1 Κατηγοριοποίηση με βάση την μηχανική ισχύ N_0	46

3.2.2	Κατηγοριοποίηση με βάση την παράμετρο περιστροφής λ	47
3.2.3	Κατηγοριοποίηση με βάση την παράμετρο στιβαρότητας σ	47
3.2.4	Κατηγοριοποίηση με βάση τον αριθμό των πτερυγίων.....	49
3.2.5	Κατηγοριοποίηση με βάση την τοποθέτηση του άξονα περιστροφής	50
3.2.5.1	Αιολικές μηχανές – ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (VAWT)	50
3.2.5.2	Αιολικές μηχανές – ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWT)	53
3.3	Λειτουργία ανεμογεννητριών – Παραγωγή ισχύος	55
3.3.1	Μετατροπή της ταχύτητας του ανέμου σε περιστροφή του ρότορα	56
3.3.2	Η ανεμογεννήτρια ως μέρος ενός ροϊκού πεδίου – Η μονοδιάστατη θεωρία της συνέχειας για ιδανική ανεμογεννήτρια	58
3.3.3	Παραγωγή ισχύος	61
3.4	Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών.....	62
3.4.1	Ύψος ανεμογεννήτριας και διάμετρος ρότορα.....	63
3.4.2	Συντελεστής ισχύος C_p	66
3.4.3	Καμπύλη ισχύος	68
 ΜΕΡΟΣ Β: ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΣΤΟΝ ΑΧΛΑΔΟΚΑΜΠΙΟ ΑΡΓΟΛΙΔΟΣ.....		69
Κεφάλαιο 4		70
4 Η ανεμογεννήτρια Vestas V90 – 3MW		70
4.1	Η εταιρία Vestas	70
4.1.1	Η Vestas στον κόσμο.....	71
4.1.2	Η Vestas στην Ελλάδα.....	72
4.2	Τεχνικά δεδομένα – Κατασκευαστικά στοιχεία	73
4.2.1	Ο πλώνας	73
4.2.2	Η νασέλλα.....	75

4.2.2.1	Άτρακτος μεταφοράς ισχύος.....	77
4.2.2.2	Κιβώτιο ταχυτήτων	78
4.2.2.3	Φρένα	80
4.2.2.4	Γεννήτρια	80
4.2.2.5	Μετασχηματιστής.....	82
4.2.2.6	Σύστημα προσανατολισμού ανεμογεννήτριας	82
4.2.2.7	Υδραυλικό σύστημα.....	83
4.2.2.8	Σύστημα λίπανσης.....	88
4.2.2.9	Σύστημα ψύξης.....	92
4.2.2.10	Αισθητήρες.....	92
4.2.3	Ο ρότορας.....	93
4.2.3.1	Πτερύγια.....	94
4.2.3.2	Κόμβος σύνδεσης πτερυγίων – νασέλλας (hub)	96
4.2.4	Συστήματα ασφαλείας.....	97
4.2.4.1	Διακόπτης ισχύος	97
4.2.4.2	Γείωση.....	98
4.2.4.3	Αντικεραυνική προστασία.....	98
4.2.5	Μονάδα ελέγχου.....	98
4.3	Λειτουργία	100
4.3.1	Χαρακτηριστική ισχύος.....	101
4.3.2	Καμπύλη θορύβου	102
4.4	Συντήρηση	104
4.5	Οικονομικά μεγέθη	104
Κεφάλαιο 5.....		106
5	Η τοποθεσία και το αιολικό πάρκο	106

5.1	Η τοποθεσία	106
5.1.1	Η κοινότητα του Αχλαδόκαμπου.....	106
5.1.2	Το αιολικό δυναμικό της περιοχής.....	107
5.2	Αιολικό πάρκο	110
5.2.1	Κατασκευαστικά στάδια ανάπτυξης αιολικού πάρκου	110
5.2.1.1	Γενική χωροθέτηση αιολικού πάρκου.....	111
5.2.1.2	Εσωτερική χωροθέτηση αιολικού πάρκου	112
5.2.1.3	Οδική πρόσβαση και πρόσβαση στο δίκτυο της ΔΕΗ.....	114
5.2.2	Επιπτώσεις της κατασκευής του αιολικού πάρκου στην ευρύτερη περιοχή	114
5.2.2.1	Οπτική όχληση	114
5.2.2.2	Ακουστική όχληση	114
5.2.2.3	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	115
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		117

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Παγκόσμια αποθέματα καρβούνου το έτος 2007 ^[27]	17
Εικόνα 1.2: Παγκόσμια κατανάλωση καρβούνου ανά χώρα (σε εκατομμύρια τόνων) ^[27]	18
Εικόνα 1.3: Κοιτάσματα λιγνίτη στην Ελληνική επικράτεια ^[2]	19
Εικόνα 1.4: Εξόρυξη λιγνίτη (σε εκατομμύρια τόνους) για ηλεκτροπαραγωγή ^[28]	20
Εικόνα 1.5: Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τα τελευταία 20 έτη στην Ελλάδα ^[2]	20
Εικόνα 1.6: Ετήσια κατά κεφαλήν κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος στην Ελλάδα ^[28]	21
Εικόνα 1.7: Εγκατεστημένη Ισχύς ΑΠΕ στην Ελλάδα το 2007 ^[13]	23
Εικόνα 1.8: Εγκατεστημένη ισχύς (σε MW – πάνω πίνακας) και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (σε GWh – κάτω πίνακας) στην Ελλάδα τα τελευταία 15 έτη ^[2]	24
Εικόνα 2.1: Κίνηση των αέριων μαζών λόγω της διαφοράς της θερμοκρασίας μεταξύ ισημερινού και πόλων ^[39]	26
Εικόνα 2.2: Κίνηση των αερίων μαζών στην γήινη ατμόσφαιρα, επηρεασμένων από το φαινόμενο Coriolis ^[40]	27
Εικόνα 2.3: Ισχύς των ανέμων στον ευρωπαϊκό χώρο ^[5]	28
Εικόνα 2.4: Κατανομή Weibull για διαφορετικές παραμέτρους μορφής C ^[8]	32
Εικόνα 2.5: Μεταβολή του προφίλ του ανέμου μετά το πέρασμα από μια συστοιχία δέντρων ^[8]	34
Εικόνα 2.6: Μεταβολή του προφίλ του ανέμου αναλόγως της τραχύτητας του εδάφους ^[15]	34
Εικόνα 2.7: Τιμή της τραχύτητας αναλόγως της επιφάνειας ^[5]	35
Εικόνα 2.8: Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου κατά το πέρασμα πάνω από χαμηλό λόφο (επάνω) και μεταβολή του ροϊκού πεδίου κατά το πέρασμα από αρκετά απότομο βουνό (κάτω) ^[41]	37
Εικόνα 2.9: Κίνηση των αερίων μαζών κατά το πέρασμα τους επάνω από διαφορετικά ανάγλυφα (αριστερά) ^[42] και μέσα από μια κοιλάδα (δεξιά) ^[9]	38
Εικόνα 3.1: Ανεμόμυλοι της Αρχαίας Περσίας για άλεση δημητριακών (αριστερά) και της Αρχαίας Κίνας για άντληση νερού ^[5]	39
Εικόνα 3.2: Γερμανικός ανεμόμυλος τύπου φυλακίου (αριστερά) και ολλανδικός ανεμόμυλος τύπου πύργου (δεξιά) ^[5]	40
Εικόνα 3.3: Ανεμόμυλος αμερικάνικου τύπου για άντληση νερού ^[33]	41

Εικόνα 3.4: Η πρώτη ανεμογεννήτρια, κατασκευασμένη από τον La Cour στο Askov της Δανίας το 1891 ^[5]	42
Εικόνα 3.5: Οι πρώτες ανεμογεννήτριες του La Cour κατασκευής του 1908 (αριστερά) και του Smidth κατασκευής του 1941 (δεξιά) ^[5]	43
Εικόνα 3.6: Ανεμογεννήτρια ισχύος 20000 kW των KleinHerz – MAN (αριστερά) και ανεμογεννήτρια ισχύος 1250 kW των Putnam – Smith (δεξιά) ^[5]	44
Εικόνα 3.7: Αιολικό πάρκο, κατασκευασμένο το 1986 στην Καλιφόρνια ^[5]	45
Εικόνα 3.8: Πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο στην τοποθεσία Vindeby της Δανίας ^[34]	45
Εικόνα 3.9: Αιολικές μηχανές οριζόντιου άξονα ενός, δύο και τριών πτερυγίων (επάνω αριστερά), πολύπτερη αιολική μηχανή οριζόντιου άξονα (επάνω δεξιά) και αιολικές μηχανές κατακόρυφου άξονα, τύπου Darrieus τριών και δύο πτερυγίων (κάτω) ^[14]	49
Εικόνα 3.10: Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα τριών τύπων ^[5]	50
Εικόνα 3.11: Ανεμογεννήτρια Darrieus τριών πτερυγίων που χρησιμοποιεί μια ανεμογεννήτρια Savonius δύο πτερυγίων για την εκκίνηση της διαγραμματικά (αριστερά) ^[14] και σε εφαρμογή στην Ταϊwan (δεξιά) ^[38]	51
Εικόνα 3.12: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα, τύπου Darrieus. Αριστερά παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα με τα κύρια μέρη της ^[36] και δεξιά παρουσιάζεται εγκατεστημένη σε ένα αιολικό πάρκο στο Κέμπεκ του Καναδά ^[37]	52
Εικόνα 3.13: Ανάντη (αριστερά) και κατάντη (δεξιά) ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα ^[14]	53
Εικόνα 3.14: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα. Αριστερά παρουσιάζεται ένα σχεδιάγραμμα με τα κύρια μέρη της ^[36] και δεξιά παρουσιάζεται εγκατεστημένη στην τοποθεσία Veladero της Αργεντινής ^[37]	54
Εικόνα 3.15: Κίνηση του ανέμου γύρω από το πτερύγιο μιας ανεμογεννήτριας ^[36]	56
Εικόνα 3.16: Κατανομή των δυνάμεων που ασκούνται στα πτερύγια των ανεμογεννητριών ^[5]	57
Εικόνα 3.17: Ροϊκό πεδίο γύρω από ανεμογεννήτρια ^[10]	59
Εικόνα 3.18: Διάταξη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση ανεμογεννήτριας ^[43]	62
Εικόνα 3.19: Σχεδιάγραμμα το οποίο απεικονίζει το ύψος της ανεμογεννήτριας (αριστερά) και την διάμετρο του ρότορα της (δεξιά) ^[10]	63
Εικόνα 3.20: Μεταβολή της ισχύος της ανεμογεννήτριας αναλόγως του ύψους και της διαμέτρου του ρότορα ^[9]	64

Εικόνα 3.21: Μεταβολή της ισχύος αναλόγως της διαμέτρου αλλά και άλλων σχεδιαστικών επιλογών για 10 ανεμογεννήτριες από κορυφαίους σχεδιαστές ^[11]	65
Εικόνα 3.22: Μεταβολή της διαμέτρου των ανεμογεννητριών με την πορεία των ετών ^[11]	65
Εικόνα 3.23: Σχηματική απεικόνιση της συναρτήσεως υπολογισμού του συντελεστή ισχύος ^[5]	66
Εικόνα 3.24: Μεταβολή του συντελεστή ισχύος αναλόγως του τύπου της ανεμογεννήτριας ^[5]	67
Εικόνα 3.25: Καμπύλη ισχύος μιας πειραματικής ανεμογεννήτριας Growian ^[5]	68
Εικόνα 4.1: Το λογότυπο της εταιρίας ^[44]	70
Εικόνα 4.2: Εξέλιξη ανεμογεννητριών της εταιρίας Vestas στην πορεία των ετών ^[16]	71
Εικόνα 4.3: Εγκατεστημένη ισχύς ανά μοντέλο της εταιρίας Vestas ^[16]	71
Εικόνα 4.4: Κατασκευάστριες ανεμογεννητριών που δραστηριοποιούνται στον ελληνικό χώρο ^[46]	72
Εικόνα 4.5: Διάγραμμα ανεμογεννήτριας V90 – 3MW ^[17]	73
Εικόνα 4.6: Μηχανικός συντήρησης κατά την άνοδο του στον πύργο μιας ανεμογεννήτριας V90 ^[18]	74
Εικόνα 4.7: Σχεδιασμός νασέλλας μαζί με τον σύνδεσμο και τον κώνο ^[19]	76
Εικόνα 4.8: Σχεδιασμός νασέλλας χωρίς τον σύνδεσμο και τον κώνο ^[19]	76
Εικόνα 4.9: Παρουσίαση της διπλής ατράκτου μετάδοσης της ισχύος συνδεδεμένης με το κιβώτιο ταχυτήτων και την γεννήτρια ^[19]	77
Εικόνα 4.10: Εξωτερική διαμόρφωση κιβωτίου ταχυτήτων (αριστερά) και τοποθέτηση του στην νασέλλα (δεξιά – με το καφέ χρώμα το κιβώτιο) ^[19]	78
Εικόνα 4.11: Σχηματική παράσταση των τριών στάσεων του κιβωτίου ταχυτήτων ^[19]	79
Εικόνα 4.12: Κιβώτιο ταχυτήτων (μπλέ χρώμα) στο οποίο φαίνεται η άτρακτος υψηλής ταχύτητας και το σύστημα φρένων (γκρι χρώμα δεξιά) ^[20]	79
Εικόνα 4.13: Υδραυλικό φρένο της ανεμογεννήτριας σε πραγματική εφαρμογή πάνω στο κιβώτιο ταχυτήτων (αριστερά) ^[48] και σε σχηματική αναπαράσταση (δεξιά) ^[20]	80
Εικόνα 4.14: Διάγραμμα γεννήτριας DFIM στο οποίο φαίνεται η σύνδεση του converter στον ρότορα και το δίκτυο ^[21]	81
Εικόνα 4.15: Σχηματική απεικόνιση γεννήτριας τεχνολογίας DFIM ^[49]	82
Εικόνα 4.16: Δακτυλίδι του συστήματος προσανατολισμού ^[19]	83
Εικόνα 4.17: Αντλία χαμηλής πίεσης για θέρμανση του λαδιού (αριστερά πάνω), αντλία υψηλής πίεσης (αριστερά κάτω καλυμμένη) ^[22] και αντλία φρένων (δεξιά) ^[20]	84

Εικόνα 4.18: Διαδρομή λαδιού υψηλής πίεσης μέσα από το κιβώτιο ταχυτήτων έως τον σύνδεσμο με τον ρότορα. Επάνω δεξιά φαίνεται το περιστρεφόμενο εξάρτημα με το οποίο γίνεται η παροχή στα πτερύγια ^[22]	85
Εικόνα 4.19: Υδραυλικός κύλινδρος για την αλλαγή του pitch ενός πτερυγίου ^[22]	86
Εικόνα 4.20: Πίεση δικτύου όταν το πτερύγιο βρίσκεται σε γωνία pitch 90° (ουσιαστικά είναι ανενεργό, λειτουργεί ως αερόφρενο) ^[22]	86
Εικόνα 4.21: Πίεση δικτύου όταν το πτερύγιο βρίσκεται σε γωνία pitch 0° (είναι ενεργό) ^[22]	87
Εικόνα 4.22: Συνολικό υδραυλικό δίκτυο μεταβολής του pitch των πτερυγίων ^[22]	87
Εικόνα 4.23: Επάνω δεξιά φαίνεται η αντλία παροχής πίεσης στο υδραυλικό σύστημα των φρένων. Κάτω αριστερά φαίνεται το φρένο μαζί με τα σωληνάκια (γκρι χρώμα) τα οποία μεταφέρουν και απάγουν το λάδι στις τρεις δαγκάνες. Δεξιά φαίνεται η δράση του συστήματος κατά την διάρκεια του φρεναρίσματος ^[22]	88
Εικόνα 4.24: Σύστημα λίπανσης κιβωτίου ταχυτήτων ^[24]	89
Εικόνα 4.25: Σύστημα λίπανσης κιβωτίου ταχυτήτων στην κατάσταση λειτουργίας Run ^[24]	90
Εικόνα 4.26: Σύστημα λίπανσης κιβωτίου ταχυτήτων στην κατάσταση λειτουργίας Emergency ^[24]	91
Εικόνα 4.27: Λίπανση μηχανισμού προσανατολισμού ανεμογεννήτριας με λουτρό ελαίου ^[19] ...	91
Εικόνα 4.28: Αισθητήρες ανέμου τοποθετημένοι στο πίσω μέρος της νασέλλας ^[19]	93
Εικόνα 4.29: Ρότορας ανεμογεννήτριας V90 κατά την διάρκεια συναρμολόγησης στο Kreuzstetten της Αυστρίας ^[51]	94
Εικόνα 4.30: Ευρεσιτεχνία της Vestas, κατασκευή του πτερυγίου σε δύο κομμάτια και σύνδεση του με εποξική ρητίνη ^[52]	95
Εικόνα 4.31: Πτερύγιο ανεμογεννήτριας V90 ^[53]	96
Εικόνα 4.32: Κατασκευαστική διαμόρφωση του συνδέσμου hub ^[19]	96
Εικόνα 4.33: Χαρακτηριστικά μεγέθη διακόπτων ισχύος ^[23]	97
Εικόνα 4.34: Επικοινωνία με οπτικές ίνες δύο τμημάτων της μονάδας ελέγχου ^[20]	99
Εικόνα 4.35: Κεντρικό σύστημα ελέγχου ανεμογεννήτριας ^[20]	100
Εικόνα 4.36: Χαρακτηριστική ισχύος ανεμογεννήτριας V90 – 3MW ^[17]	101
Εικόνα 4.37: Καμπύλη παραγωγής θορύβου για την κανονική λειτουργία της ανεμογεννήτριας ^[23]	102

Εικόνα 4.38: Καμπύλη παραγωγής θορύβου για την λειτουργία mode 1 της ανεμογεννήτριας ^[23]	103
Εικόνα 4.39: Καμπύλη παραγωγής θορύβου για την λειτουργία mode 2 της ανεμογεννήτριας ^[23]	103
Εικόνα 5.1: Με κόκκινο χρώμα τοποθετείται στον χάρτη η κοινότητα Αχλαδόκαμπου ^[54]	106
Εικόνα 5.2: Χωριό Αχλαδόκαμπος και αιολικό πάρκο στο βουνό από πίσω ^[55]	107
Εικόνα 5.3: Χάρτης τεχνικά αξιοποιήσιμου αιολικού δυναμικού Ελλάδος ^[56]	108
Εικόνα 5.4: Τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό στα βορειοδυτικά του νομού Αργολίδος ^[56]	108
Εικόνα 5.5: Τεχνικά αξιοποιήσιμο δυναμικό γύρω από την κοινότητα του Αχλαδόκαμπου ^[56]	109
Εικόνα 5.6: Ανεμογεννήτριες V90 σε λοφοσειρά στον Αχλαδόκαμπο.....	110
Εικόνα 5.7: Δίκτυο ΔΕΗ στην περιοχή του Αχλαδόκαμπου ^[59]	112
Εικόνα 5.8: Η ομαλότητα του λόφου πάνω από το χωριό προσφέρει ευκολία στην κατασκευή των δρόμων προσέγγισης των ανεμογεννητριών	113
Εικόνα 5.9: Ποσοστό απόδοχής υφιστάμενων αιολικών πάρκων σε 5 περιοχές της χώρας ^[25] ..	116
Εικόνα 5.10: Ποσοστό αποδοχής νέων αιολικών πάρκων σε 5 περιοχές της χώρας ^[25]	116

Πρόλογος

Με την είσοδο της νέας χιλιετίας πριν κάποια χρόνια πολλοί υποστηρίζουν πως η οικολογική συνείδηση έγινε μέρος της ζωής μας. Αυτό δεν ισχύει για όλες τις χώρες του κόσμου όμως ισχύει απόλυτα για τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ο πληθυσμός των δυτικοευρωπαϊκών χωρών έμαθε να αγαπάει το περιβάλλον στο οποίο ζει, να το σέβεται και να το φροντίζει. Σε αυτό το πλαίσιο η Ευρωπαϊκή Ένωση προσπαθεί να στρέψει τα κράτη μέλη της σε περισσότερο πράσινες πολιτικές, φιλικές προς το περιβάλλον. Έτσι, ένας από τους φιλόδοξους στόχους που έχει θέσει είναι η παραγωγή του 20% της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με τελική γραμμή του χρονοδιαγράμματος το έτος 2020.

Σε αυτό το κλίμα κινείται και η χώρα μας. Τα τελευταία χρόνια άνοιξε κυριολεκτικά ο ασκός του Αιόλου και φύσηξε ούριος άνεμος. Η παραγωγή ηλεκτρισμού με εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας έχει υπερδιπλασιαστεί και αναμένεται να αυξηθεί ακόμη περισσότερο γιατί, παρά την οικονομική κρίση της χώρας μας, το ενδιαφέρον για επενδύσεις στον τομέα της αιολικής ενέργειας είναι τεράστιο (όπως και σε όλες τις ΑΠΕ). Στα πλαίσια αυτής της ανάπτυξης έχει κατασκευαστεί και το αιολικό πάρκο στον Αχλαδόκαμπο Αργολίδας το οποίο θα τεθεί υπό μελέτη στην παρούσα εργασία.

Στο πρώτο μέρος της εργασίας θα παρουσιαστεί το παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα, θα παρουσιαστεί η δυνατότητα του ανέμου να είναι η λύση του προβλήματος και θα ακολουθήσουν γενικά στοιχεία γύρω από τον τομέα των ανεμογεννητριών. Στο δεύτερο μέρος θα επικεντρωθούμε σε πράγματα σχετικά με το υπό μελέτη αιολικό πάρκο. Στην αρχή θα δούμε την ανεμογεννήτρια V90 και θα την αναλύσουμε και στην συνέχεια θα ασχοληθούμε με την παρουσίαση του αιολικού παρκου.

ΜΕΡΟΣ Α: ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

Η παραγωγή ηλεκτρισμού από τον άνεμο αλλά και γενικά από όλες τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν είναι κάτι εύκολο, απαιτεί εξοπλισμό υψηλής τεχνολογίας και εργαζόμενους με γνώσεις υψηλού επιπέδου και εξειδικεύσεις σε συγκεκριμένους τομείς. Αυτός είναι και ο λόγος που μόλις στον 21^ο αιώνα ξεκίνησε ο άνθρωπος να παράγει από τον αέρα ένα σεβαστό ποσοστό της ενέργειας που καταναλώνει.

Στο πρώτο μέρος αυτής της εργασίας θα επιχειρηθεί να εξηγηθεί αυτή η καθυστέρηση της ένταξης της ηλεκτροπαραγωγής με μέσο τον άνεμο στο ενεργειακό ισοζύγιο. Καταρχήν θα παρουσιαστεί ο λόγος που στράφηκε ο άνθρωπος στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στον άνεμο που δεν είναι άλλος από το αυξημένο ενεργειακό (τα ορυκτά καύσιμα κάποτε θα τελιώσουν) και περιβαλλοντικό (μεγάλη ρύπανση από την καύση των ορυκτών καυσίμων) πρόβλημα.

Στην συνέχεια θα παρουσιαστεί ο άνεμος ως πηγή ενέργειας και στο τέλος του πρώτου μέρους θα παρουσιαστεί ο τρόπος με τον οποίο ο άνθρωπος εκμεταλλεύτηκε ανά τους αιώνες τον αέρα, ξεκινώντας από μια σύντομη ιστορική αναφορά και καταλήγοντας στην παρουσίαση των σημερινών τεχνολογιών οι οποίες έχουν καταστήσει οικονομικά συμφέρουσα την ηλεκτροπαραγωγή μέσω του ανέμου.

Αυτή η γενική αναφορά στα χαρακτηριστικά μιας σύγχρονης ανεμογεννήτριας θα αποτελέσει και την εισαγωγή του δεύτερου μέρους στο οποίο θα εξειδικευτούμε στην μελέτη λειτουργίας της ανεμογεννήτριας Vestas V90 – 3MW και του αιολικού πάρκου που έχει κατασκευαστεί στον Αχλαδόκαμπό Αργολίδος.

Κεφάλαιο 1

1 Εισαγωγή – Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως λύση στο παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα

1.1 Το παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα

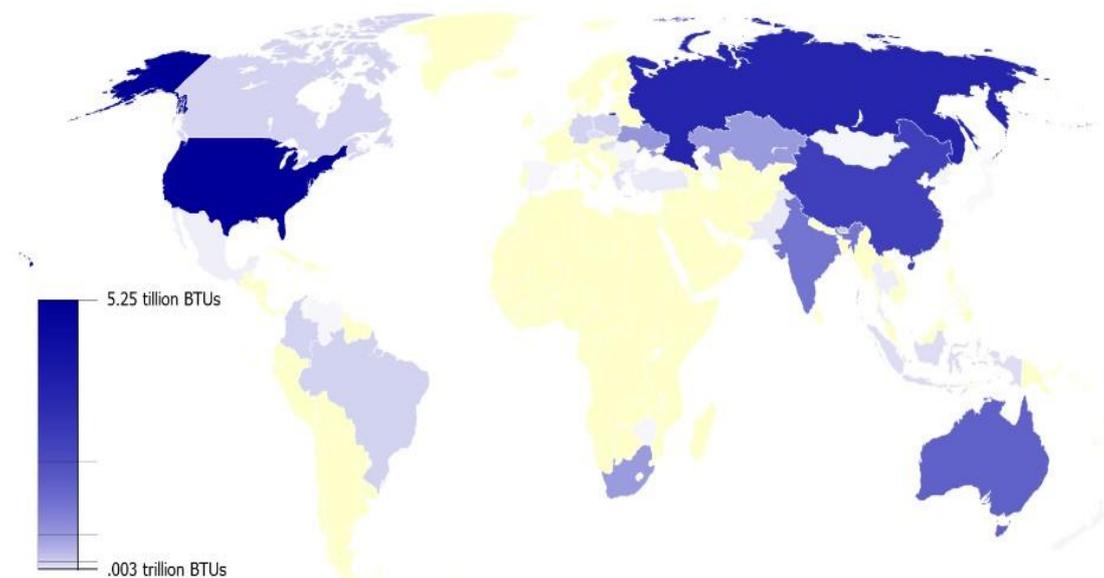
Η ενέργεια έχει συνδεθεί με τον άνθρωπο. Η ανάπτυξη του, η ανάπτυξη του βιωτικού του επιπέδου, έγινε με γιγαντιώδη άλματα μετά από την χρήση του ηλεκτρισμού στην ζωή του. Ποιος μπορεί να φανταστεί την ζωή μας χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα; Ποιος θα φανταζόταν την ζωή του χωρίς τηλεόραση, χωρίς ψυγείο, χωρίς κλιματισμό. Κανένας. Η ιδέα και μόνο μας απωθεί. Παρόλο που δεν έχουν περάσει παρά 50 χρόνια από τον εξηλεκτρισμό των νοικοκυριών εντούτοις η ιδέα μιας ζωής χωρίς ηλεκτρισμό μας παραπέμπει σε προϊστορικές εποχές.

Τα τελευταία χρόνια αυξάνεται κατά πολύ η χρήση του ηλεκτρισμού τόσο στον πλανήτη αλλά και στην χώρα μας η οποία ακολουθεί την τάση αυτή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να χρειάζεται μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρισμού για να καλύψει τις ανάγκες των ατόμων. Αν προστεθεί και η αύξηση πληθυσμού (μεγάλη στο σύνολο του πλανήτη, μικρή μεν αλλά υπαρκτή για την χώρα μας) τότε οι ετήσιες ανάγκες για ηλεκτρισμό αυξάνονται και άλλο για κάθε έτος.

Αυτό σημαίνει ότι οι χώρες πρέπει να αυξήσουν την παραγωγή τους σε ηλεκτρισμό. Η παραγωγή ηλεκτρισμού γίνεται κατά κύριο λόγο με διάφορα ορυκτά καύσιμα, με πυρηνικούς σταθμούς (οι οποίοι πάλι βασίζονται στο ορυκτό ουράνιο), με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και σε πολύ μικρότερο βαθμό με διάφορες άλλες επαναστατικές – πρωτοποριακές λύσεις οι οποίες έχουν μόνο τοπική εμβέλεια.

Από τις μεθόδους παραγωγής ηλεκτρισμού την μερίδα του λέοντος την κατέχουν οι χρήσεις ορυκτών καυσίμων. Οι περισσότερες χώρες ανά τον κόσμο βασίζουν την παραγωγή ηλεκτρισμού στον ορυκτό τους πλούτο. Ανάλογα με το τι έχει σε αφθονία το υπέδαφος τους καίνε πετρέλαιο, φυσικό αέριο αλλά κυρίως λιγνίτη. Οι ευρωπαϊκές χώρες για παράδειγμα βασίζουν το ενεργειακό τους ισοζύγιο σε μονάδες καύσης λιγνίτη (και πυρηνικούς σταθμούς) καθώς δεν έχουν μεγάλα κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου.

Το πρόβλημα που αντιμετωπίζουν είναι τεράστιο. Και ο λόγος, πέραν από τον περιβαλλοντικό της υψηλής εκπομπής ρύπων, είναι η εξάντληση των κοιτασμάτων. Για να δημιουργηθεί ένα κοίτασμα κάρβουνου με υψηλό ενεργειακό επίπεδο χρειάζοντε μερικές χιλιάδες χρόνια. Χαρακτηριστικά, το έτος 2006 εξορύχθηκαν 6,12 δισεκατομύρια τόνοι κάρβουνου (σε διάφορες συστάσεις, από λιγνίτη έως και ανθρακίτη) ενώ το 2030 η κατανάλωση αυτή αναμένετε να φτάσει τα 9 δισεκατομύρια τόνους ανά το παγκόσμιο λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης των αναπτυσσόμενων χωρών και κυρίως της Κίνας (από τα 6 δίσ που εξορύχθηκαν το 2006, το 1/3 το κατανάλωσε η Κίνα και το 1/8 η Ινδία). Σύμφωνα με στοιχεία της EIA (Energy Information Administration) στο τέλος τους 2006 τα γνωστά κοιτάσματα καρβούνου ανήλθαν στα 900 δισεκατομμύρια τόνους και προσφέρουν επάρκεια στον πλανήτη για 142 έτη. Το θέμα είναι όμως ότι υπάρχει μεγάλη ανισοκατανομή των κοιτασμάτων. Η Κίνα και η Ρωσία έχουν τεράστια αποθέματα ενώ αντίθετα η Αφρική έχει ελάχιστα κοιτάσματα καρβούνου και η Ευρώπη έχει μικρά σε αριθμό κοιτάσματα, πολλά από τα οποία ήδη τα έχει εξαντλήσει. Η κατανομή αυτή φαίνεται ξεκάθαρα στον παρακάτω χάρτη.



Εικόνα 1.1: Παγκόσμια αποθέματα καρβούνου το έτος 2007^[27]

Στον ευρωπαϊκό χώρο τα νούμερα αυτά είναι σαφώς μικρότερα και ο λόγος είναι ότι οι Ευρωπαίοι ήδη έχουν αντιληφθεί το πρόβλημα και προσπαθούν να μειώσουν την συμμετοχή των ορυκτών καυσίμων στο ενεργειακό τους ισοζύγιο αυξάνοντας κατά πολύ την τελευταία δεκαετία την συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Σύμφωνα με την βρετανική εταιρία

παραγωγής ενέργειας BP^[1] η Ευρωπαϊκή Ένωση διαθέτει κοιτάσματα τα οποία θα εξαντληθούν σε 51 έτη ενώ για την Ελλάδα τα κοιτάσματα αυτά αντιστοιχούν σε 62 έτη χρήσης. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η διάρκεια ζωής των κοιτασμάτων καρβόνου στις διάφορες χώρες.

Country	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Share	Reserve Life (years)
 China	1722.0	1992.3	2204.7	2380.0	2526.0	2782.0	42.5 %	41
 USA	972.3	1008.9	1026.5	1053.6	1040.2	1062.8	18.0 %	224
 EU	638.0	628.4	608.0	595.5	593.4	587.7	5.2 %	51
 India	375.4	407.7	428.4	447.3	478.4	521.7	5.8 %	114
 Australia	351.5	366.1	378.8	385.3	399.0	401.5	6.6 %	190
 Russia	276.7	281.7	298.5	309.2	314.2	326.5	4.6 %	481
 South Africa	237.9	243.4	244.4	244.8	247.7	250.4	4.2 %	121
 Indonesia	114.3	132.4	146.9	195.0	217.4	229.5	4.2 %	19
 Germany	204.9	207.8	202.8	197.2	201.9	192.4	3.2 %	35
 Poland	163.8	162.4	159.5	156.1	145.9	143.9	1.8 %	52
Total World	5187.6	5585.3	5886.7	6195.1	6421.2	6781.2	100 %	142

Εικόνα 1.2: Παγκόσμια κατανάλωση καρβόνου ανά χώρα (σε εκατομμύρια τόνων)^[27]

Από τον παραπάνω πίνακα επιβεβαιώνεται ότι μόνο η Ευρώπη έχει αντιληφθεί το πρόβλημα και προσπαθεί να το μειώσει μειώνοντας την χρήση καρβόνου κατά 50 εκατομμύρια τόνους την τελευταία πενταετία. Η Ευρώπη είναι αναγκασμένη να ψάξει νέους τρόπους παραγωγής ηλεκτρισμού, αποτελεσματικούς, φθηνούς αλλά και περιβαλλοντικά αξιόπιστους γιατί το οικολογικό αίσθημα έχει αναπτυχθεί πολύ στον Ευρωπαϊκό χώρο, ιδιαίτερα την τελευταία δεκαετία. Η λύση στο πρόβλημα αυτό δεν μπορεί να είναι άλλη παρά η περαιτέρω αύξηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό ισοζύγιο.^{[1], [3], [27]}

1.2 Η Ελλάδα και η εξάρτηση της από τα ορυκτά καύσιμα

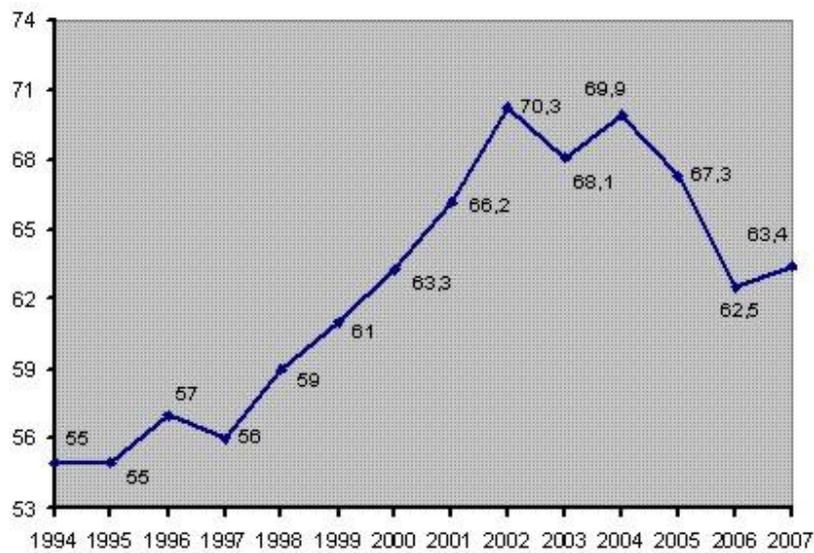
Το ενεργειακό πρόβλημα της Ευρώπης αγγίζει και την χώρα μας. Από τον πίνακα της προηγούμενης ενότητας είναι ξεκάθαρο ότι τα γνωστά κοιτάσματα λιγνίτη (το κάρβουνο της Ελλάδας είναι σχετικά νέο σε ηλικία κοιτάσμα, έχει την χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και ονομάζεται λιγνίτης) διαρκούν το πολύ για 62 έτη. Ήδη τα μεγαλύτερα των κοιτασμάτων τα εκμεταλλεύεται η ΔΕΗ και έχουν το πολύ 30 χρόνια ζωής. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα κοιτάσματα λιγνίτη στην χώρα μας. Ο κατάλογος αυτός παρουσιάστηκε από το υπουργείο ανάπτυξης σε ένα εγχειρίδιο^[2] που έχει εκδόσει το 2009 και σχετίζεται με την ενέργεια στην Ελλάδα.

Area of Mine	Location	Remaining Exploitable Deposits (Mt)
Ptolemaida (PPC)	Western Macedonia	1220
Amyntaio (PPC)	Western Macedonia	130
Megalopolis (PPC)	Peloponnese	210
Florina (PPC)	Western Macedonia	140
Drama	Western Macedonia	900
Elassona (PPC)	Central Greece	155
Komnena (PPC)	Western Macedonia	95
Privately owned mines	Western Macedonia	170
TOTAL		3020

Εικόνα 1.3: Κοιτάσματα λιγνίτη στην Ελληνική επικράτεια^[2]

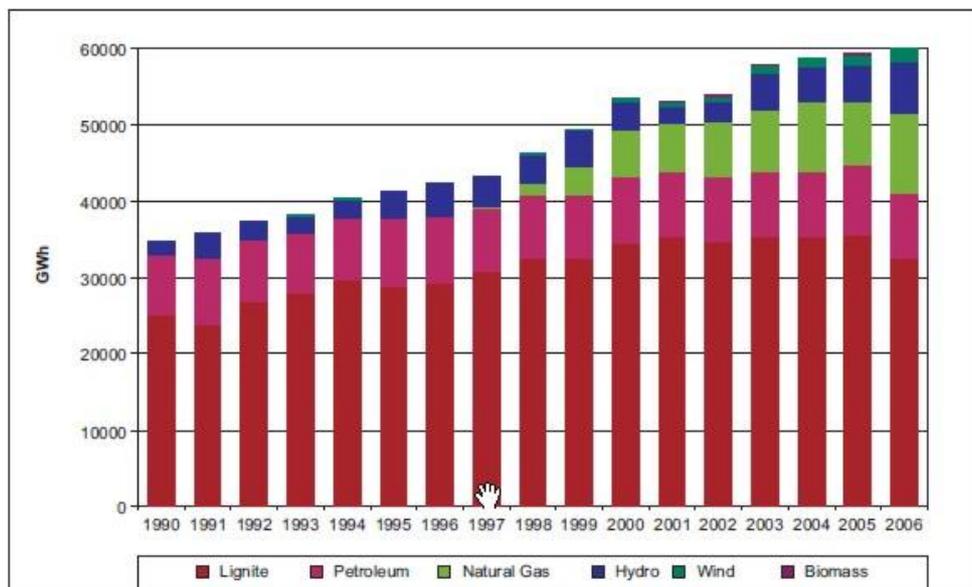
Από τα 8 μεγάλα γνωστά κοιτάσματα τα 7 ήδη τα αξιοποιεί η ΔΕΗ για ηλεκτροπαραγωγή και πολλά φτάνουν στο τέλος τους. Το κοιτάσμα του Αμύνταιου έχει χρόνο ζωής ακόμη 23 – 24 έτη, το κοιτάσμα της Φλώρινας θα δίνει ηλεκτρισμό για 30 με 50 έτη, το κοιτάσμα της Πτολεμαΐδας θα διαρκέσει 25 με 30 έτη, στην Μεγαλόπολη η τελευταία μονάδα θα κλείσει το 2040, στην Ελασσόνα το κοιτάσμα θα κρατήσει ενεργή την μονάδα για ακόμη 20 με 24 έτη, στα Κομνηνά το κοιτάσμα ακόμη δεν έχει εξερευνηθεί για να διαπιστωθεί αν μπορεί να καταστεί βιώσιμη μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρισμού ενώ το μεγαλύτερο κοιτάσμα που πρόσφατα ανακαλύφθηκε στην Δράμα είναι δυστυχώς λιγνίτης της χαμηλότερης δυνατής πυκνότητας ενέργειας και θα διαρκέσει το πολύ 50 χρόνια.

Σύμφωνα με το υπουργείο ανάπτυξης τα διαθέσιμα γνωστά κοιτάσματα είναι τέτοια έτσι ώστε να θεωρεί ότι η τελευταία λιγνιτική μονάδα παραγωγής ηλεκτρισμού θα κλείσει το 2050. Άρα το πρόβλημα μας κτυπάει την πόρτα και πρέπει να βρεθούν λύσεις για να μην βρεθούμε σε ένα μεγάλο αδιέξοδο στα επόμενα έτη. Έτσι η ΔΕΗ προσπαθεί να μειώσει την εξόρυξη λιγνίτη αλλάζοντας το ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η εξόρυξη λιγνίτη τα τελευταία 15 έτη. Παρατηρούμε την πτωτική πορεία που ακολουθεί το διάγραμμα μας από το 2001 και εντεύθεν. Αν εξαιρεθούν μερικές χρονιές, κατά τις οποίες αυξήθηκε η χρήση λιγνίτη (και αυτό οφείλεται κυρίως στην μικρή βροχόπτωση άρα κατά συνέπεια την μικρότερη ηλεκτροπαραγωγή από τα υδροηλεκτρικά φράγματα) φαίνεται ότι η ΔΕΗ πήρε το μήνυμα και προσπαθεί να λύσει το ενεργειακό πρόβλημα της Ελλάδας.



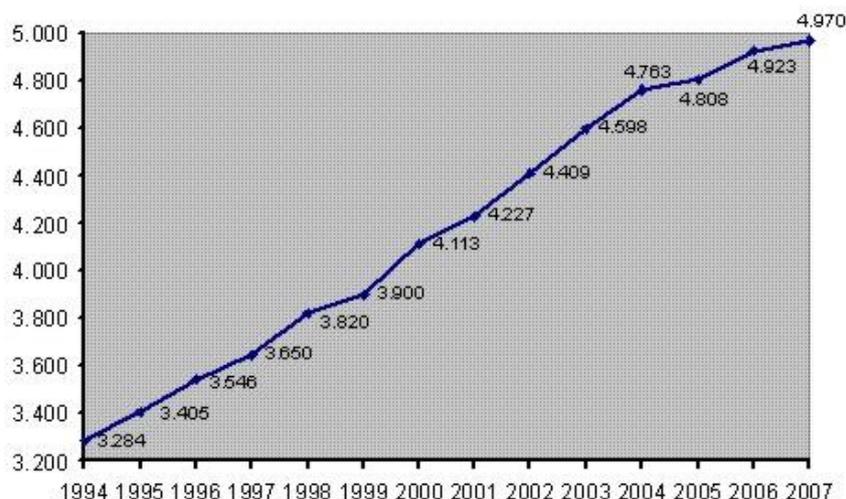
Εικόνα 1.4: Εξόρυξη λιγνίτη (σε εκατομμύρια τόνους) για ηλεκτροπαραγωγή^[28]

Παρά το θετικό του μηνύματος που δίδει το παραπάνω διάγραμμα έρχεται το επόμενο γράφημα να μας διαψεύσει. Το διάγραμμα αυτό δίχνει την συνολική παραγωγή ηλεκτρισμού στην Ελλάδα τα τελευταία 20 έτη. Σε αυτό φαίνεται ότι η μείωση που έγινε στην χρήση του λιγνίτη δεν οφείλεται στην αύξηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλά στην αύξηση της χρήσης του φυσικού αερίου. Αυτό δεν είναι καθόλου καλό γιατί και το φυσικό αέριο εξαντλείται και εκτός αυτού η Ελλάδα ακόμη δεν παράγει φυσικό αέριο έτσι αυξάνεται η ενεργειακή εξάρτηση της από τρίτες χώρες.



Εικόνα 1.5: Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας τα τελευταία 20 έτη στην Ελλάδα^[2]

Στο προηγούμενο διάγραμμα, πέραν της αύξησης της χρήσης του φυσικού αερίου για ηλεκτροπαραγωγή φαίνεται και η αύξηση της συνολικής παραγωγής ενέργειας η οποία είναι της τάξης των 20000 GWh ανά έτος. Η αύξηση αυτή δεν οφείλεται τόσο στην αύξηση του πληθυσμού (στην Ελλάδα είναι πολύ μικρή, της τάξεως του 0,475% με βάση την Eurostat) αλλά στην αύξηση της ενέργειας που απαιτεί κάθε άτομο για προσωπική του χρήση. Η αύξηση αυτή αποτυπώνεται και στα επίσημα στοιχεία που δημοσιεύει η ΔΕΗ και παρουσιάζονται στο γράφημα που ακολουθεί.



Εικόνα 1.6: Ετήσια κατά κεφαλή κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος στην Ελλάδα^[28]

Η αύξηση της απαίτησης των ελλήνων για ηλεκτρικό ρεύμα αναγκάζει την ΔΕΗ να αυξάνει συνεχώς την παραγωγή της. Το ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας όμως εξαρτάται από πηγές εξαντλήσιμες κάποιες από τις οποίες μας καθιστούν και ενεργειακά όμηρους άλλων χωρών. Η ανεξαρτητοποίηση της χώρας μας ενεργειακά από τρίτους και η μείωση του προβλήματος της εξάντλησης των λιγνιτικών κοιτασμάτων θα επέλθει μόνο από την αύξηση της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.^{[2], [3], [28], [29], [30], [31]}

1.3 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως λύση στο ενεργειακό πρόβλημα

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, ως η πιο αποδοτική λύση στο ενεργειακό πρόβλημα του πλανήτη αλλά και ειδικότερα στο ενεργειακό πρόβλημα της χώρας μας φαντάζει η αύξηση της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Τι ονομάζουμε όμως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας; Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι οι μορφές ενέργειας οι οποίες δεν εξαντλούντε,

είναι μορφές ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν συνεχώς.

Όταν αναφερόμαστε σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας το μυαλό μας πάει στην ηλιακή και την αιολική ενέργεια. Αυτές είναι δύο από τις σημαντικότερες ΑΠΕ, αυτές γύρω από τις οποίες γίνεται πολύ μεγάλη συζήτηση γιατί μπορούν να καλύψουν μεγάλες ανάγκες λόγω του τεράστιου ηλιακού και αιολικού δυναμικού. Μια τρίτη, εξ' ίσου σημαντική ΑΠΕ είναι η ενέργεια των υδατοπτώσεων. Η ενέργεια αυτή που την εκμεταλλευόμαστε μέσω υδροηλεκτρικών σταθμών είναι η περισσότερο εκμεταλλεύσιμη από όλες τις ΑΠΕ σήμερα. Μια άλλη ΑΠΕ είναι η βιομάζα η οποία ελάχιστα χρησιμοποιείται για ηλεκτροπαραγωγή αλλά χρησιμοποιείται πολύ για λοιπές χρήσεις όπως θέρμανση. Άλλες ΑΠΕ, ήσσονος σημασίας είναι η γεωθερμία (αν και ο όρος ΑΠΕ δεν αντιστοιχεί στην γεωθερμία καθώς χρειάζεται μερικές χιλιάδες χρόνια για να ανανεωθεί το γεωθερμικό δυναμικό), η ενέργεια των κυμάτων και των παλλιροιών και η ενέργεια που παρέχει η θερμοκρασιακή διαφορά στο βάθος και στην επιφάνεια των ωκεανών. Όλες οι ΑΠΕ, πλην της γεωθερμίας ωφείλονται άμεσα ή έμμεσα στην ηλιακή ακτινοβολία πλην της γεωθερμίας η οποία ωφείλεται στην υψηλή θερμοκρασία που επικρατεί στο εσωτερικό της γης.

Οι ΑΠΕ παρουσιάζουν μερικά πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας αλλά και κάποια σοβαρά μειονεκτήματα τα οποία δεν τους επιτρέπουν να εξαπλωθούν ευρέως και να επικρατήσουν στα ενεργειακά ισοζύγια των χωρών. Το προφανές πλεονέκτημα τους είναι ότι δεν εξαντλούντε. Το δεύτερο μεγαλύτερο πλεονέκτημα τους είναι ότι υπάρχουν παντού έτσι μπορούν οι χώρες να ανεξαρτητοποιηθούν ενεργειακά. Το τρίτο πλεονέκτημα τους είναι ότι η εξοπλισμός για την εκμετάλλευσή τους είναι σχετικά φθηνός, πολύ αξιόπιστος και έχει μεγάλη διάρκεια ζωής ενώ συχνά έχει και μηδενικό κόστος συντήρησης (όπως για παράδειγμα τα φωτοβολταϊκά). Το τελευταίο τους πλεονέκτημα είναι η φιλικότητα προς το περιβάλλον καθώς ο άνθρωπος δεν κάνει μεγάλες παρεμβάσεις σε αυτό και στο τέλος, μετά την χρήση δεν μένουν κατάλοιπα και δεν απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα ρύποι. Στον αντίποδα όμως υπάρχουν μεγάλα μειονεκτήματα με μεγαλύτερο όλων το ότι έχουν πολύ μικρή ενεργειακή πυκνότητα, χρειάζονται μεγάλη επιφάνεια γης για να παράξουν ένα μικρό ποσό ενέργειας. Το δεύτερο πρόβλημα τους είναι ότι δεν υπάρχει σταθερή απόδοση, ο άνεμος και η ηλιακή ακτινοβολία διαφοροποιούνται κατά την διάρκεια του 24ώρου ενώ οι

υδατοπτώσεις δεν έχουν την ίδια ισχύ σε όλες τις εποχές του έτους. Ακόμη ένα μεγάλο μειονέκτημα είναι ο μικρός βαθμός απόδοσης, συχνά πολύ χαμηλότερος του 30% πράγμα που τις κάνει ακόμη μη συμφέρουσες για την κάλυψη μεγάλων αστικών κέντρων. Άλλα επιμέρους προβλήματα όπως η κακή αισθητική άποψη που προκαλούν οι ανεμογεννήτριες είναι μικρότερης σημασίας και αναμένεται να καμφθούν εύκολα όταν ο κόσμος καταλάβει ότι είναι απαραίτητες.

Τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι ανανεώσιμες πηγές είναι πολύ σοβαρά όμως με την πορεία των ετών αμβλύνονται. Αντιθετα τα πλεονεκτήματα τους είναι μεγάλα έτσι οι ευρωπαϊκές κυρίως χώρες οδηγούντε σε αυτές. Ήδη η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει ως στόχο το 2020 ο ηλεκτρισμός να παράγεται κατά 20% από τις ΑΠΕ. Κάποιες χώρες, έχουν ήδη αντιληφθεί τα κέρδη τους και έχουν αναπτύξει σε πολύ μεγάλο βαθμό τις ΑΠΕ, χαρακτηριστικό παράδειγμα η Ισπανία η οποία έχει εγκατεστημένο το 7% της παγκόσμιας ισχύος σε ΑΠΕ.

Η χώρα μας έχει την τύχη να έχει ένα από τα υψηλότερα αιολικά και ηλιακά δυναμικά στον Ευρωπαϊκό χώρο. Αυτό πρέπει να το εκμεταλλευτεί έτσι ώστε να μπορέσει να καλύψει όσο το δυνατό περισσότερες από τις ανάγκες της σε ηλεκτρισμό. Ήδη το 12,4% της παραγωγής ηλεκτρισμού για το 2006 στην Ελλάδα ωφειλόταν στις ΑΠΕ. Αν όμως αφαιρέσουμε τα υδροηλεκτρικά φράγματα τότε το ποσοστό αυτό πέφτει στο ισχνό 3,3%, ελάχιστο για το ηλιακό και αιολικό δυναμικό της χώρας μας. Η κατανομή της εγκατεστημένης ισχύος φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα.



Εικόνα 1.7: Εγκατεστημένη Ισχύς ΑΠΕ στην Ελλάδα το 2007^[13]

Όπως φαίνεται παραπάνω, ειδικά η ηλιακή ενέργεια έχει μηδενική συμμετοχή στην ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα. Αυτό είναι απαράδεκτο για την χώρα μας, χώρες όπως η Γερμανία και η Αυστρία, με πολύ μικρότερο ηλιακό δυναμικό παράγουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από τον ήλιο σε σχέση με την Ελλάδα.

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Total	2411	2515	2541	2552	2552	2552	2551	2757	2896	3068	3299	3369	3388	3473	3597	3622	3918
Hydro	2408	2512	2523	2523	2523	2523	2522	2728	2856	2959	3072	3076	3078	3079	3099	3106	3135
of which pumped storage	315	315	315	315	315	315	315	520	615	615	699	699	699	699	699	699	699
Hydro <1 MW	2	2	2	2	3	3	3	4	5	8	14	15	17	19	23	26	44
Hydro 1-10 MW	28	28	39	39	39	39	39	39	40	42	42	45	45	50	56	63	73,7
Hydro 10+MW	2063	2167	2167	2167	2166	2166	2165	2165	2197	2294	2317	2317	2317	2311	2317	2318	2318
Geothermal	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0
Photovoltaic	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1,3
Wind	1	1	16	27	27	27	27	27	38	109	226	270	287	371	472	491	751,5
Biogas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	22	22	22	25	24	30,7

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Total	1999,1	3173,1	2397,1	2588,2	2880,2	3817,2	4542,2	4132,1	3937,1	4992,2	4562,2	3553,2	4205,5	6431,6	6420,2	6971,3	8235
Hydro	1997,0	3171,0	2389,0	2541,0	2843,0	3783,0	4504,0	4096,0	3867,0	4829,0	4111,0	2725,0	3463,0	5332,0	5205,0	5610,2	6484
of which pumped storage	228,0	72,0	186,0	259,0	243,0	253,0	156,0	214,0	149,0	237,0	418,0	628,0	663,0	566,0	533,0	593,0	610,0
Hydro <1 MW	6,0	5,0	5,0	5,0	8,0	7,0	7,0	11,0	8,0	9,0	26,0	40,0	58,0	76,0	91,0	105,8	220,4
Hydro 1-10 MW	54,0	71,0	43,0	77,0	97,0	89,0	119,0	138,0	138,0	160,0	140,0	95,0	92,0	169,0	212,0	218,4	170
Hydro 10+MW	1709,0	3023,0	2155,0	2200,0	2495,0	3434,0	4222,0	3733,0	3572,0	4423,0	3527,0	1962,0	2650,0	4521,0	4369,0	4693,0	6094,4
Wind	2,0	2,0	8,0	47,0	37,0	34,0	38,0	36,0	70,0	162,0	451,0	756,0	651,0	1021,0	1121,0	1266,4	1683,4
Biogas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	72,0	91,0	78,0	93,4	93,8	65,5
Photovoltaic	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,5	0,6	0,8	0,9	1,4

Εικόνα 1.8: Εγκατεστημένη ισχύς (σε MW – πάνω πίνακας) και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (σε GWh – κάτω πίνακας) στην Ελλάδα τα τελευταία 15 έτη^[2]

Στους δύο παραπάνω πίνακες μπορούμε να παρακολουθήσουμε την πορεία των ΑΠΕ στην χώρα μας τα τελευταία 15 έτη. Βλέπουμε ότι ήδη είχε αναφερθεί, το μεγάλο ποσοστό των υδροηλεκτρικών σταθμών στις ΑΠΕ διαχρονικά. Μπορούμε όμως να παρατηρήσουμε και την μεγάλη αύξηση της παραγωγής ηλεκτρισμού λόγω των ανεμογεννητριών η οποία από το 2000 και μετά δεκαπλασιάστηκε. Επίσης παρατηρούμε τετραπλασιασμό της χρήσης των ΑΠΕ για ηλεκτροπαραγωγή, ποσοστό όμως που αναμέναμε πολύ μεγαλύτερο αν συνυπολογίσουμε την ενεργειακή εξάρτηση της χώρας μας από τρίτους και το μεγάλο ηλιακό και αιολικό δυναμικό που παραμένει ανεκμετάλλευτο.

Στόχος της χώρας μας είναι να φτάσει στο 20% της ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ έως το 2020, θα μειώσει έτσι σε μεγάλο βαθμό το ενεργειακό της πρόβλημα όμως δεν θα το λύσει. Πρέπει να αυξήσει και άλλο αυτό το ποσοστό έτσι ώστε το 2050 να είναι σε θέση να καλύψει τις ανάγκες τις χωρίς την ύπαρξη του λιγνίτη ή με ένα μικρό ποσό αυτού. Το συμπέρασμα είναι ένα,

η λύση του ενεργειακού προβλήματος είναι κατά μεγάλο μέρος οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στο υπόλοιπο της παρούσας εργασίας θα ασχοληθούμε μόνο με μια από τις ΑΠΕ, με την αιολική ενέργεια και την εκμετάλλευσή της μέσω ενός αιολικού πάρκου στην χώρα μας.^{[2], [4], [13], [32]}

Κεφάλαιο 2

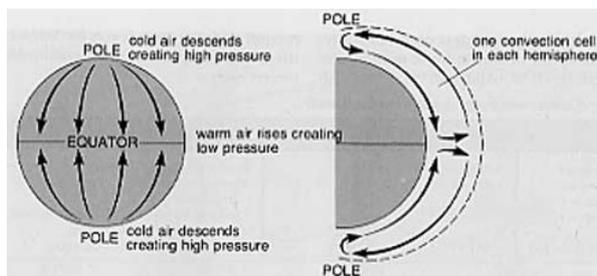
2 Ο άνεμος ως πηγή ενέργειας

2.1 Ύπαρξη ανέμου

Με το τέλος του προηγούμενου κεφαλαίου καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι η αιολική ενέργεια μπορεί να αποτελέσει λύση στο ενεργειακό πρόβλημα του πλανήτη αλλά και ειδικότερα της Ελλάδας. Στο παρόν κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τα χαρακτηριστικά του ανέμου και τον υπολογισμό του αιολικού δυναμικού. Αυτά θα γίνουν στις επόμενες δύο ενότητες. Στην πρώτη ενότητα του κεφαλαίου θα ασχοληθούμε με την πηγή του ανέμου. Από που προέρχεται ο άνεμος; Η απάντηση στο ερώτημα ακολουθεί παρακάτω. Πάντως είμαστε βέβαιοι ότι δεν υπάρχει ένα συννεφάκι να φυσάει όπως βλέπαμε στα κινούμενα σχέδια.

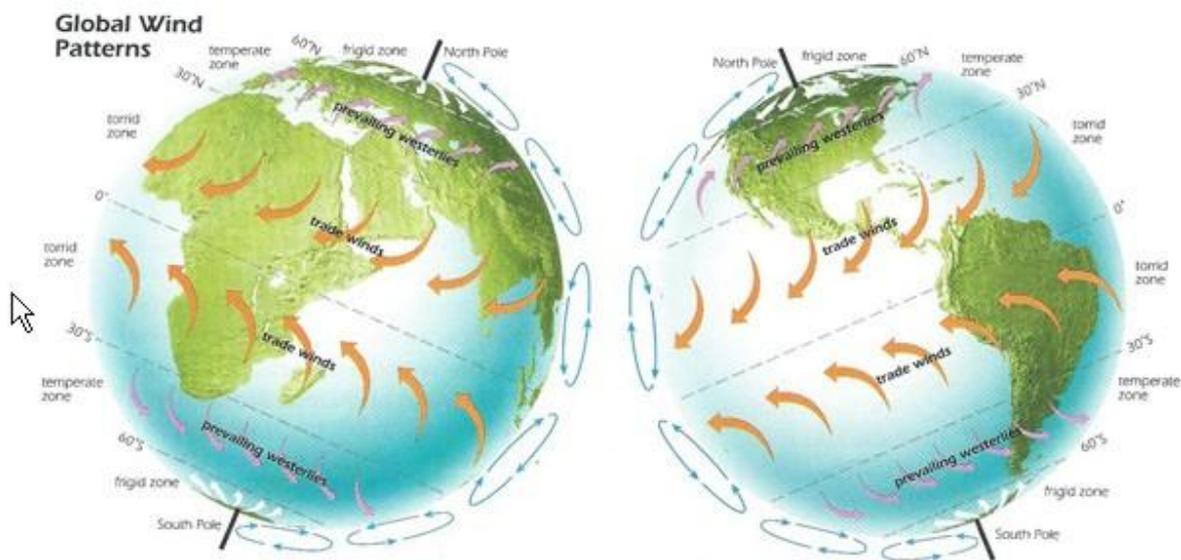
Η αιολική ενέργεια είναι η κινητική ενέργεια διάφορων αέριων μαζών στην ατμόσφαιρα του πλανήτη μας. Η κίνηση αέριων μαζών σε ολοκληρω τον πλανήτη προκαλείται από δύο αίτια, η ηλιακή ακτινοβολία και η περιστροφή του πλανήτη. Άρα, εμμεσα, η αιολική ενέργεια θεωρείται ως ακόμα μια μορφή ενέργειας που προσφέρει ο ήλιος στον πλανήτη μας. Με πιο τρόπο όμως επιδρά κάθε αίτιο στην κίνηση των αέριων μαζών;

Η ηλιακή ακτινοβολία έχει την ικανότητα να αυξάνει την θερμοκρασία εκεί όπου έχει μεγάλη ένταση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η γη να είναι πιο ζεστή στον ισημερινό και πιο κρύα στους δύο πόλους. Ως συνέπεια αυτού ο θερμός αέρας στον ισημερινό ανεβαίνει σε υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας και κινείται προς τους πόλους ενώ ο ψυχρότερος αέρας των πόλων κινείται προς τον ισημερινό όπου υπάρχει μια ζώνη χαμηλότερης πίεσης. Η κίνηση αυτή φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 2.1: Κίνηση των αέριων μαζών λόγω της διαφοράς της θερμοκρασίας μεταξύ ισημερινού και πόλων^[39]

Η κίνηση της γης επηρεάζει και αυτή τα ρεύματα ανέμου μέσω του φαινομένου Coriolis. Η αδράνεια των αερίων μαζών τείνει να τις περιστρέψει προς τα δυτικά τις ψυχρότερες που βρίσκονται πάνω στην επιφάνεια της γης και προς τα ανατολικά τις θερμότερες που βρίσκονται σε υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η κίνηση που είδαμε παραπάνω λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας να μεταβάλλεται, στους πόλους να είναι σχεδόν παράλληλη με τον ισημερινό ενώ όσο κινούμαστε σε μικρότερο γεωγραφικό πλάτος γίνεται όλο και πιο κάθετη. Το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 2.2: Κίνηση των αερίων μαζών στην γήινη ατμόσφαιρα, επηρεασμένων από το φαινόμενο Coriolis^[40]

Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό η κίνηση των αερίων μαζών είναι ένα πολύπλοκο αντικείμενο και το οποίο δεν μπορεί παρά να εξηγηθεί πολύ απλουστευμένα σε δύο σελίδες. Στην πραγματικότητα υπολογιστές τρέχουν νυχθημερόν για να μπορέσουν να προβλέψουν αυτές τις κινήσεις. Επίσης η κίνηση των αερίων μαζών εξαρτάτε από την εποχή (τον χειμώνα έχουμε υψηλότερες ταχύτητες), και από την ώρα της ημέρας (αν είναι παραθαλάσσια περιοχή υπάρχει η θαλάσσια αύρα την ημέρα και η απόγειος αύρα το βράδυ). Αυτό που μας ενδιαφέρει όμως είναι ότι η ισχύς της κίνησης των αερίων μαζών υπολογίζεται ίση με $3,6 \cdot 10^9$ MW σε όλο τον πλανήτη και εκτιμάται ότι το 1% αυτής είναι διαθέσιμη για εκμετάλλευση με αποτέλεσμα να μπορούν να παραχθούν $175 \cdot 10^{12}$ kWh κάθε έτος. Ο αριθμός αυτός είναι τεράστιος και μπορεί να καλύψει ένα μεγάλο μέρος των ενεργειακών αναγκών της ανθρωπότητας. Η χώρα μας έχει την τύχη να έχει

ένα τεράστιο αιολικό δυναμικό το οποίο μπορεί να εκμεταλλευτεί έτσι ώστε να καλύψει πολλές από τις ανάγκες της για ηλεκτροπαραγωγή. Χαρακτηριστικός είναι ο επόμενος χάρτης ο οποίος δείχνει ότι τουλάχιστον στα νησιά του Αιγαίου η Ελλάδα έχει ένα από τα μεγαλύτερα αιολικά δυναμικά στην Ευρώπη. [4], [5], [8], [15], [39], [40]



Wind resources at 50 m elevation (mean wind speed m/s, wind power density W/m ²)										
	Forest or urban areas		Flat land		Sea shore		Open sea		Mountains	
	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²	m/s	W/m ²
	> 6.0	> 250	> 7.5	> 500	> 8.5	> 700	> 9.0	> 800	> 11.5	> 1800
	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
	4.5-5.5	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0-8.5	400-700
	< 3.5	< 50	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 7.0	< 400

Εικόνα 2.3: Ισχύς των ανέμων στον ευρωπαϊκό χώρο^[5]

2.2 Αιολικό Δυναμικό

Από τον παραπάνω χάρτη βλέπουμε ότι η χώρα μας είναι εαρκετά ευνοημένη, έχει ένα πολύ ψηλό αιολικό δυναμικό. Πως μπορεί να υπολογιστεί αυτό όμως; Έχουμε ήδη αναφέρει πως η κίνηση των αέριων μαζών οφείλεται στην ηλιακή ακτινοβολία. Οι επιστήμονες υπολογίζουν ότι ένα ποσοστό γύρω στο 2% της ηλιακής ακτινοβολίας μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια των αερίων μαζών. Στην Ελλάδα η μέση ετήσια ένταση της ακτινοβολίας είναι περίπου 200 W/m^2 και η έκταση της χώρας είναι 131000 km^2 . Αυτό μας δίνει ένα διαθέσιμο αιολικό δυναμικό της τάξεως των $4,5 \cdot 10^{12} \text{ kWh}$ ανά έτος. Το νούμερο αυτό είναι περίπου το 1/40 της παγκόσμιας διαθέσιμης ενέργειας του ανέμου και φανερώνει το πόσο προικισμένη είναι η χώρα μας.

Δυστυχώς όμως αυτό το νούμερο δεν μπορούμε να το αξιοποιήσουμε, δεν μας ενδιαφέρει το αιολικό δυναμικό. Αυτό που μας νοιάζει είναι το τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό δηλαδή το μέρος του αιολικού δυναμικού το οποίο μπορεί να δεσμευτεί από την διαθέσιμη τεχνολογία. Το τεχνητά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό δίνεται από μια σχέση η οποία εκφράζει το ποσοστό της κινητικής ενέργειας του αέρα που διαπερνά μια νοητή επιφάνεια S σε μια χρονική στιγμή. Μπορεί να εκφραστεί από την παρακάτω σχέση:

$$\text{Τεχνικά Αξιοποιήσιμο Αιολικό Δυναμικό} = \frac{1}{S} \int_0^t P_w(t) dt$$

Όπου:

- § S : Μια νοητή επιφάνεια, εάν μιλούμε για μια ανεμογεννήτρια τότε αυτή θα είναι η επιφάνεια της πτερωτής της.
- § t : Χρονική κλιμακα, εάν μιλούμε για μια ανεμογεννήτρια τότε είναι η διάρκεια που θα λειτουργεί.
- § $P_w(t)$: Είναι η ισχύς του ανέμου. Εάν μιλούμε για συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια τότε το μέγεθος αυτό θα το βρούμε από την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας που δίδεται από τον κατασκευαστή.

Το πρόβλημα που υπάρχει είναι ότι για τον προσδιορισμό της ισχύος του ανέμου ώστε να υπολογίσουμε το τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό και να καταλήξουμε σε συμπέρασμα

αν αξίζει να τοποθετήσουμε μια συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία χρειαζόμαστε την ταχύτητα του ανέμου. Σε κάποιες περιοχές υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία από τα οποία μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα του ανέμου. Σε αυτές τις περιπτώσεις η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου και η μεταβλητότητα της δίδονται από τις επόμενες σχέσεις της στατιστικής:

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i$$

$$\sigma_V^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2$$

Όπου:

- § \bar{V} : Η μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου.
- § V_i : Η στιγμιαία τιμή της ταχύτητας του ανέμου όπως έχει μετρηθεί.
- § σ_V^2 : Η μεταβλητότητα της ταχύτητας του ανέμου από την μέση τιμή.
- § N : Ο αριθμός των μετρήσεων

Για να είναι ακριβής αυτή η προσέγγιση πρέπει τα ανεμολογικά στοιχεία να περιλαμβάνουν τρεις μετρήσεις την ημέρα για μια περίοδο τουλάχιστον 5 ετών. Σε κάποιες άλλες περιοχές δεν υπάρχουν όμως καθόλου ανεμολογικά στοιχεία άρα χρειάζεται να εκτιμήσουμε την ταχύτητα του ανέμου. Για τις περιοχές της εύκρατης ζώνης στην οποία ανήκει και η Ελλάδα η εκτίμηση είναι αρκετά ικανοποιητική με την χρήση των κατανομών Weibull και Rayleigh, δύο θεωρητικών κατανομών της στατιστικής. Χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των δύο κατανομών μπορούμε να προσδιορίσουμε την πιθανότητα να βρίσκεται η ταχύτητα του ανέμου μεταξύ των τιμών $V - dV/2$ και $V+dV/2$ ενώ χρησιμοποιώντας τις αθροιστικές συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των δύο κατανομών μπορούμε να προσδιορίσουμε την πιθανότητα η ταχύτητα V να έχει μικρότερη τιμή από μια συγκεκριμένη ταχύτητα V_s . Παρακάτω ακολουθούν οι συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας των δύο κατανομών.

$$\text{Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull: } p(V) = \left[\frac{C}{A}\right] \cdot \left[\frac{V}{A}\right]^{C-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{V}{A}\right)^C\right]$$

$$\text{Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Rayleigh: } p(V) = \left[\frac{\pi \cdot V}{2 \cdot \bar{V}^2}\right] \cdot \exp\left[-\left(\frac{\pi \cdot V^2}{4 \cdot \bar{V}^2}\right)\right]$$

Όπου:

- § $p(V)$: Η πιθανότητα έτσι ώστε η ταχύτητα του ανέμου να είναι $V - dV/2 \leq V \leq V + dV/2$
- § C : Παράμετρος μορφής της συνάρτησης (form factor).
- § A : Σταθερά σχήματος της συνάρτησης (shape factor).
- § \bar{V} : Η μέση ταχύτητα του ανέμου.

Η κατανομή Rayleigh προέρχεται από την κατανομή Weibull εάν η παράμετρος μορφής C έχει σταθερή τιμή, ίση με 2. Η μέση ταχύτητα του ανέμου που χρησιμοποιείται στην κατανομή Rayleigh πρέπει να μετατραπεί αναλόγως του ύψους και της τραχύτητας. Οι σχέσεις αυτές παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα. Για να πάρουμε την αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Weibull ολοκληρώνουμε την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας. Προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\text{Αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull: } P(V \leq V_s) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V_s}{A}\right)^C\right]$$

Η ταχύτητα V_s είναι μια συγκεκριμένη ταχύτητα για την οποία θέτω ως όριο για κάποιο λόγο. Οι σταθερές C και A είναι διαφορετικές για κάθε περιοχή. Συνδέοντε με την μέση τιμή της ταχύτητας του ανέμου και την μεταβλητότητα της με τις παρακάτω σχέσεις.

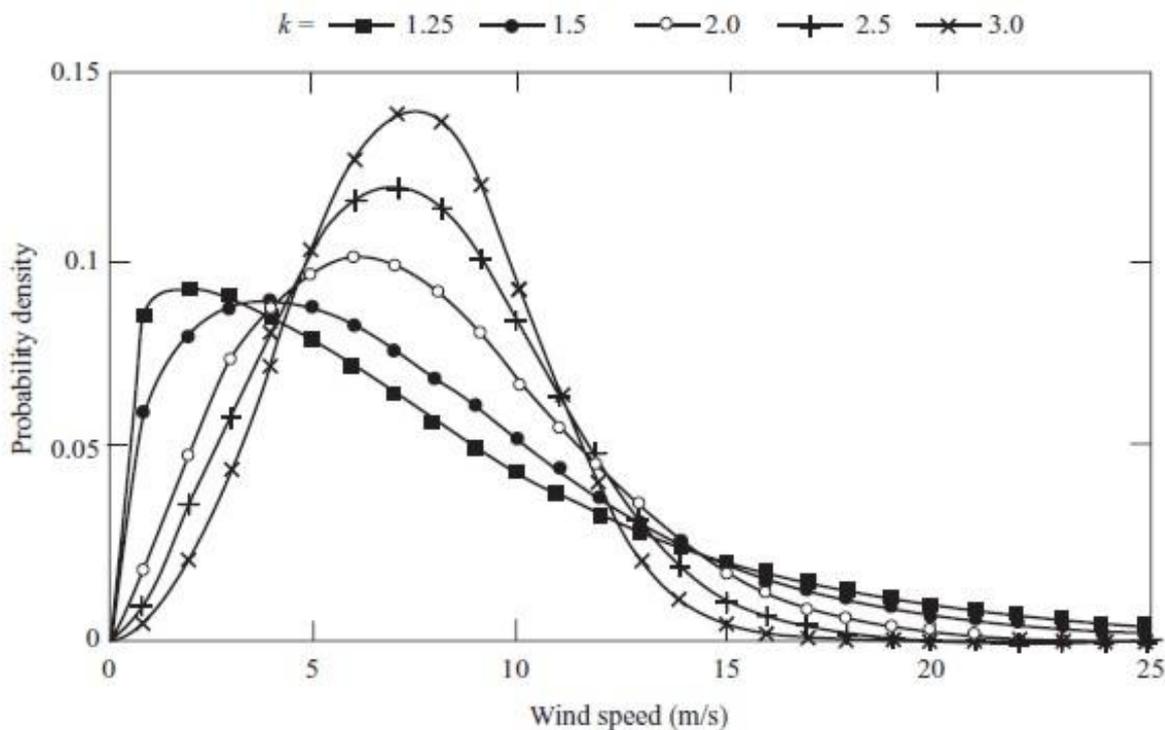
$$\bar{V} = A \cdot \Gamma\left[1 + \left(\frac{1}{C}\right)\right]$$

$$\sigma_{\bar{V}}^2 = A^2 \cdot \left\{ \Gamma\left[1 + \left(\frac{2}{C}\right)\right] - \Gamma^2\left[1 + \frac{1}{C}\right] \right\}$$

Το A μεταβάλλεται συναρτήσει του ύψους και η μεταβολή του δίδεται με τις ίδιες σχέσεις που υπολογίζεται η μεταβολή της ταχύτητας λόγω του ύψους απλώς και μόνο με την αντικατάσταση των ταχυτήτων με τα A. Το μόνο που χρειαζόμαστε ακόμη είναι τις τιμές της κατανομής Γ. Η κατανομή της συνάρτησης Γ δίδεται από την επόμενη εξίσωση και οι τιμές τις υπολογίζονται από διάφορους πίνακες συναρτήσει της παραμέτρου n.

$$\Gamma = \int_0^{\infty} x^{n-1} e^{-x} dx$$

Μια ενδεικτική κατανομή Weibull παρουσιάζεται στο επόμενο γράφημα για κάποιες τιμές του C (στο σχεδιάγραμμα αυτό έχει τον συμβολισμό k). Θυμίζω ότι η τιμή 2 παρουσιάζει την κατανομή Rayleigh.



Εικόνα 2.4: Κατανομή Weibull για διαφορετικές παραμέτρους μορφής C^[8]

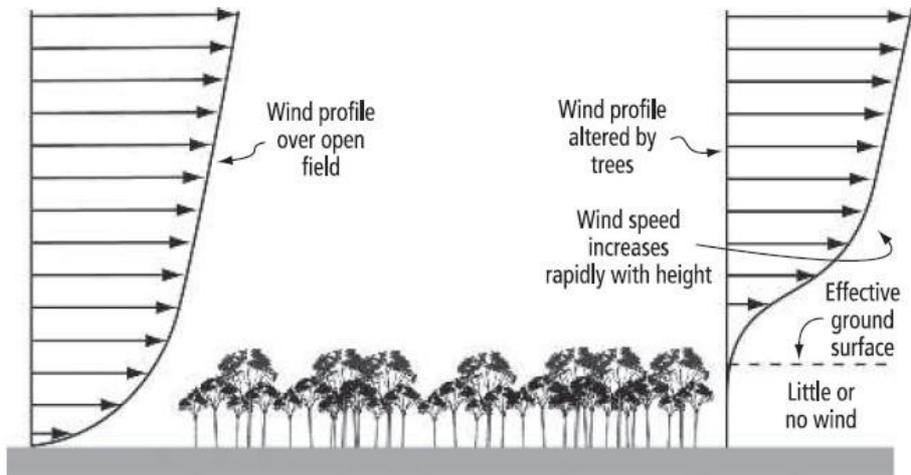
Με γνωστή τώρα την ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή ενδιαφέροντος μπορεί να υπολογιστεί το τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό και να κριθεί εν τέλει αν είναι σφαιρικού η τοποθέτηση ανεμογεννήτριας σε αυτή την περιοχή.^{[4], [5], [7], [8], [14]}

2.3 Μεταβολή του ανέμου λόγω εμποδίων

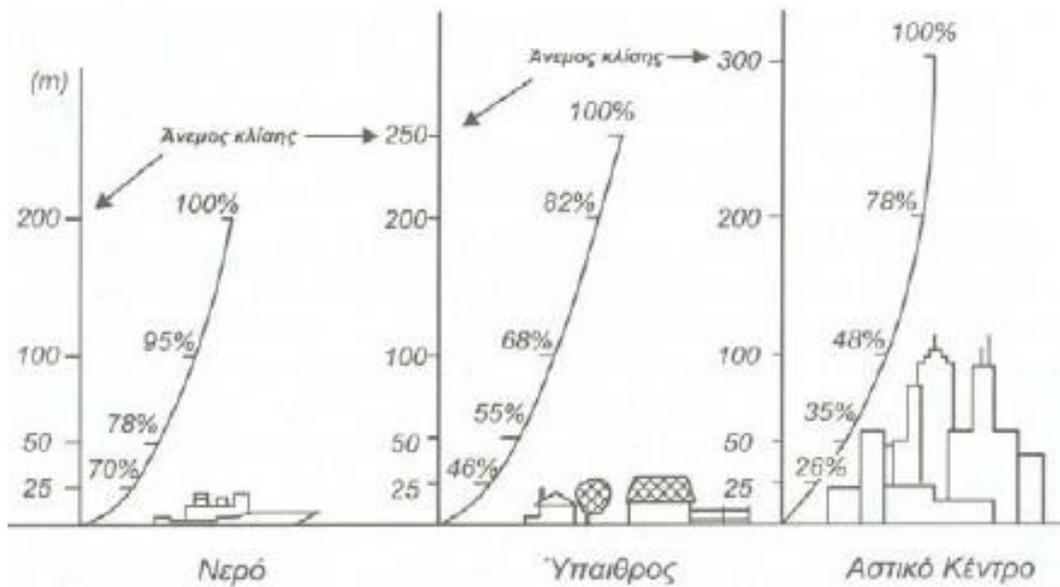
Στην παραπάνω ενότητα είδαμε τον τρόπο δημιουργίας του ανέμου. Εδώ θα ασχοληθούμε με τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται ο άνεμος (η ταχύτητα του κυρίως γιατί αυτή μας ενδιαφέρει) λόγω της τραχύτητας που έχει το έδαφος και της ύπαρξης εμποδίων στην πορεία του, λόγω του ύψους στο οποίο βρισκόμαστε από την επιφάνεια της γής και λόγω του αναγλύφου. Πριν προχωρήσουμε να δούμε πως επιδρούν αυτοί οι παράγοντες πρέπει πρώτα να ορίσουμε το προφίλ του ανέμου. Προφίλ του ανέμου ουσιαστικά εννοούμε την ταχύτητα που έχει ο άνεμος σε διάφορα ύψη από την επιφάνεια της γης. Όπως κάθε ρευστό έτσι και ο άνεμος έχει ένα προφίλ με σταθερή ταχύτητα από κάποιο ύψος και πέρα και ένα οριακό στρώμα από κάτω. Το πάχος του οριακού στρώματος είναι αυτό που επηρεάζεται από την τραχύτητα και τα διάφορα εμπόδια που υπάρχουν στο έδαφος και αυτό θα αναλύσουμε στην επόμενη υποενότητα. Οι έντονες μεταβολές του ανέμου παρουσιάζονται στα πρώτα 500 μέτρα από την επιφάνεια της γης, σε σπάνιες περιπτώσεις εμφανίζονται και ως τα 1000 μέτρα, από εκεί και πέρα πρέπει να θεωρείται σταθερή η ταχύτητα του ανέμου. Βέβαια δεν μας ενδιαφέρει τις γίνεται σε τέτοιο ύψος γιατί οι ανεμογεννήτριες μας δυστυχώς λειτουργούν μέσα στο οριακό στρώμα του ανέμου.

2.3.1 Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους

Με τον όρο τραχύτητα εδάφους εννοείται η ύπαρξη διαφόρων εμποδίων στην πορεία του ανέμου. Μια αέρια μάζα μπορεί να κινείται πάνω από πάγο, πάνω από σπαρτά, πάνω από δέντρα, πάνω από ανθρώπους, πάνω από μικρά σπίτια, πάνω από πολυκατοικίες και λοιπά υψηλά κτίρια και γενικά πάνω από διάφορα άλλα εμπόδια. Είναι απόλυτα κατανοητό ότι αλλιώς επηρεάζεται η κίνηση των αέριων μαζών αν έχουν να ξεπεράσουν μια πολυκατοικία και αλλιώς αν περνούν πάνω από ένα στρώμα πάγου. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η μετατροπή στο προφίλ της ταχύτητας πίσω από μια συστοιχία δέντρων και το ποσοστό της ταχύτητας του ανέμου που κινείται πάνω από νερό, από ύπαιθρο και από πόλη.



Εικόνα 2.5: Μεταβολή του προφίλ του ανέμου μετά το πέρασμα από μια συστοιχία δέντρων^[8]



Εικόνα 2.6: Μεταβολή του προφίλ του ανέμου αναλόγως της τραχύτητας του εδάφους^[15]

Παραπάνω παρατηρούμε ότι το προφίλ του ανέμου είναι πλήρως ανεπτυγμένο στα 200 μέτρα εάν κινείται πάνω σε νερό, στα 250 μέτρα εάν κινείται στην ύπαιθρο και στα 300 μέτρα εάν κινείται πάνω από ένα αστικό κέντρο. Στα 25 με 100 μέτρα στα οποία τοποθετούντε συνήθως οι ανεμογεννήτριες έχουμε πολύ μικρότερες μειώσεις της ταχύτητας του ανέμου αν κινείται πάνω σε νερό. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο για αυτό και βρίσκουμε πολλές ανεμογεννήτριες τοποθετημένες σε παραλιακά μέτωπα ή ακόμα και μέσα στην θάλασσα.

Η τραχύτητα του εδάφους, συμβολίζεται με z_0 , πέρνει διαφορετικές τιμές αναλόγως των εμποδίων. Οι τιμές αυτές υπάρχουν σε διάφορους πίνακες σαν τον παρακάτω. Παρατηρούμε ότι η μικρότερη τραχύτητα είναι της τάξεως του 10^{-4} για πολύ λείες επιφάνειες όπως το νερό και ο πάγος και μπορεί να φτάσουν και την τιμή 1 για αστικά κέντρα με πολύ υψηλά κτίρια. Οι τιμές μπορεί να διαφέρουν από πίνακα σε πίνακα που δίνει ο κάθε ερευνητής αλλά είναι της ίδιας τάξης μεγέθους.

z_0 [m]	Types of terrain surfaces	Roughness class
1.00	City Forest	3
0.50	Suburbs	
0.30	Built-up terrain	
0.20	Many trees and/or bushes	2
0.10	Agricultural terrain with a closed appearance	
0.05	Agricultural terrain with an open appearance	
0.03	Agricultural terrain with very few buildings, trees, etc. Airports with buildings and trees	1
0.01	Airports, runway Meadow	0
$5 \cdot 10^{-3}$	Bare earth (smooth)	
10^{-3}	Snow surfaces (smooth growth)	
$3 \cdot 10^{-4}$	Sand surfaces (smooth)	0
10^{-4}	Water surfaces (lakes, fjords and the sea)	

Εικόνα 2.7: Τιμή της τραχύτητας αναλόγως της επιφάνειας^[5]

Με γνωστή την τιμή της τραχύτητας της επιφάνειας μπορεί να υπολογιστεί η μεταβολή στην ταχύτητα του ανέμου στο επιθυμητό ύψος στο οποίο θα τοποθετηθεί η ανεμογεννήτρια. Οι ερευνητές προτείνουν δύο εξισώσεις οι οποίες θεωρούντε αρκετά αξιόπιστες η πρώτη ειδικότερα για ύψη από 30 έως 50 μέτρα και η δεύτερη για μεγαλύτερα ύψη. Για μικρά ύψη θεωρούντε εξίσου αξιόπιστες και οι δύο.

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\ln \frac{H}{z_0}}{\ln \frac{H_0}{z_0}}$$

$$\frac{V}{V_0} = \left[\frac{H}{H_0} \right]^n$$

$$n = 0,04 \cdot \ln z_0 + 0,003 [\ln z_0]^2 + 0,24$$

Όπου:

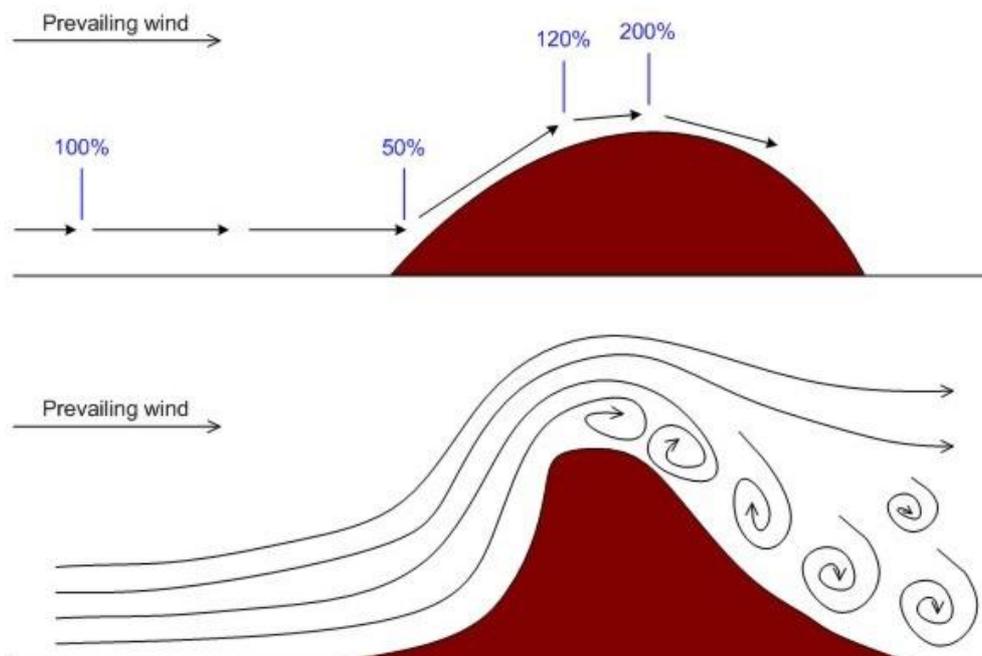
- § **H**: Το ύψος σε μέτρα στο οποίο μας ενδιαφέρει να υπολογίσουμε την ταχύτητα του ανέμου, συνήθως είναι το ύψος στο οποίο θα βάλουμε την ανεμογεννήτρια μας
- § **H₀**: Το ύψος στο οποίο έχουμε μια δεδομένη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου, συνήθως είναι ίσο με 10 μέτρα.
- § **V**: Η ταχύτητα του ανέμου που θέλουμε να υπολογίσουμε στο ύψος H.
- § **V₀**: Η ταχύτητα του ανέμου την οποία γνωρίζουμε μέσω μέτρησης.
- § **z₀**: Το ύψος της τραχύτητας του εδάφους σε μέτρα.
- § **n**: Παράμετρος σχετική με την τραχύτητα του εδάφους, δίδεται σε πίνακες σαν τον προηγούμενο, ανάλογα με τον τύπο της επιφάνειας του εδάφους ή υπολογίζεται προσεγγιστικά από την τρίτη σχέση (των Warner και Calman) συναρτήσει του z₀.

2.3.2 Επίδραση του ανάγλυφου της γης

Ο δεύτερος σημαντικός παράγοντας ο οποίος επηρεάζει την ταχύτητα του ανέμου είναι το ανάγλυφο του εδάφους. Με τον όρο ανάγλυφο εννοούμε την μορφολογία, την τοπογραφία του εδάφους δηλαδή την ύπαρξη βουνών, λόφων, κοιλάδων, χαράδρων οι οποίες επηρεάζουν την πορεία του ανέμου. Εάν ο άνεμος πρέπει για παράδειγμα να περάσει πάνω από ένα λόφο, χωρίς να περάσει από το πλευρό του τότε αναμένεται η αύξηση της ταχύτητας του. Η αύξηση αυτή μπορεί να φτάσει και το 100% της αρχικής του ταχύτητας και είναι απόλυτα επιθυμητή καθώς θα υπερπολλαπλασιάσει την ισχύ (διπλασιασμός της ταχύτητας συνεπάγεται

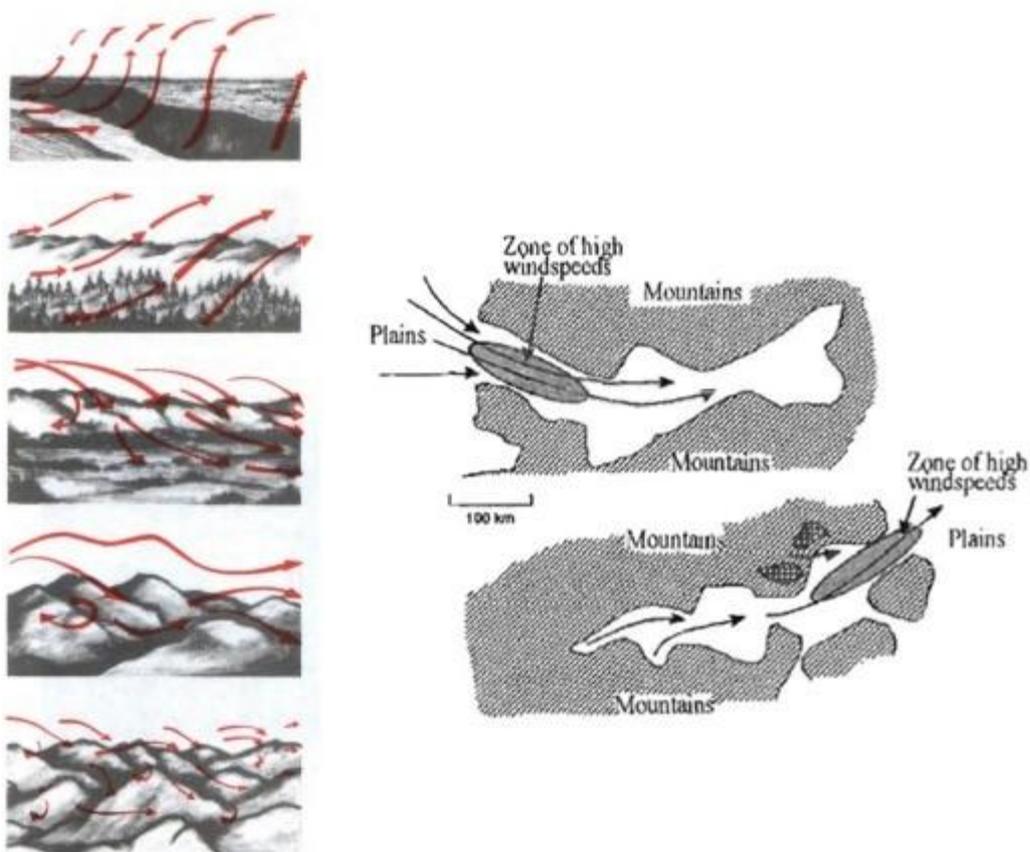
οκταπλασιασμό της διαθέσιμης ισχύος του ανέμου καθώς η αναλογία είναι στην τρίτη δύναμη της ταχύτητας).

Η αύξηση της ταχύτητας μπορεί να εξηγηθεί με βάση την μηχανική των ρευστών. Η κίνηση του ανέμου πάνω από το βουνό οδηγεί σε πύκνωση των ροϊκών γραμμών. Με βάση την εξίσωση του Bernulli πύκνωση των ροϊκών γραμμών σε ένα πεδίο κίνησης ρευστού συνεπάγεται αύξηση της ταχύτητας του ρευστού. Άρα στην κορυφή του βουνού έχουμε την μεγαλύτερη δυνατή ταχύτητα του ανέμου. Άρα η ιδανική θέση τοποθέτησης της ανεμογεννήτριας θα ήταν ακριβώς πάνω στην κορυφή. Όμως αυτό δεν συμβαίνει, η βέλτιστη τοποθέτηση είναι πάνω στην πλαγιά λίγο πριν την κορυφή. Ο λόγος που δεν τοποθετείται πάνω στην κορυφή είναι ότι εκεί έχουμε αλλαγή της κλίσης του βουνού, έχουμε μεταβολή στην κλίση πίεσης του ροϊκού πεδίου μας άρα είναι πολύ πιθανόν να υπάρχει αποκόλληση και φουσαλλίδα ανακυκλοφορίας, πράγμα ανεπιθύμητο για την λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Η αποκόλληση σίγουρα θα δημιουργηθεί στην πίσω πλευρά του λόφου όμως όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου ή εάν είναι αρκετά απότομο το βουνό η αποκόλληση κινείται προς τα πάνω και αρκετές φορές μπορεί να φτάσει και ως την κορυφή. Στην επόμενη εικόνα φαίνονται τα ροϊκά πεδία που σχηματίζονται όταν ο αέρας καλείτε να διαβεί πάνω από ένα χαμηλό λόφο και ένα απότομο βουνό.



Εικόνα 2.8: Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου κατά το πέρασμα πάνω από χαμηλό λόφο (επάνω) και μεταβολή του ροϊκού πεδίου κατά το πέρασμα από αρκετά απότομο βουνό (κάτω)^[41]

Βέβαια εάν το βουνό είναι πολύ απότομο τότε πιθανόν να δημιουργηθεί μια φουσαλλίδα ανακυκλοφορίας στο κάτω μέρος της μπροστινής πλαγιάς με αποτέλεσμα να διαταραχτεί το πεδίο του ανέμου και να μειωθεί η ταχύτητα του αλλά και να υπάρχει διακύμανση στην διεύθυνση του. Εάν πάλι έχουμε σειρά από βουνά ή λόφους τότε είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστεί το ροϊκό πεδίο και το που θα είναι η ιδανική θέση για την τοποθέτηση των ανεμογεννητριών μας. Τέλος, σε χαράδρες γνωρίζουμε ότι έχουμε ροές υψηλών ανέμων και με σταθερές διευθύνσεις έτσι θεωρούντε ιδανικές τοποθεσίες για τοποθέτηση των ανεμογεννητριών. Περίπλοκες κινήσεις του ανέμου πάνω από διάφορα ανάγλυφα ακολουθούν στην τελευταία εικόνα που ακολουθεί ως επίλογος του κεφαλαίου. ^{[4], [5], [8], [13], [15], [41], [42]}



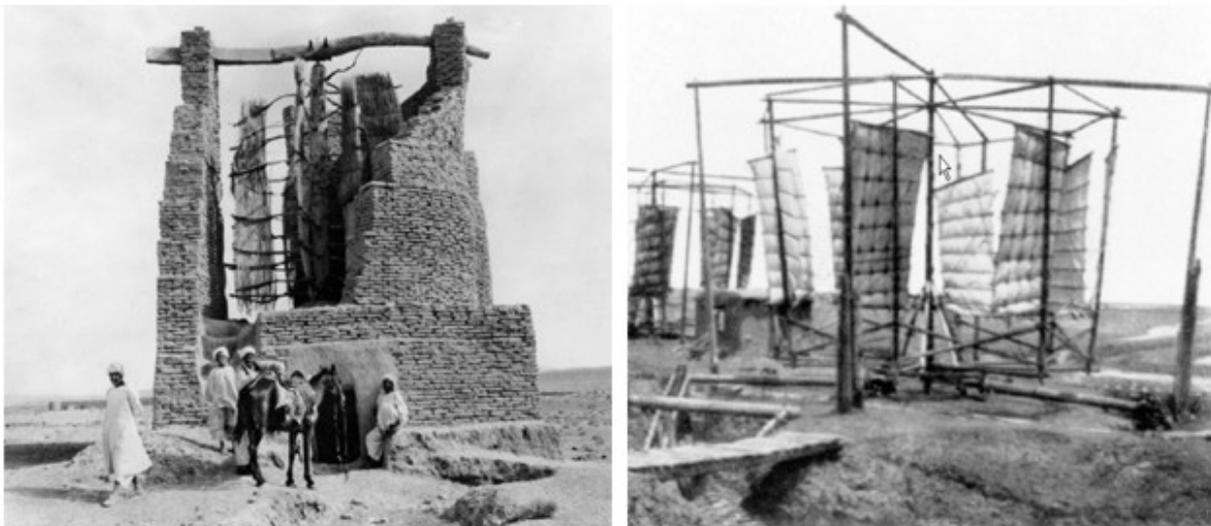
Εικόνα 2.9: Κίνηση των αερίων μαζών κατά το πέρασμα τους επάνω από διαφορετικά ανάγλυφα (αριστερά)^[42] και μέσα από μια κοιλάδα (δεξιά)^[9]

Κεφάλαιο 3

3 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο

3.1 Ιστορική αναδρομή

Ο άνθρωπος συνεχώς προσπαθεί να εξελίσσεται. Προσπαθεί να εκμεταλλευτεί ότιδήποτε μπορεί να του κάνει την ζωή ευκολότερη. Έτσι, πολύ νωρίς, οι αρχαίοι άνθρωποι αντιλήφθηκαν την μεγάλη δύναμη του αέρα και επίσης αντιλήφθηκαν ότι μπορεί να τους βοηθήσει. Η πρώτη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας στην στεριά (στα πλοιά χρησιμοποιούσε την δύναμη του ανέμου για να τα κινεί) εμφανίζεται στην αρχαία Περσία, στην περιοχή του σημερινού Αφγανιστάν και την Κίνα. Η εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου γινόταν μέσω ανεμομύλων και είχε ως σκοπό την άλεση των σιτηρών. Ο πρώτος ανεμόμυλος τέτοιου τύπου που σώζεται βρίσκεται στο Αφγανιστάν, στα σύνορα με τον Ιράν και η κατασκευή του τοποθετείται το 644 π. Χ. Η επόμενη αναφορά της χρήσης της αιολικής ενέργειας μιλάει για την Κίνα. Το 200 π. Χ. ήταν γνωστοί στην Κίνα ανεμόμυλοι για άλεση δημητριακών και για άντληση νερού. Οι ανεμόμυλοι και των δύο αυτών χωρών ήταν κατακόρυφου άξονα. Κανένας επιστήμονας δεν μπορεί να κρίνει αν οι κινέζοι είχαν ανεμόμυλους πριν από τους πέρσες αλλά γνωρίζουμε όλοι ότι οι δύο αυτοί λαοί περίπου ταυτόχρονα εκμεταλλεύτηκαν πρώτοι τον άνεμο.



Εικόνα 3.1: Ανεμόμυλοι της Αρχαίας Περσίας για άλεση δημητριακών (αριστερά) και της Αρχαίας Κίνας για άντληση νερού^[5]

Η επόμενη αναφορά εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας γίνεται στον ισλαμικό χώρο. Πιστεύεται ότι απέκτησαν την γνώση οι μουσουλμάνοι άραβες όταν κατέκτησαν την Περσία. Αυτοί ήταν και οι πρώτοι ανεμόμυλοι οριζόντιου άξονα. Μέσω των σταυροφοριών έφτασε ο ανεμόμυλος και στην δυτική Ευρώπη. Στο 1180 τοποθετείται ο πρώτος «ευρωπαϊκός» ανεμόμυλος, στην περιοχή της Νορμανδίας, ένας ανεμόμυλος οριζόντιου άξονα. Εδώ πολλοί επιστήμονες διαφωνούν εάν αυτός ο ανεμόμυλος προήλθε ως εξέλιξη των ήδη γνωστών στους άραβες ανεμόμυλων ή ανακαλύφθηκε ξεχωριστά. Εν πάσει περιπτώση μικρή σημασία έχει αυτό, είναι γεγονός ότι μέχρι τον 13^ο αιώνα όλη η βορειοδυτική Ευρώπη χρησιμοποιούσε ευρέως τους ανεμόμυλους οριζόντιου άξονα οι οποίοι, λόγω της κατασκευής τους ονομάστηκαν και ανεμόμυλοι τύπου σταθμού. Γύρω στον 15^ο αιώνα εμφανίστηκαν και οι πρώτοι ανεμόμυλοι σε πύργους, ανεμόμυλοι που έγιναν ευρέως γνωστοί από την χρήση τους στην Ολλανδία και της παρείχαν μεγάλη οικονομική ευμάρεια. Στο τέλος του 19^{ου} αιώνα υπήρχαν γύρω στους 9000 ανεμομύλους αυτού του τύπου στην Ολλανδία και ο κάθε ένας τους είχε ισχύ έως και 65KW. Τέτοιου τύπου ανεμόμυλοι υπάρχουν και σε πολλά ελληνικά νησιά όπως για παράδειγμα στην Μύκονο. Στην επόμενη εικόνα φαίνονται δύο ανεμόμυλοι, ένας τύπου σταθμού και ένας σε πύργο.



Εικόνα 3.2: Γερμανικός ανεμόμυλος τύπου φυλακίου (αριστερά) και ολλανδικός ανεμόμυλος τύπου πύργου (δεξιά)^[5]

Η ανάπτυξη των ανεμομύλων έχει ως τελευταίο σημείο της ιστορίας της τον ανεμόμυλο αμερικάνικου τύπου, ένα ανεμόμυλο όπου παρουσιάστηκε στην Αμερική, οριζόντιου άξονα, πολύπτερο, τοποθετημένο πάνω σε μεταλλικό πυλώνα και είχε ως χρήση την άντληση νερού. Η ανακάλυψη του ανέγεται στο 1854 από τον μηχανικό και εφευρέτη John Burnham στο Κοννέκτικαντ. Όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί είναι ο προπομπός των σύγχρονων ανεμογεννητριών, είναι ο μοναδικός ανεμόμυλος που τους μοιάζει ως κατασκευή.

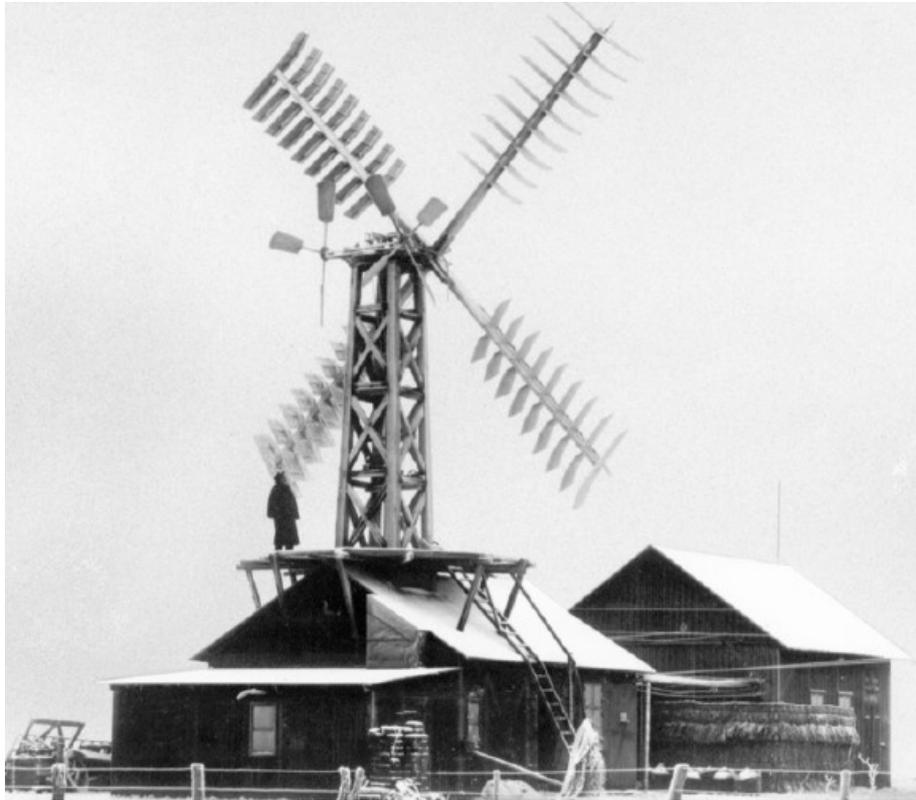


Εικόνα 3.3: Ανεμόμυλος αμερικάνικου τύπου για άντληση νερού^[33]

Κάπου εδώ σταματάει η ιστορία των ανεμομύλων ως μοναδικός τρόπος εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας. Οι επιστήμονες στρέφοντε πλέον στην ιδέα της ηλεκτροπαραγωγής. Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, και ενώ οι μεγάλες πόλεις είχαν ήδη ηλεκτροδοτηθεί ήταν μεγάλο πρόβλημα η ηλεκτροδότηση απομονωμένων και μακρινών περιοχών. Έτσι ξεκίνησε ως ιδέα η τοπική παραγωγή ηλεκτρισμού με εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Διάφοροι αμερικανοί προσπάθησαν να τοποθετήσουν μικρές γεννήτριες στους αμερικάνικου τύπου ανεμόμυλους, σχεδιασμένους για άντληση νερού με πενιχρά αποτελέσματα. Αντίθετα, η πρώτη σοβαρή προσπάθεια έγινε στην Ευρώπη και συγκεκριμένα στην Δανία.

Ο Δανός Poul La Cour, μόλις το 1891 κατάφερε να κατασκευάσει ένα πειραματικό ανεμόμυλο ο οποίος θα περιέστρεφε μια γεννήτρια. Με αυτό τον τρόπο κατάφερε να παράξει ηλεκτρισμό ο οποίος χρησιμοποιούταν για ηλεκτρόλυση έτσι ώστε λάμπες αερίου να φωτίσουν το Askov, την πόλη στην οποία ήταν καθηγητής. Με αυτό τον τρόπο ο La Cour συνέδεσε τον

όνομα του με την μετάβαση από τον ανεμόμυλο στην ανεμογεννήτρια. Η πρώτη ανεμογεννήτρια παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.

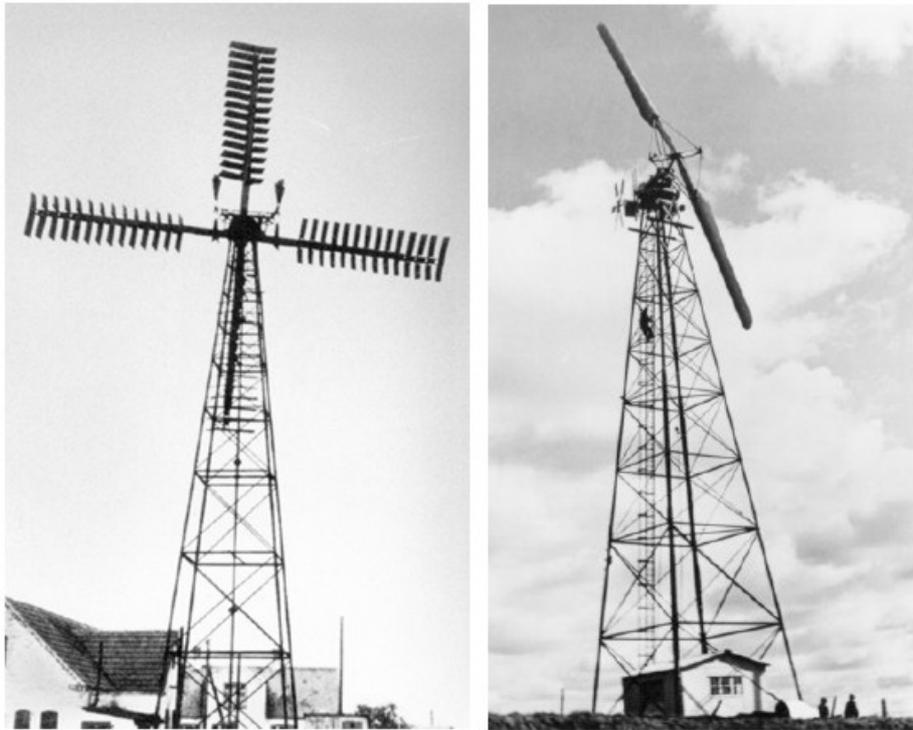


Εικόνα 3.4: Η πρώτη ανεμογεννήτρια, κατασκευασμένη από τον La Cour στο Askov της Δανίας το 1891^[5]

Στην συνέχεια ο La Cour μελέτησε πειραματικά τις ανεμογεννήτριες, το 1897 κατασκεύασε μια μεγαλύτερη, το 1903 ίδρυσε την οργάνωση των δανών μηχανικών για την αιολική ενέργεια (Danish Wind Power Engineers), ίδρυσε την πρώτη εταιρία κατασκευής ανεμογεννητριών με το όνομα Lykkegard, έως το 1908 εγκατάστησε 72 και έως το 1918 είχε 120 ανεμογεννήτριες σε λειτουργία. Η ισχύς των ανεμογεννητριών του La Cour κυμαινόταν μεταξύ 10 και 35 kW. Πολλές από αυτές της ανεμογεννήτριες παρείχαν ηλεκτρικό ρεύμα σε απομακρυσμένες περιοχές και μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο φτάνοντας έτσι τα 50 χρόνια ζωής πράγμα θαυμαστό για το πρώιμο της τεχνολογίας που χρησιμοποιούσαν.

Στην πορεία, η εταιρία F. L. Smidht company εισέρχεται στην αγορά φέρνοντας καινούρια σχέδια ανεμογεννητριών οι οποίες παρείχαν ισχύ έως και 50 kW. Όπως οι ανεμογεννήτριες του La Cour έτσι και οι ανεμογεννήτριες του Smidht παρήγαγαν συνεχές ρεύμα

εκτός από μια. Οι δύο ανεμογεννήτριες ήταν πανομοιότυπες κατασκευαστικά και αυτό φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.

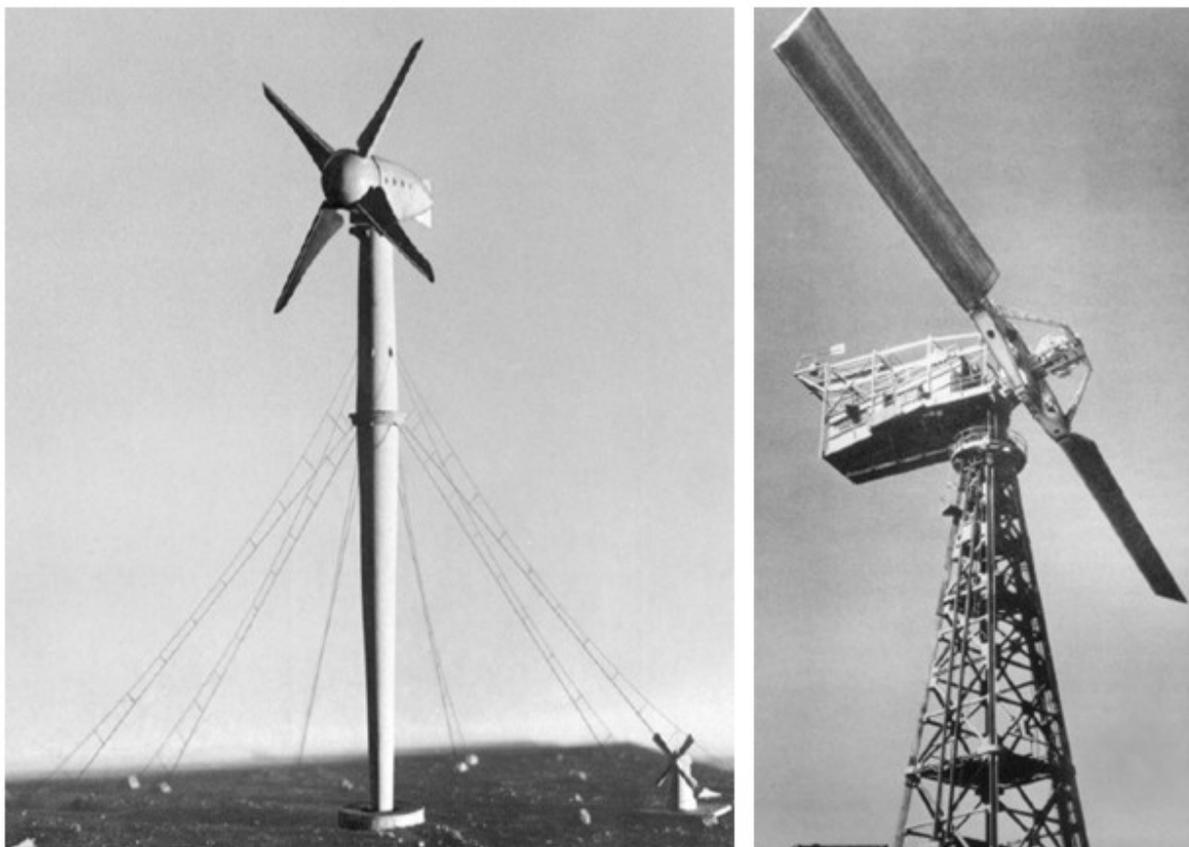


Εικόνα 3.5: Οι πρώτες ανεμογεννήτριες του La Cour κατασκευής του 1908 (αριστερά) και του Smidht κατασκευής του 1941 (δεξιά)^[5]

Στην συνέχεια, η εταιρία του Smidht προχώρησε ένα βήμα παρακάτω σχεδιάζοντας μια ανεμογεννήτρια μεγαλύτερης ισχύος, έφτανε έως τα 70 kW, και τοποθετώντας την πάνω σε πυλώνα από σκυρόδεμα. Έτσι πλέον η ανεμογεννήτρια ξεφεύγει από τα παραδοσιακά σχέδια των ανεμομύλων και πλησιάζει στην σύγχρονη μορφή της.

Ακολούθως η Γερμανία αναλαμβάνει την πρωτοκαθεδρία στην παραγωγή ηλεκτρισμού από τον άνεμο. Μέχρι την έναρξη του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου περισσότεροι από δέκα κατασκευαστές ανεμογεννητριών υπάρχουν στην γερμανική επικράτεια και έχουν ήδη εγκαταστήσει 3600 ανεμογεννήτριες. Το 1942 ο Γερμανός επιστήμονας Kleinhenz σε συνεργασία με την εταιρία MAN κατασκευάζουν την πρώτη πειραματική ανεμογεννήτρια μεγάλης ισχύος 10000 kW. Αυτή η ανεμογεννήτρια είχε διαστάσεις ρότορα 130 μέτρα και ήταν ένα πραγματικά μεγαλεπίβολο σχέδιο που δεν πραγματοποιήθηκε ποτέ λόγω του πολέμου.

Ταυτόχρονα, στην Αμερική, το 1941 ο Putnam σχεδιάζει μια ανεμογεννήτρια ισχύος 1250 kW την οποία και κατασκευάζει η εταιρία S. Morgan Smith Company. Αυτή ήταν η πρώτη μεγάλη ανεμογεννήτρια των ΗΠΑ. Οι δύο ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος, των Kleinhenz – MAN και των Putnam – Smith παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 3.6: Ανεμογεννήτρια ισχύος 20000 kW των KleinHerz – MAN (αριστερά) και ανεμογεννήτρια ισχύος 1250 kW των Putnam – Smith (δεξιά)^[5]

Τα επόμενα έτη, δεν παρουσιάστηκε κάτι αξιόλογο, κάτι επαναστατικό στον χώρο, απλώς παρουσιάζονταν ανεμογεννήτριες με την ίδια ισχύ αλλά πολύ μικρότερο μέγεθος. Μετά την ενεργειακή κρίση του 1970 ξεκινάει η NASA τα πειράματα σε μεγάλες ανεμογεννήτριες ισχύος γύρω στα 2500 kW, τις ανεμογεννήτριες οι οποίες πλέον έχουν επικρατήσει και τις γνωρίζουμε όλοι. Το 1979 – 1980 κατασκευάστηκαν τα πρώτα αιολικά πάρκα στις ΗΠΑ. Περιελάμβαναν μικρές ανεμογεννήτριες, έως 100 kW. Τα επόμενα χρόνια, μέχρι το 1985 εμφανίστηκαν πάρα πολλά αιολικά πάρκα ειδικά στην Καλιφόρνια. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται ένα αιολικό πάρκο σε λειτουργία στην Καλιφόρνια, στα βουνά Tehachapi το οποίο κατασκευάστηκε το 1986 και χρησιμοποιεί ανεμογεννήτριες MAN – Aeroman.



Εικόνα 3.7: Αιολικό πάρκο, κατασκευασμένο το 1986 στην Καλιφόρνια^[5]

Επόμενη και μέχρι στιγμής τελευταία εξέλιξη στον χώρο της αιολικής ενέργειας είναι τα υπεράκτια αιολικά πάρκα, αιολικά πάρκα τοποθετημένα στην θάλασσα έτσι ώστε ο άνεμος να έχει την μεγαλύτερη δυνατή ταχύτητα και να έχω μεγαλύτερη απόδοση. Το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο κατασκευάστηκε το 1991 στην Δανία και έχει 11 ανεμογεννήτριες ισχύος 450 kW έκαστη.



Εικόνα 3.8: Πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο στην τοποθεσία Vindeby της Δανίας^[34]

Κάπως έτσι ολοκληρώνεται και η ιστορική αναδρομή στην πορεία της εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας από τον άνθρωπο.^{[4], [5], [33], [34], [35]}

3.2 Κατηγορίες ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες και γενικά οι μηχανές εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας (ή συντομότερα αιολικές μηχανές) που έχουν κατασκευαστεί είναι πάρα πολλές και χωρίζονται σε κατηγορίες με πολλά και διαφορετικά κριτήρια. Είναι προφανές ότι μια αιολική μηχανή ανήκει σε μια κατηγορία από κάθε κριτήριο. Τα κριτήρια που θα χρησιμοποιήσουμε είναι η μηχανική ισχύς της αιολικής μηχανής, η ταχύτητα περιστροφής της, την παράμετρο στιβαρότητας της μηχανής, τον αριθμό των πτερυγίων της και τέλος την τοποθέτηση του άξονα σε σχέση με τον άνεμο. Παρόλο που παρουσιάζεται ως τελευταίο κριτήριο η τοποθέτηση του άξονα σε σχέση με τον άνεμο εντούτοις είναι το σημαντικότερο γιατί χωρίζει τις αιολικές μηχανές σε δύο μεγάλες κατηγορίες με εντελώς διαφορετικά χαρακτηριστικά έτσι η αναφορά σε αυτό θα είναι εκτενέστερη.

3.2.1 Κατηγοριοποίηση με βάση την μηχανική ισχύ N_0

Οι αιολικές μηχανές γενικότερα αλλά και ειδικότερα οι ανεμογεννήτριες μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες βάσει της μηχανικής τους ισχύος. Οι τρεις κατηγορίες οριοθετούνται μέσα σε κάποια όρια ισχύος και τα οποία ακολουθούν.

- Μικρές αιολικές μηχανές: Η ονομαστική τους ισχύς κυμαίνεται από μερικά W έως κάποια kW, γενικά μπορούν να υπαχθούν σε αυτή την κατηγορία όσες μηχανές ικανοποιούν την παρακάτω εξίσωση:

$$50W \leq N_0 \leq 50kW$$

- Μεσαίες αιολικές μηχανές: Η ονομαστική τους ισχύς έχει μια γκάμα τιμών αλλά δεν ξεφεύγει από την τάξη του kW. Γενικά τοποθετούνται σε αυτή την κατηγορία όσες μηχανές ικανοποιούν την επόμενη εξίσωση:

$$50kW \leq N_0 \leq 500kW$$

- Μεγάλες αιολικές μηχανές: Η ονομαστική τους ισχύς πέρνει τιμές της τάξεως των MW. Στην κατηγορία αυτή μπορούν να τοποθετηθούν όσες μηχανές ικανοποιούν την παρακάτω εξίσωση:

$$500kW \leq N_0 \leq 4MW$$

Η κατηγοριοποίηση των αιολικών μηχανών με βάση το μέγεθος τους δεν είναι απόλυτη, συχνά πολλοί επιστήμονες παρουσιάζουν διαφορετικά όρια στις τρεις παραπάνω εξισώσεις. Ο λόγος που υπάρχει αυτή η διαφορετικότητα είναι κυρίως η εξέλιξη των ανεμογεννητριών έτσι η ύπαρξη ισχυρότερων μηχανών αυξάνει τα όρια.

3.2.2 Κατηγοριοποίηση με βάση την παράμετρο περιστροφής λ

Οι αιολικές μηχανές μπορούν να χωριστούν σε κατηγορίες με κριτήριο την ταχύτητα περιστροφής τους. Η ταχύτητα περιστροφής εκφράζεται μέσω μιας παραμέτρου λ (tip – speed ratio) η οποία σε μια ελληνική μετάφραση μπορεί να οριστεί ως παράμετρος περιστροφής. Η τιμή του λ δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V}$$

Όπου:

§ ω : Η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα

§ R : Η ακτίνα του δρομέα

§ V : Η ταχύτητα του ανέμου

Με βάση την παράμετρο περιστροφής οι αιολικές μηχανές καθορίζονται σε δύο κατηγορίες, τις ταχύστροφες και τις αργόστροφες. Πέραν από την παράμετρο περιστροφής σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την περιστροφική ταχύτητα μιας αιολικής μηχανής είναι το αν είναι συνδεδεμένη στο δίκτυο ή όχι. Μια ανεμογεννήτρια συνδεδεμένη στο δίκτυο πρέπει να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα συγκεκριμένης συχνότητας (50 Hz για την Ευρώπη και 60 Hz για τις ΗΠΑ) άρα πρέπει να έχει συγκεκριμένο αριθμό στροφών.

3.2.3 Κατηγοριοποίηση με βάση την παράμετρο στιβαρότητας σ

Μια άλλη σημαντική παράμετρος είναι η στιβαρότητα (solidity) της αιολικής μηχανής. Η στιβαρότητα είναι ένας λόγος εμβαδών, εκφράζει το εμβαδόν των πτερυγίων προς το εμβαδόν του συνολικού κύκλου τον οποίο διαγράφουν τα πτερύγια, αφαιρετικά μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ένα ποσοστό της επιφάνειας που καταλαμβάνουν τα πτερύγια σε ένα νοητό κύκλο μέσα

στον οποίο κινούνται. Η στιβαρότητα προσδιορίζεται διαφορετικά αναλόγως του τύπου της αιολικής μηχανής από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\sigma = \frac{z \cdot c \cdot R}{\pi \cdot R^2} \text{ για μηχανές οριζόντιου άξονα}$$

$$\sigma = \frac{z \cdot c}{R} \text{ για μηχανές κατακόρυφου άξονα}$$

Όπου:

- § **z**: Ο αριθμός των πτερυγίων της μηχανής
- § **c**: Η χορδή των πτερυγίων της μηχανής
- § **R**: Η ακτίνα της πτερωτής

Με βάση την στιβαρότητα προκύπτουν οι ακόλουθες δύο διακριτοποιήσεις των αιολικών μηχανών:

- Μηχανές μεγάλης στιβαρότητας: Αυτές οι μηχανές είναι συνήθως αργόστροφες μηχανές με βέλτιστη απόδοση ισχύος για μικρή παράμετρο περιστροφής, χαμηλού βαθμού απόδοσης, με πολλά πτερύγια και κακή αεροδυναμική σχεδίαση. Είναι απλής τεχνολογίας μηχανές με ελάχιστες ανάγκες συντήρησης και ικανότητα να ξεκινούν μόνες τους με την ύπαρξη ανέμου. Αυτά όλα τις καθιστούν ιδανικές για αγροτικές εφαρμογές. Ιδανικό παράδειγμα μηχανών μεγάλης στιβαρότητας είναι οι ανεμόμυλοι αμερικάνικου τύπου.
- Μηχανές μικρής στιβαρότητας: Οι μηχανές αυτές είναι ταχύστροφες μηχανές που αποδίδουν την μέγιστη ισχύ τους για μεγάλες παραμέτρους περιστροφής, υψηλού τεχνολογικού επιπέδου για αυτό και παρουσιάζουν βέλτιστη αεροδυναμική σχεδίαση. Έχουν λίγα πτερύγια και πολύ καλά αεροδυναμικά σχεδιασμένα έτσι έχουν μεγάλο βαθμό απόδοσης. Γενικά παρουσιάζουν μικρές δυνάμεις στα πτερύγια και μικρή ροπή στον άξονα τους έτσι κάποιες χρειάζονται υποβοήθηση για να εκκινήσουν. Είναι πολύ πιο ευπαθείς από τις μηχανές μεγάλης στιβαρότητας και χρειάζονται τακτική συντήρηση.

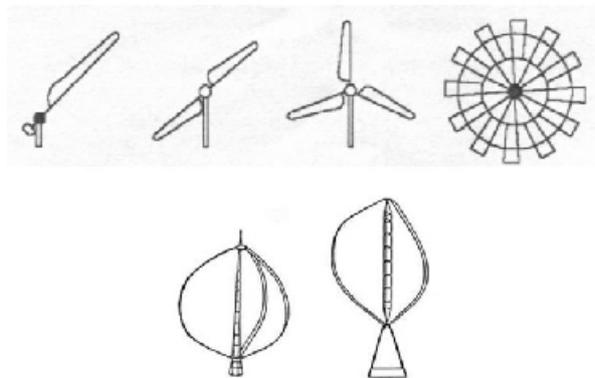
Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν κατάλληλες για ηλεκτροπαραγωγή αυτές τις ηλεκτρικές μηχανές.

3.2.4 Κατηγοριοποίηση με βάση τον αριθμό των πτερυγίων

Οι αιολικές μηχανές μπορούν να χωριστούν και με βάση τον αριθμό των πτερυγίων τους σε τέσσερις κατηγορίες οι οποίες είναι οι παρακάτω:

- Μονοπτέρυγες: Έχουν μόνο ένα πτερύγιο, σχεδόν δεν βρίσκουν εφαρμογή πουθενά.
- Διπτέρυγες: Έχουν δύο πτερύγια, είναι συνήθως μικρής στιβαρότητας και πολύστροφες και χρησιμοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή.
- Τριπτέρυγες: Έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με τις διπτέρυγες αιολικές μηχανές δηλαδή είναι πολύστροφες και μικρής στιβαρότητας με αποτέλεσμα να θεωρούντε ιδανικές για ηλεκτροπαραγωγή.
- Πολυπτέρυγες: Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν όσες αιολικές μηχανές έχουν πέραν των τριών πτερυγίων. Είναι συνήθως αργόστροφες και πολύ μεγάλης στιβαρότητας μηχανές ιδανικές μόνο για γεωργικές εφαρμογές όπως για παράδειγμα ο ανεμόμυλος αμερικάνικου τύπου.

Η κατηγοριοποίηση με βάση τον αριθμό των πτερυγίων γίνεται ανεξάρτητα από την τοποθέτηση του άξονα αν και συνήθως οι μηχανές κατακόρυφου άξονα είναι διπτέρυγες και τριπτέρυγες και σπάνια έχουν μεγαλύτερο αριθμό πτερυγίων. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται μηχανές τόσο κατακόρυφου όσο και οριζόντιου άξονα των τεσσάρων παραπάνω κατηγοριών.



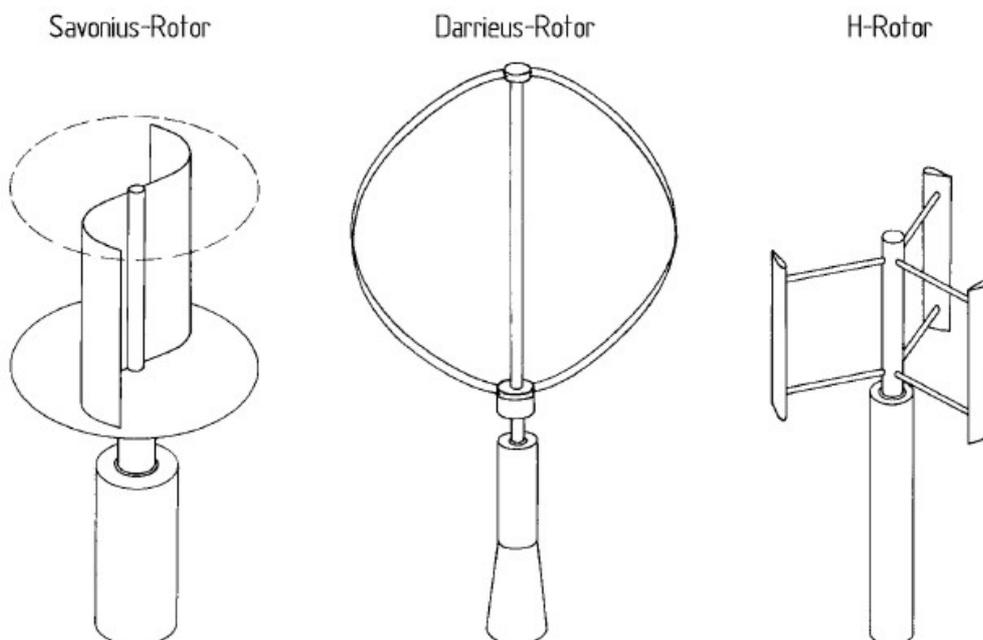
Εικόνα 3.9: Αιολικές μηχανές οριζόντιου άξονα ενός, δύο και τριών πτερυγίων (επάνω αριστερά), πολύπτερη αιολική μηχανή οριζόντιου άξονα (επάνω δεξιά) και αιολικές μηχανές κατακόρυφου άξονα, τύπου Darrieus τριών και δύο πτερυγίων (κάτω)^[14]

3.2.5 Κατηγοριοποίηση με βάση την τοποθέτηση του άξονα περιστροφής

Γενικά έχουν παρουσιαστεί πολλοί τύποι αιολικών μηχανών όμως μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκουν σε δύο κατηγορίες αναλόγως των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών τους. Αυτές τις δύο κατηγορίες ήδη τις έχουμε δει στην ιστορική αναφορά, είναι οι αιολικές μηχανές οριζόντιου άξονα και οι αιολικές μηχανές κατακόρυφου άξονα. Η διαφορά των δύο έγκειται στον άξονα περιστροφής και στην θέση του σε σχέση με τον άνεμο.

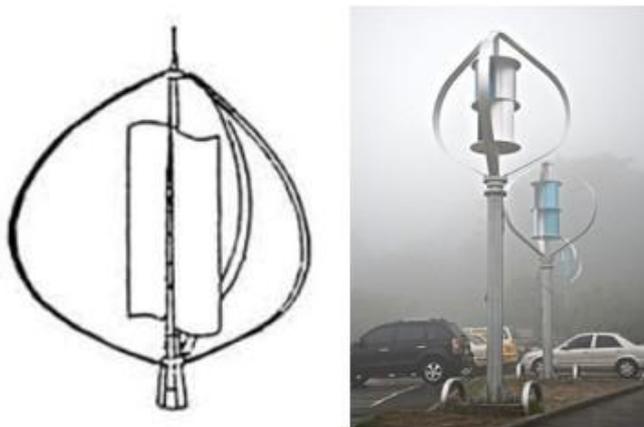
3.2.5.1 Αιολικές μηχανές – ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (VAWT)

Οι πρώτες μηχανές εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας που εμφανίστηκαν στην αρχαιότητα, σε Περσία και Κίνα ήταν κατακόρυφου άξονα. Στην συνέχεια και για πάρα πολλούς αιώνες επικράτησαν οι ανεμόμυλοι με οριζόντιο άξονα όμως τα τελευταία χρόνια, και με την πρόοδο της τεχνολογίας εμφανίζοντε πάλι μερικές σύγχρονες ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα. Η ονομασία τους προέρχεται και από την θέση του άξονα περιστροφής ο οποίος είναι κάθετος προς την διεύθυνση του ανέμου (cross – wind) και προς την επιφάνεια του εδάφους. Τέτοιου τύπου ανεμογεννήτριες είναι οι Savonius, Darrieus, H – Rotor, Tornado, Lebest, Musgrove, και Gyromill. Οι τρεις πρώτες είναι και οι γνωστότερες και ειδικά οι πρώτες δύο είναι αυτές που βρίσκουν περισσότερη εφαρμογή και φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.10: Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα τριών τύπων^[5]

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα έχουν πάρα πολλά μειονεκτήματα τα οποία θα δούμε σε επόμενη παράγραφο έτσι δεν έχουν μεγάλο έρεισμα στην αγορά ανεμογεννητριών, οι μόνες οι οποίες μπορούν να συναγωνιστούν τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα είναι οι ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus οι οποίες για την εκκίνηση τους θα χρησιμοποιούν υποβοηθητικά μια ανεμογεννήτρια τύπου Savonius. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται ο συνδιασμός Darrieus – Savonius.

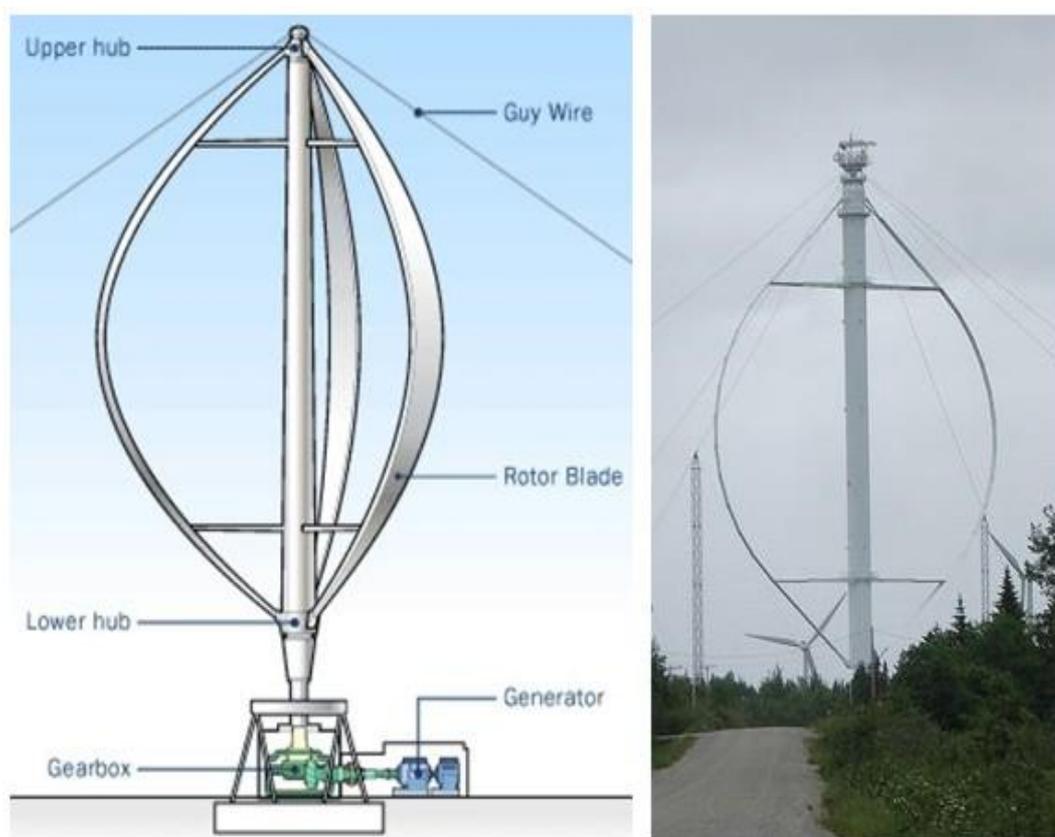


Εικόνα 3.11: Ανεμογεννήτρια Darrieus τριών πτερυγίων που χρησιμοποιεί μια ανεμογεννήτρια Savonius δύο πτερυγίων για την εκκίνηση της διαγραμματικά (αριστερά)^[14] και σε εφαρμογή στην Taiwan (δεξιά)^[38]

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα τα οποία τις καθιστούν ιδανικές για ηλεκτροπαραγωγή. Το βασικότερο των πλεονεκτημάτων τους είναι ότι δεν χρειάζονται προσανατολισμο, δεν θέλουν μηχανισμό που να καθοδηγεί τον ρότορα αναλόγως του που φυσάει ο άνεμος. Αντιθέτως, όποια διεύθυνση και αν έχει ο άνεμος αυτές θα περιστραφούν. Τέλος παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευκολία στον σχεδιασμό καθώς όλα τα απαραίτητα για την λειτουργία τους μηχανήματα είναι τοποθετημένα στο έδαφος γεγονός που διευκολύνει την κατασκευή (δεν χρειάζεται ενισχυμένη κατασκευή για να αντέχει να κρατά στον ουρανό τους μηχανισμούς της) αλλά και την συντήρηση της ανεμογεννήτριας. Το τελευταίο τους πλεονέκτημα είναι ότι λόγω της πιο μικρής κατασκευής τους μπορούν να τοποθετηθούν σε πολύ μικρότερες αποστάσεις μεταξύ τους σε ένα αιολικό πάρκο καταλαμβάνοντας έτσι πολύ μικρότερο χώρο το πάρκο ή δίνοντας μας την δυνατότητα να τοποθετήσουμε μεγαλύτερο αριθμό ανεμογεννητριών σε αυτό.

Πέραν των πλεονεκτημάτων τους παρουσιάζουν κάποια σοβαρά μειονεκτήματα τα οποία δεν τους έχουν επιτρέψει να επικρατήσουν στον χώρο, αντιθέτως λόγω αυτών είναι πολύ λίγες

σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Το πρώτο τους μειονέκτημα είναι ο μικρότερος συντελεστής ισχύος. Το δεύτερο εγκείται στην αεροδυναμική σχεδίαση τους που ακόμη δεν είναι βέλτιστη με αποτέλεσμα την ευαισθησία τους σε περιπτώσεις λειτουργίας εκτός σχεδιασμού και τα πτερύγια τους να πέφτουν εύκολα σε απώλεια στήριξης σε έντονες μεταβολές του ανέμου. Το τρίτο τους μειονέκτημα είναι η ανάγκη υποβοήθησης για την εκκίνηση τους. Το τελευταίο τους μειονέκτημα είναι ότι βρίσκονται χαμηλά, κοντά στην επιφάνεια της γης με αποτέλεσμα να δέχονται άνεμο μικρότερης ταχύτητας καθώς το προφίλ του δεν είναι ακόμη πλήρως ανεπτυγμένο. Γενικά οι ανεμογεννήτριες κατάκόρυφου άξονα ακόμη δεν έχουν ερευνηθεί εκτενώς και η τεχνολογία τους δεν είναι πολύ «ώριμη», έχουν όμως πολλά περιθώρια βελτίωσης. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η ανεμογεννήτρια Darrieus τόσο διαγραμματικά (όπου ξεχωρίζουν τα κυριότερα μέρη της) αλλά και σε μια τυπική εφαρμογή της.

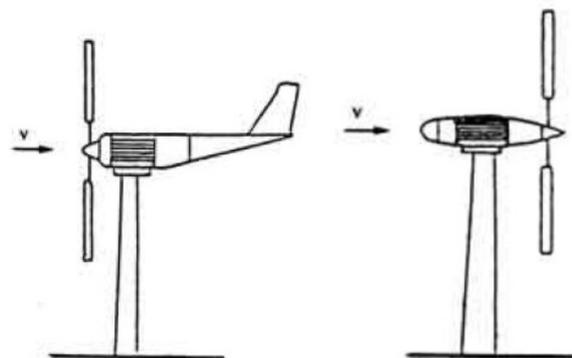


Εικόνα 3.12: Ανεμογεννήτρια κατάκόρυφου άξονα, τύπου Darrieus. Αριστερά παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα με τα κύρια μέρη της^[36] και δεξιά παρουσιάζεται εγκατεστημένη σε ένα αιολικό πάρκο στο Κέμπεκ του Καναδά^[37]

3.2.5.2 Αιολικές μηχανές – ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (HAWT)

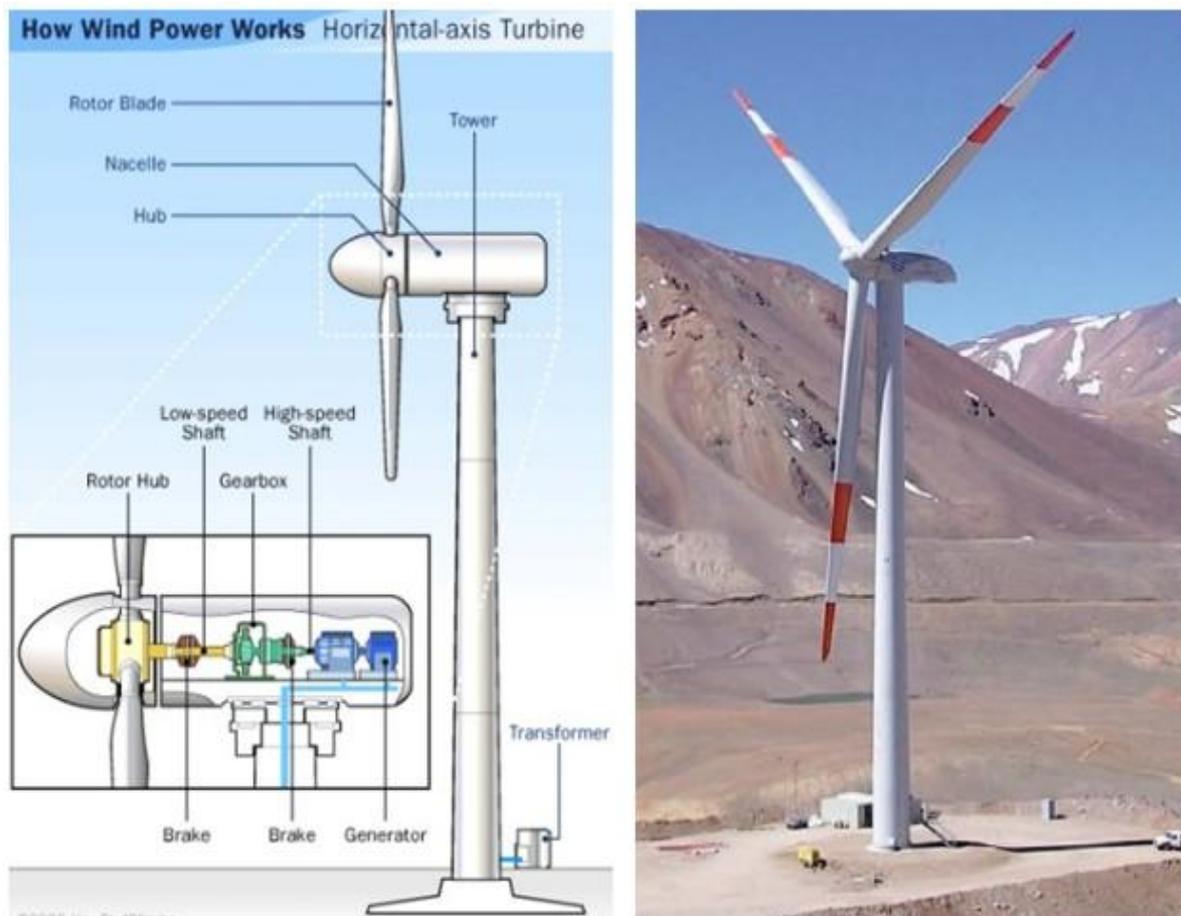
Οι αιολικές μηχανές οριζόντιου άξονα έχουν τοποθετημένο τον άξονα περιστροφής τους σε οριζόντια θέση, παράλληλα με την διεύθυνση του ανέμου (head on) και παράλληλα με το έδαφος. Μηχανές εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας με οριζόντιο άξονα έχουν εμφανιστεί από τον 10^ο αιώνα και έκτοτε αποτελούν την βασική επιλογή για όλες τις χρήσεις. Σε αυτή την κατηγορία μπορούν να υπαχθούν όλοι οι πολυπτερυγοί ανεμόμυλοι, από τους ολλανδικούς των τεσσάρων πτερυγίων έως και τους αμερικάνικους που έχουν γύρω στα δέκα και περισσότερα πτερύγια, και οι γνωστές σε όλους μας ανεμογεννήτριες δύο και τριών πτερυγίων τοποθετημένες πάνω στους τεράστιους πυλώνες. Στην συνέχεια θα ασχοληθούμε μόνο με τις ανεμογεννήτριες και όχι με τους ανεμόμυλους,

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, παρά το ότι κατά καιρούς εμφανίστηκαν σε πολλά μεγέθη και παραλλαγές εντούτοις δεν μπορούν να χωριστούν σε πολλούς τύπους. Παρουσιάζουν ενιαία χαρακτηριστικά όπως για παράδειγμα την απαίτηση ισχυρού πυλώνων, την τοποθέτηση αρκετών μηχανημάτων σε μεγάλο ύψος, την ύπαρξη μηχανισμού για την περιστροφή τους και την χρήση δύο ή τριών πτερυγίων. Ο μοναδικός διαχωρισμός που μπορεί να γίνει είναι σε σχέση με την τοποθέτηση τους ως προς την φορά του ανέμου. Μπορούν να διαχωριστούν σε ανάντη και κατάντη ανεμογεννήτριες αναλόγως αν ο άνεμος συναντάει πρώτα τον δρομέα που είναι μπροστά από τον πύργο ή την νασέλλα αφού ο δρομέας είναι πίσω από τον πύργο. Παρόλο που οι ανάντη ανεμογεννήτριες θεωρούντε καλύτερες γιατί αντιμετωπίζουν τον άνεμο χωρίς να έχει βρεθεί κάτι άλλο μπροστά τους εντούτοις οι κατάντη έχουν ένα μεγάλο πλεονέκτημα, η νασέλλα έχει τέτοιο σχεδιασμό έτσι ώστε να παίζει και τον ρόλο του πτερυγίου προσανατολισμού έτσι δεν χρειάζεται επιπλέον πτερύγιο. Οι δύο αυτοί τύποι φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.13: Ανάντη (αριστερά) και κατάντη (δεξιά) ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα^[14]

Στην συνέχεια παρουσιάζεται ακόμη μια εικόνα στην οποία υπάρχουν το διάγραμμα με τα κυριότερα μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα και δίπλα μια φωτογραφία μιας τυπικής εφαρμογής.



Εικόνα 3.14: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα. Αριστερά παρουσιάζεται ένα σχεδιάγραμμα με τα κύρια μέρη της^[36] και δεξιά παρουσιάζεται εγκατεστημένη στην τοποθεσία Veladero της Αργεντινής^[37]

Όπως φαίνεται και από το αριστερά διάγραμμα της παραπάνω εικόνας τα κυριότερα μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα είναι ο πύργος στήριξης, ο ρότορας με τα περύγια, ο χώρος με τους μηχανισμούς ο οποίος καλύπτεται εξωτερικά από ένα καπάκι, την νασέλλα, και ο μετασχηματιστής. Μέσα στην νασέλλα υπάρχει ο άξονας περιστροφής, ένα κιβώτιο ταχυτήτων και ένας δεύτερος άξονας περιστροφής υψηλότερων ταχυτήτων, συνδεδεμένος με μια γεννήτρια. Επίσης υπάρχουν μέσα συστήματα πέδησης για να μπορεί να σταματάει η ανεμογεννήτρια, σύστημα ατράκτου πλύμνης για να μεταφέρεται η κίνηση των περρυγίων στον άξονες, συστήματα στήριξης των αξόνων, συστήματα λίπανσης και διάφορα

άλλα περιφερειακά συστήματα. Ανάλυση των επιμέρους συστημάτων θα γίνει στο δεύτερο μέρος της εργασίας. Συγκεκριμένα θα γίνει ανάλυση των τεμαχίων από τα οποία αποτελείται η ανεμογεννήτρια Vestas V90 – 3.0MW που χρησιμοποιείται στο υπό μελέτη αιολικό πάρκο στον Αχλαδόκαμπο Αργολίδος.

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν επικρατήσει στην αγορά γιατί παρουσιάζουν μια σειρά πλεονεκτημάτων σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα. Το μεγαλύτερο συγκριτικό τους πλεονέκτημα είναι ότι με την μεταβολή της γωνιάς των πτερυγίων μπορεί να ρυθμιστεί η ταχύτητα περιστροφής τους άρα κατά συνέπειαν μπορεί να ρυθμιστεί και η ισχύς που δίνουν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορούν να εκμεταλλευτούν καλύτερα την ισχύ του ανέμου έστω και αν αυτός είναι χαμηλής ταχύτητας αλλά και να μπορούν να προστατευτούν από τις υψηλές ταχύτητες του ανέμου, να μην υπάρχει πολύ μεγάλη αύξηση των στροφών τους. Το δεύτερο τους πλεονέκτημα είναι η πολύ καλή γνώση της αεροδυναμικής συμπεριφοράς των πτερυγίων τους με αποτέλεσμα την βέλτιστη δυνατή λειτουργία τους σε όλες τις συνθήκες, εντός και εκτός σχεδιασμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη απόδοση των μηχανών. Εκτός αυτών υπάρχει και το πλεονέκτημα της «ώριμης» τεχνολογίας που δίνει μια ασφαλή λύση στον αγοραστή έτσι τις κάνει περισσότερο επιθυμητές στην αγορά αλλά και πιο αξιόπιστες, με λιγότερα μηχανικά προβλήματα. Τα μειονεκτήματά τους είναι περισσότερο μειονεκτήματα κατασκευαστικής φύσεως όπως για παράδειγμα η ανάγκη για υψηλούς πυλώνες μεγάλης αντοχής και η ανάγκη παρουσίας μηχανισμού για τον προσανατολισμό τους αλλά είναι πολύ μικρά σε σχέση με τα πλεονεκτήματά τους έτσι είναι πολύ δύσκολο να εκτοπιστούν στις προτιμήσεις των αγοραστών. Στην συνέχεια της εργασίας δεν θα ξαναασχοληθούμε με τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, θα μιλούμε μόνο για ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα καθώς τέτοια θα είναι και η ανεμογεννήτρια που θα χρησιμοποιήσουμε στο υπό μελέτη αιολικό πάρκο στον Αχλαδόκαμπο Αργολίδας. [4], [5], [6], [7], [14], [36], [37], [38]

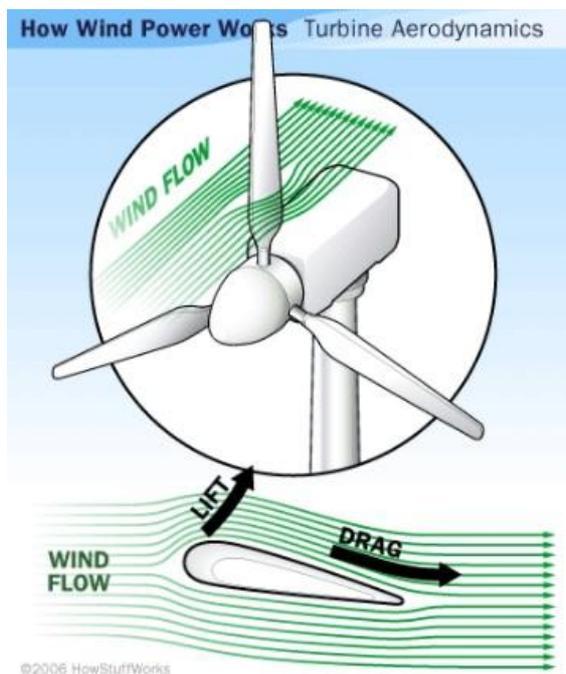
3.3 Λειτουργία ανεμογεννητριών – Παραγωγή ισχύος

Στην τρίτη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου θα ασχοληθούμε με τον τρόπο λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας. Στο πρώτο κομμάτι θα δούμε πως η κίνηση του ανέμου μετατρέπεται σε περιστροφή της ανεμογεννήτριας. Στο δεύτερο κομμάτι θα δούμε την ανάλυση της ανεμογεννήτριας ως ένα κομμάτι του ροϊκού πεδίου και τις ρευστομηχανικές εξισώσεις που το καθορίζουν. Στο τέλος θα γίνει μια μικρή περιληπτική αναφορά για την μετατροπή της

περιστροφής σε ηλεκτρική ενέργεια μέσα στην νασέλλα, πιο εξειδικευμένη αναφορά θα γίνει στο δεύτερο μέρος, ειδικά για την ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιείται στο υπό μελέτη αιολικό πάρκο.

3.3.1 Μετατροπή της ταχύτητας του ανέμου σε περιστροφή του ρότορα

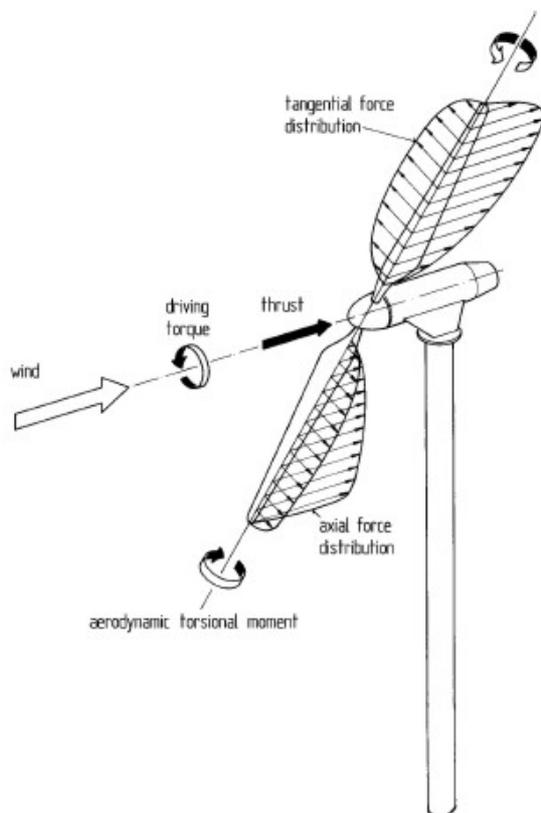
Η ανεμογεννήτρια τοποθετείται σε ένα πεδίο μέσα στο οποίο κινείται άνεμος με συγκεκριμένη διεύθυνση και ταχύτητα. Πως η κινητική ενέργεια που έχει ο άνεμος μετατρέπεται σε περιστροφή του δρομέα; Η απάντηση προέρχεται μέσα από τις αρχές της αεροδυναμικής. Καταρχήν η ανεμογεννήτρια πρέπει να είναι κάθετη στην κίνηση του ανέμου για να μπορεί να παράξει περισσότερη ενέργεια. Οι παλαιότεροι ανεμόμυλοι είχαν μεγάλες κλίσεις των πτερυγίων έτσι ένα μέρος του ανέμου στην ουσία έσπρωχνε τα πτερύγια έτσι αυτά περιστρέφονταν. Στις ανεμογεννήτριες αυτό δεν ισχύει, η κλίση των πτερυγίων είναι πολύ μικρή είναι σχεδόν κάθετα στο ροϊκό πεδίο. Πως όμως παράγεται η δύναμη που θα περιστραφούν τα πτερύγια; Η παρακάτω εικόνα θα μας βοηθήσει στην απάντηση αυτού του ερωτήματος.



Εικόνα 3.15: Κίνηση του ανέμου γύρω από το πτερύγιο μιας ανεμογεννήτριας^[36]

Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται στα πτερύγια των ανεμογεννητριών είναι ίδια με την τεχνολογία που χρησιμοποιείται στα αεροσκάφη. Ένα πτερύγιο αποτελείται από αεροτομές (μπορεί να είναι ίδιες ή διαφορετικές) στις οποίες προσπίπτει ο αέρας με μια συγκεκριμένη

γωνιά προσβολής. Η κίνηση του ανέμου πάνω σε μια αεροτομή προκαλεί δύο δυνάμεις. Η πρώτη δύναμη είναι η δύναμη της αντίστασης, προκαλείται από την ύπαρξη του περυγίου ως εμποδίου στον δρόμο του αέρα και θέλουμε να είναι όσο το δυνατό μικρότερη. Η δεύτερη δύναμη είναι η άνωση. Η δύναμη αυτή προέρχεται από την διαφορά πιέσεων στις δύο πλευρές της αεροτομής. Όπως είναι σχεδιασμένη στην εικόνα η αεροτομή μας η επάνω πλευρά έχει χαμηλότερη πίεση από την κάτω γιατί έχει μεγαλύτερη ταχύτητα (η επάνω πλευρά έχει πιο απότομη γεωμετρία έτσι προκαλεί περισσότερη επιτάχυνση στο ρευστό) με αποτέλεσμα οι δυνάμεις που πίεσης που ασκούνται από το ρευστό στην αεροτομή να έχουν μια συνιστώσα προς τα πάνω. Εάν την αεροτομή την τοποθετούσα έτσι όπως είναι σε ένα αεροπλάνο τότε θα το σήκωνε προς τα πάνω και θα πετούσε. Εάν όμως την βάλω κατακόρυφα όπως φαίνεται στην εικόνα τότε δημιουργείται μια δύναμη η οποία αναγκάζει τον ρότορα να περιστραφεί. Με αυτό τον τρόπο έχω πετύχει να έχω περιστροφική κίνηση την οποία εύκολα τώρα μπορώ να μετατρέψω σε ηλεκτρική ενέργεια με την βοήθεια μιας γεννήτριας. Οι δύο δυνάμεις που ασκούνται στα περύγια φαίνονται και στην επόμενη εικόνα.



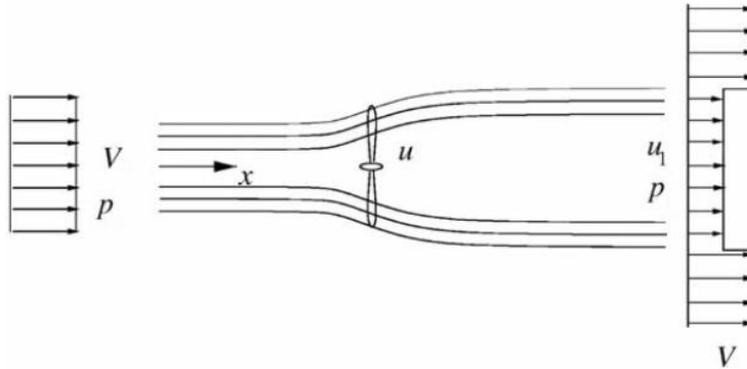
Εικόνα 3.16: Κατανομή των δυνάμεων που ασκούνται στα περύγια των ανεμογεννητριών^[5]

Το πρόβλημα που υπάρχει όμως είναι η μεταβολή στην ταχύτητα περιστροφής αναλόγως της ταχύτητας του ανέμου. Αυτό δεν μας αρέσει καθόλου γιατί θέλουμε να έχουμε συγκεκριμένη συχνότητα στον ηλεκτρισμό που παράγουμε. Με ένα κιβώτιο ταχυτήτων μπορούμε να ρυθμίσουμε μεγάλες μεταβολές της περιστροφικής ταχύτητας που προέρχονται από μεγάλες μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου αλλάζοντας σχέση. Πως όμως μπορούμε να ρυθμίσουμε την ανεμογεννήτρια μας έτσι ώστε να έχει την ίδια περιστροφική ταχύτητα σε μικρές μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου;

Η ρύθμιση μπορεί να γίνει με την μεταβολή της γωνίας προσβολής έτσι ώστε να παράγεται η ίδια δύναμη άνωσης. Η άνοση εξαρτάτε από την ταχύτητα του ρευστού άρα μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου προκαλεί μεγαλύτερη ή μικρότερη άνοση. Η άνοση όμως εξαρτάτε και από την γωνία προσβολής. Στις πλείστες απλές αεροτομές η αύξηση της γωνίας προσβολής μέχρι μια τιμή της τάξεως των $10^{\circ} - 14^{\circ}$ προκαλεί αύξηση της άνωσης. Περαιτέρω αύξηση προκαλεί αποκόλληση της ροής και σχεδόν μηδενίζεται η άνοση. Έτσι, μεταβολή της γωνίας προσβολής μπορεί να είναι ο ρυθμιστικός παράγοντας της περιστροφικής ταχύτητας του ρότορα μας. Στις περισσότερες σύγχρονες ανεμογεννήτριες υπάρχει η δυνατότητα να μεταβληθεί, είτε αυτόματα είτε από ένα χειριστή που παρακολουθεί την ταχύτητα του ανέμου. Αυτό δίνει το πλεονέκτημα της βέλτιστης απόδοσης σε περισσότερες από μια ταχύτητες ανέμου. Για τον ίδιο σκοπό μπορεί να χρησιμοποιηθούν και διάφοροι άλλοι μηχανισμοί, που προέρχονται από την αεροναυτική όπως για παράδειγμα αερόφρενα και spoilers για να μειωθεί η περιστροφική ταχύτητα ή και να σταματήσει τελείως ή vortex generators για πιο γρήγορη μετάβαση σε τυρβώδη ροή έτσι ώστε να μειωθούν οι πιθανότητες για αποκόλληση της ροής και απώλεια στήριξης του πτερυγίου.

3.3.2 Η ανεμογεννήτρια ως μέρος ενός ροϊκού πεδίου – Η μονοδιάστατη θεωρία της συνέχειας για ιδανική ανεμογεννήτρια

Αφού είδαμε τον τρόπο με τον οποίο κινείται η ανεμογεννήτρια τώρα θα δούμε, με βάση την απλουστευμένη θεωρία της συνέχειας μόνο στην κατεύθυνση ροής του ανέμου, την ισχύ που μπορούμε να πάρουμε από άνεμο συγκεκριμένης ταχύτητας. Την ανεμογεννήτρια μας την θεωρούμε ιδανική έτσι έχουμε μηδενικές απώλειες. Έστω ότι έχουμε την ανεμογεννήτρια μας τοποθετημένη μέσα σε ένα μονοδιάστατο ροϊκό πεδίο ανέμου όπως αυτό της επόμενης εικόνας.



Εικόνα 3.17: Ροϊκό πεδίο γύρω από ανεμογεννήτρια^[10]

Στο ροϊκό μας πεδίο εισέρχεται άνεμος ταχύτητας V [m/s] και πίεσης p [Pa]. Συναντάει την ανεμογεννήτρια στην πορεία του, αφήνει ένα μέρος της κινητικής του ενέργειας και αποκτάει ταχύτητα u [m/s] ενώ έχει πλέον μειωμένη πίεση. Στην συνέχεια φτάνει σε μια απόσταση μακριά από την ανεμογεννήτρια, ανακτά πλήρως την πίεση του και αποκτάει μια ταχύτητα u_1 [m/s]. Το πεδίο θεωρείται ιδανικό έτσι δεν υπάρχουν ούτε απώλειες τριβής στην ανεμογεννήτρια ούτε απώλειες ανάμιξης στον απόρροου και όλη η μάζα του αέρα διαπερνά την ανεμογεννήτρια και δεν διαφεύγει από το πλευρό. Η επιφάνεια της ανεμογεννήτριας είναι ίση με S [m²] ενώ ο αέρας είναι πυκνότητας ρ [kg/m³]. Η επιφάνεια εισόδου του πεδίου είναι ίση με S_1 [m²] ενώ η επιφάνεια εξόδου είναι ίση με S_2 [m²]. Η περιστροφή της ανεμογεννήτριας εκφράζεται με την βοήθεια μιας μηχανικής ισχύος P_m [W]. Στο δεύτερο κεφάλαιο είχαμε ασχοληθεί εκτεταμένα με τον άνεμο και είδαμε ότι η ισχύς του δίνεται από μια σχέση ανάλογη της επιφάνειας και της ταχύτητας του ανέμου. Έτσι στην είσοδο και την έξοδο του πεδίου η ισχύς του ανέμου δίδεται από τις ακόλουθες σχέσεις.

$$P_{W_{in}} = \frac{1}{2} \rho S_1 V^3 \quad [W]$$

$$P_{W_{out}} = \frac{1}{2} \rho S_2 u_1^3 \quad [W]$$

Αφού το πεδίο μας είναι ιδανικό και δεν υπάρχουν καθόλου απώλειες τότε η διαφορά της ισχύος πριν και μετά την ανεμογεννήτρια πρέπει να ισούτε με την μηχανική ισχύ που παράγεται.

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S_1 V^3 - \frac{1}{2} \rho S_2 u_1^3 = \frac{1}{2} \rho (S_1 V^3 - S_2 u_1^3) \quad [W]$$

Έχουμε αναφέρει ήδη ότι με τον όρο ιδανικό πεδίο δεν υπάρχει διαφυγή μάζας έτσι ισχύει η εξίσωση της συνέχειας.

$$\dot{m} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \Rightarrow \rho S_1 V = \rho S_2 u_1 \quad [kg/s]$$

Αυτό έχει ως συνέπεια η εξίσωση που εκφράζει την μηχανική ισχύ να πάρει την ακόλουθη μορφή.

$$P_m = \frac{1}{2} \dot{m} (V^2 - u_1^2) \quad [W]$$

Από αυτή την εξίσωση παρατηρούμε τό εξής παράδοξο. Η μέγιστη μηχανική ισχύς παράγεται όταν μηδενιστεί η ταχύτητα του αέρα στην έξοδο. Αυτό δημιουργεί ένα πρόβλημα, όταν σταματήσεις τον αέρα δεν μπορεί να έρθει να περάσει άλλος έτσι μηδενίζεται και η ταχύτητα εισόδου. Εάν σταματήσει η ταχύτητα εισόδου του αέρα τότε θα έχω μηδενική παραγωγή ισχύος. Το παράδοξο ωφείλεται στην υπεραπλούστευση του πεδίου. Εμείς ψάχνουμε να βρούμε ένα λόγο μεταξύ των ταχυτήτων εξόδου και εισόδου που θα μας δίδει την βέλτιστη μηχανική ισχύ. Θα χρησιμοποιήσουμε δύο αρχές της φυσικής, την αρχή διατήρησης της ορμής και την δράση αντίδραση. Με βάση την αρχή διατήρησης της ορμής στο πεδίο μας ισχύει η παρακάτω εξίσωση.

$$F = \dot{m}(V - u_1) \quad [N]$$

Από την στιγμή που ο αέρας κατά την κίνηση του γύρω από τα πτερύγια τους ασκεί την δύναμη της άνωσης τότε και με βάση την αρχή της δράσης αντίδρασης ασκείται και σε αυτόν μια ίση και αντίθετη δύναμη η οποία μπορεί να προσδιοριστεί από την επόμενη εξίσωση.

$$P_m = Fu = \dot{m}u(V - u_1) \quad [W]$$

Στην συνέχεια ακολουθούν μια σειρά από πράξεις με σκοπό να καταλήξω στον υπολογισμό της μηχανικής ισχύος με μια σωστή εξίσωση. Καταρχήν εξισώνω τα δεξιά μέλη των

δύο εξισώσεις που εκφράζουν την μηχανική ισχύ και υπολογίζω την ταχύτητα u αμέσως μετά την ανεμογεννήτρια. Στην συνέχεια την αντικαθιστώ στην πιο πάνω έκφραση και πέρνω την μηχανική ισχύ. Οι πράξεις αυτές φαίνονται παρακάτω.

$$\frac{1}{2} \dot{m}(V^2 - u_1^2) = \dot{m}u(V - u_1) \Rightarrow \frac{1}{2} \dot{m}(V - u_1)(V + u_1) = \dot{m}u(V - u_1) \Rightarrow u = \frac{1}{2}(V + u_1)$$

$$\dot{m} = \rho S u = \frac{1}{2} \rho S (V + u_1)$$

$$\Rightarrow P_m = \frac{1}{4} \rho S (V^2 - u_1^2) (V + u_1)$$

Αυτή είναι η ισχύς που μπορεί να παράξει μια συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια εάν συναντήσει αέρα μιας συγκεκριμένης ταχύτητας. Από αυτή τον λόγο της μηχανικής ισχύος προς την ισχύ του ανέμου προκύπτει ένα πολύ σημαντικό μέγεθος που χαρακτηρίζει κάθε ανεμογεννήτρια και είναι ο συντελεστής ισχύος C_P . Δίδεται από την παρακάτω εξίσωση.

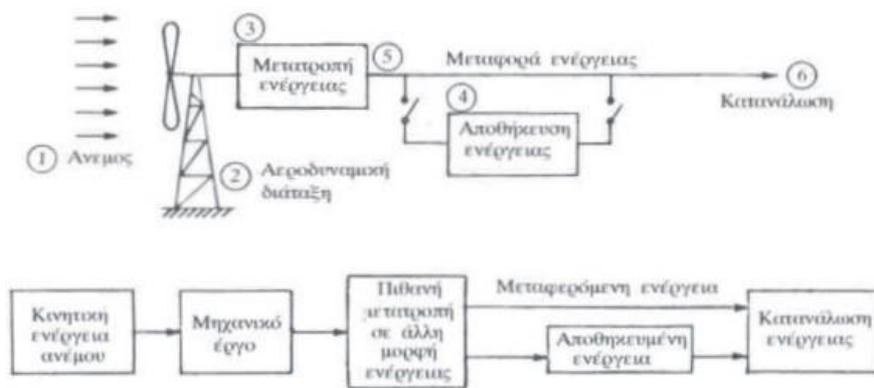
$$C_P = \frac{P_m}{P_w} = \frac{\frac{1}{4} \rho S (V^2 - u_1^2) (V + u_1)}{\frac{1}{2} \rho S V^3}$$

Το μέγεθος αυτό είναι πολύ σημαντικό, χαρακτηρίζει κάθε ανεμογεννήτρια και θα το δούμε αναλυτικότερα σε επόμενη ενότητα αυτού του κεφαλαίου. Ως επίλογο της ενότητας αυτής μπορούμε να αναφέρουμε ότι έχουμε καταφέρει να δούμε πόση μηχανική ισχύ μπορούμε να πάρουμε από τον άνεμο σε κάποια ταχύτητα. Γνωρίζοντας την μηχανική ισχύ που έχουμε στον άξονα μας τότε μπορούμε να κάνουμε ένα βήμα παρακάτω και να προβλέψουμε την ηλεκτρική ενέργεια που θα παράγει η ανεμογεννήτρια μας καθώς πλέον μπορούμε να υπολογίσουμε τις στροφές της ατράκτου.

3.3.3 Παραγωγή ισχύος

Στην ενότητα αυτή θα γίνει μια περιληπτική αναφορά στην διαδικασία της ηλεκτροπαραγωγής μέσω ανεμογεννητριών. Η διαδικασία αυτή μπορεί να χωριστεί σε κάποιες επιμέρους διαδικασίες. Το πρώτο που έχουμε είναι ο άνεμος και η κινητική του ενέργεια. Με την

βοήθεια μιας αεροδυναμικής διάταξης παραλαμβάνουμε μηχανικό έργο έτσι όπως το αναλύσαμε στις προηγούμενες ενότητες. Με την βοήθεια όλων των άλλων εξαρτημάτων που υπάρχουν μέσα στην νασέλλα το έργο αυτό μετατρέπεται σε ηλεκτρικό ρεύμα. Στην συνέχεια το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται είτε αποθηκεύεται έτσι ώστε να είναι έτοιμο για κατανάλωση. Για την μεταφορά του ρεύματος χρειάζεται να ανέβει η τάση έτσι υπάρχει ένας μετασχηματιστής κάτω από την ανεμογεννήτρια ο οποίος παραλαμβάνει το ρεύμα που δίνει η γεννήτρια και το ανυψώνει σε μια νέα τάση έτσι ώστε να μεταφερθεί χωρίς απώλειες. Όλη αυτή η διαδικασία παρατίθεται διαγραμματικά στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 3.18: Διάταξη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση ανεμογεννήτριας^[43]

Περισσότερες λεπτομέρειες δεν θα αναλυθούν εδώ. Για τον άνεμο έχει γίνει εκτενής αναφορά στο δεύτερο κεφάλαιο ενώ η αεροδυναμική διάταξη και ο τρόπος που μετατρέπει την ενέργεια του ανέμου σε μηχανικό έργο συζητήθηκαν σε προηγούμενες ενότητες του παρόντος κεφαλαίου. Οι διεργασίες μετατροπής της περιστροφικής ενέργειας σε ηλεκτρικό ρεύμα θα αναλύθούν στο τέταρτο κεφάλαιο για την ανεμογεννήτρια Vestas V90. Η αποθήκευση και η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας είναι θέματα τα οποία ξεφεύγουν του σκοπού της παρούσας εργασίας.^{[5], [10], [35], [43]}

3.4 Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών

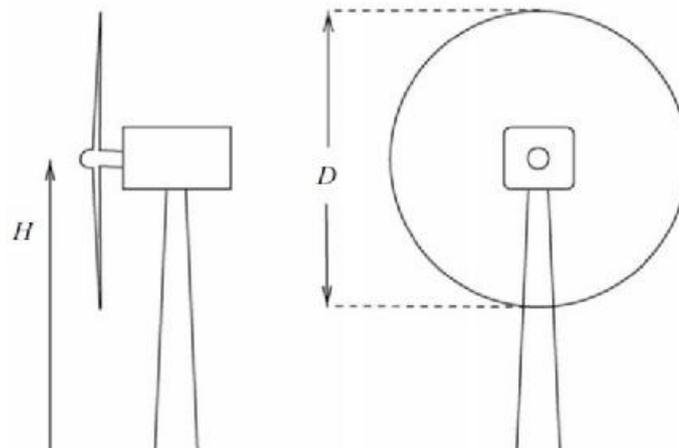
Μετά από την λειτουργία των ανεμογεννητριών θα δούμε τα βασικά χαρακτηριστικά τους. Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούμε σε αυτά και θα δούμε πως επηρεάζουν την ικανότητα παραγωγής ισχύος της ανεμογεννήτριας.

Όπως είδαμε στο δεύτερο κεφάλαιο ένα σημαντικό μέρος του αιολικού δυναμικού μπορεί να αξιοποιηθεί για ηλεκτροπαραγωγή. Για να αξιοποιηθεί αυτό το δυναμικό κατά τον

βέλτιστο τρόπο απαιτείται η σωστή επιλογή ανεμογεννήτριας. Στην αγορά υπάρχουν πολλοί τύποι ανεμογεννητριών, ποια θα επιλεγθεί για μια συγκεκριμένη τοποθεσία; Η τοποθέτηση αυτή θα γίνει με κριτήριο το μέγιστο οικονομικό κέρδος. Για να βρούμε την βέλτιστη ανεμογεννήτρια χρειάζεται να έχουμε γνώση των τεχνικών χαρακτηριστικών της και πως αυτά επηρεάζουν την απόδοση της. Τεχνικά χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν είναι οι διαστάσεις της ανεμογεννήτριας δηλαδή το ύψος και η διάμετρος του ρότορα της, και ο συντελεστής και η καμπύλη ισχύος που θα καθορίσουν εν τέλει και την απόδοση της.

3.4.1 Ύψος ανεμογεννήτριας και διάμετρος ρότορα

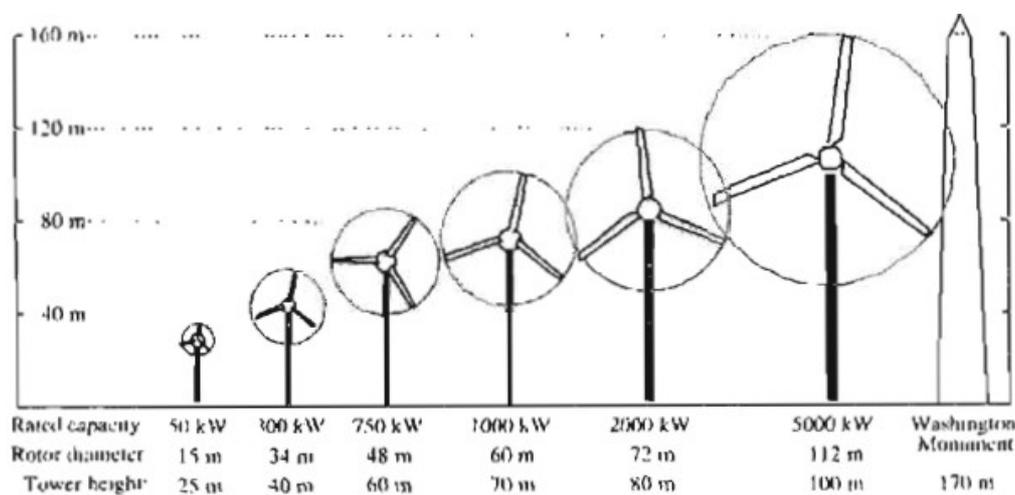
Το ύψος και η διάμετρος είναι δύο πολύ σημαντικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την απόδοση μιας ανεμογεννήτριας. Καταρχήν πρέπει να ορίσουμε τι εννοούμε ύψος ανεμογεννήτριας και τι εννοούμε διάμετρο ρότορα. Με τον όρο ύψος ανεμογεννήτριας εννοούμε την απόσταση μεταξύ του εδάφους και της κεφαλής της ανεμογεννήτριας, στο σημείο που ο ρότορας ενώνεται με τον άξονα περιστροφής. Με τον όρο διάμετρος του ρότορα εννοούμε την διάμετρο του κύκλου που διαγράφουν τα άκρα των περυγίων της ανεμογεννήτριας. Για καλύτερη κατανόηση παρατίθεται η παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 3.19: Σχεδιάγραμμα το οποίο απεικονίζει το ύψος της ανεμογεννήτριας (αριστερά) και την διάμετρο του ρότορα της (δεξιά)^[10]

Στο δεύτερο κεφάλαιο, στην ανάλυση του προφίλ του ανέμου καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι όσο πιο ψηλά από την επιφάνεια της γης βρισκόμαστε τότε τόσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου και η διεύθυνση του δεν έχει πολλές διακυμάνσεις με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερο τεχνικά αξιοποιήσιμο δυναμικό. Από αυτό είναι φανερό ότι όσο

ψηλότερα τοποθετήσουμε την ανεμογεννήτρια μας τότε μπορούμε να παράξουμε με αυτή περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια, θα έχουμε αυξημένη ισχύ. Αυτό είναι το κυριότερο κέρδος που έχουμε από τις ψηλές ανεμογεννήτριες. Υπάρχει όμως ακόμη ένας δευτερεύον παράγοντας ο οποίος αυξάνει και άλλο το κέρδος. Όσο πιο ψηλά τοποθετημένη είναι μια ανεμογεννήτρια τότε υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης πτερωτών μεγαλύτερων διαμέτρων, αυξάνουμε την διάμετρο του ρότορα. Η επίδραση της αύξησης της διαμέτρου του ρότορα ακολουθεί στην επόμενη παράγραφο. Η αύξηση του ύψους όμως δημιουργεί προβλήματα στήριξης καθώς οι πυλώνες πρέπει να είναι αρκετά ισχυρότεροι ώστε να συγκρατήσουν την μηχανή σε μεγαλύτερες ταχύτητες αέρα χωρίς να παρουσιάζοντε ταλαντώσεις. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η διαφορά στην ισχύ που παράγει κάθε ανεμογεννήτρια αναλόγως του ύψους της.



Εικόνα 3.20: Μεταβολή της ισχύος της ανεμογεννήτριας αναλόγως του ύψους και της διαμέτρου του ρότορα^[9]

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα η ισχύς αυξάνεται και όσο αυξάνεται η διάμετρος του ρότορα. Ο λόγος που έχουμε αυτή την αύξηση είναι ότι με μεγαλύτερη διάμετρο του ρότορα αυξάνεται το εμβαδόν της επιφάνειας την οποία μπορεί να εκμεταλλευτεί η ανεμογεννήτρια άρα αυξάνεται η ισχύς του ανέμου που μπορεί να μετατρέψει σε ηλεκτρική ισχύ. Είδαμε στο δεύτερο κεφάλαιο ότι το τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό από μια ανεμογεννήτρια είναι ανάλογο της ταχύτητας του ανέμου που περνάει από μια συγκεκριμένη επιφάνεια (δινόταν από μια σχέση που περιείχε το ολοκλήρωμα της ισχύος η οποία εξαρτάτε από την επιφάνεια και τον κύβο της ταχύτητας του ανέμου) άρα αν αυξηθεί αυτή η επιφάνεια θα αυξηθεί και το τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό. Το πρόβλημα που υπάρχει όμως είναι το αυξημένο βάρος των πτερυγίων έτσι απαιτείται ισχυρότερος πυλώνας στήριξης αλλά και

μεγαλύτερες ταχύτητες αέρα για να υπάρξει η βέλτιστη απόδοση. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η αύξηση της ισχύος με την αύξηση της διαμέτρου του ρότορα.

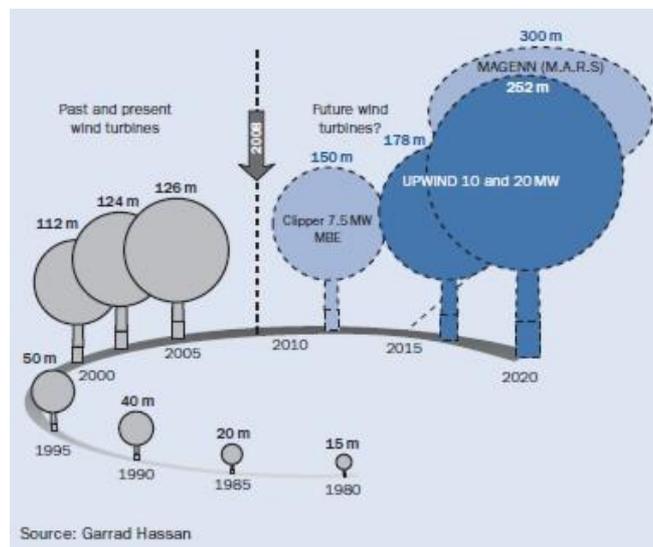
Table I.3.1: Design choices of leading manufacturers

		Share (%)	Model	Drive train	Power rating (kW)	Diameter (m)	Tip speed (m/s)	Power conversion
1	Vestas	22.8	V90	Geared	3000	90	87	Asynchronous
2	GE Energy	16.6	2.5XL	Geared	2500	100	86	PMG converter
3	Gamesa	15.4	G90	Geared	2000	90	90	DFIG
4	Enercon	14.0	E82	Direct	2000	82	84	Synchronous
5	Suzlon	10.5	S88	Geared	2100	88	71	Asynchronous
6	Siemens	7.1	3.6 SWT	Geared	3600	107	73	Asynchronous
7	Acciona	4.4	AW-119/3000	Geared	3000	116	74.7	DFIG
8	Goldwind	4.2	REpower750	Geared	750	48	58	Induction
9	Nordex	3.4	N100	Geared	2500	99.8	78	DFIG
10	Sinovel	3.4	1500 (Windtec)	Geared	1500	70		

Source: Garrad Hassan

Εικόνα 3.21: Μεταβολή της ισχύος αναλόγως της διαμέτρου αλλά και άλλων σχεδιαστικών επιλογών για 10 ανεμογεννήτριες από κορυφαίους σχεδιαστές^[11]

Εν κατακλείδει μπορεί να θεωρηθεί ότι όσο μεγαλύτερο ύψος και διάμετρο έχει μια ανεμογεννήτρια είναι πιο σύγχρονη, πιο προηγμένη τεχνολογικά. Μέχρι το 2020 αναμένεται να κατασκευαστούν ανεμογεννήτριες ισχύος 20 MW με διαμέτρους έως και 300 μέτρα. Η τεχνολογική εξέλιξη στην πορεία του χρόνου παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 3.22: Μεταβολή της διαμέτρου των ανεμογεννητριών με την πορεία των ετών^[11]

3.4.2 Συντελεστής ισχύος C_P

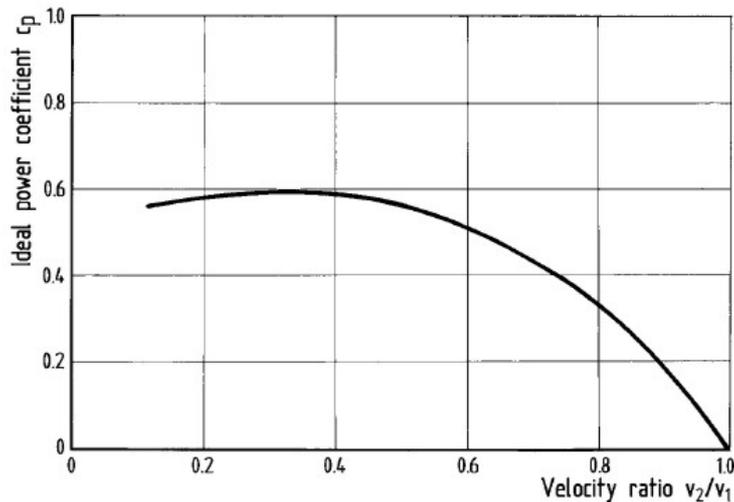
Ο συντελεστής ισχύος είναι το δεύτερο βασικό χαρακτηριστικό των ανεμογεννητριών μετά από τις διαστάσεις τους. Εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας του ανέμου που μπορούν να μετατρέψουν σε μηχανικό έργο. Σε προηγούμενη ενότητα έχουμε βρει την σχέση με την οποία υπολογίζεται ο συντελεστής ισχύος και είναι η ακόλουθη.

$$C_P = \frac{P_m}{P_w} = \frac{\frac{1}{4}\rho S(V^2 - u_1^2)(V + u_1)}{\frac{1}{2}\rho S V^3}$$

Ακολουθώς θα μετατρέψουμε λίγο την σχέση σε μια άλλη μορφή και θα την παραγωγίσουμε για να μπορέσουμε να δούμε αν υπάρχουν τοπικά μέγιστα ή ελάχιστα.

$$C_P = \frac{P_m}{P_w} = \frac{1}{2} \left| 1 - \left(\frac{u_1}{V} \right)^2 \right| \left| 1 + \frac{u_1}{V} \right|$$

Η εξίσωση αυτή παρουσιάζει για ένα λόγο ταχυτήτων ίσο με 1/3 ένα τοπικό μέγιστο, ίσο με 16/27. Εάν την παραστήσουμε γραφικά βλέπουμε επίσης αυτό το πράγμα.

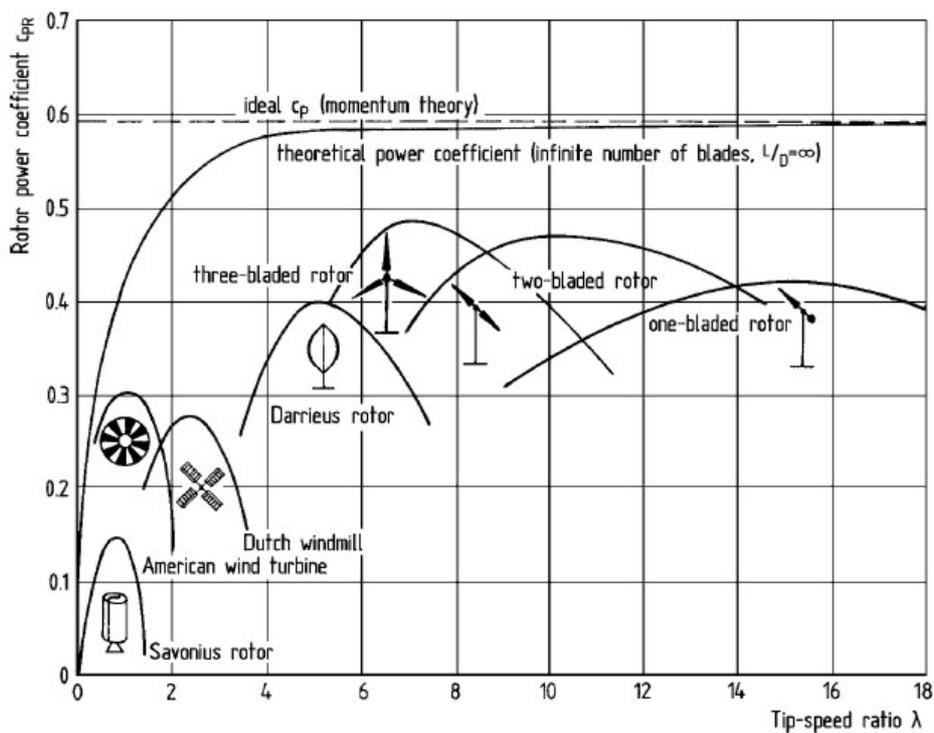


Εικόνα 3.23: Σχηματική απεικόνιση της συναρτήσεως υπολογισμού του συντελεστή ισχύος^[5]

$$\frac{u_1}{V} = \frac{1}{3} \Rightarrow C_P = \frac{16}{27} = 0,593$$

Η τιμή αυτή ονομάζεται και όριο του Betz καθώς ήταν ο πρώτος που το ανακάλυψε. Άρα καμιά ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να έχει συντελεστή ισχύος πάνω από αυτή την τιμή, θέλουμε όμως να την πλησιάζει όσο το δυνατό περισσότερο. Η τιμή αυτή έχει προκύψει από την ιδανική ανάλυση του ροϊκού πεδίου γύρω από την ανεμογεννήτρια. Στην πραγματικότητα απώλειες που υπάρχουν όπως οι τριβές και οι στροβιλισμοί του αέρα μειώνουν και άλλο τον συντελεστή ισχύος, φτάνουμε σε τιμές της τάξεως του 0,46 με 0,47.

Ο συντελεστής ισχύος διαφέρει για κάθε τύπο ανεμογεννήτριας, εξαρτάται από την παράμετρο περιστροφής λ (την είδαμε στο πρώτο μέρος αυτού του κεφαλαίου). Η παράμετρος περιστροφής έχει άμεση σχέση με τον σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας καθώς εξαρτάτε άμεσα από την ακτίνα των περυγίων. Αυτή η εξάρτηση έχει παρασταθεί σε ένα πολύ χρήσιμο διάγραμμα που παρουσιάζει ο Hau^[5]. Το διάγραμμα παρατίθεται παρακάτω.

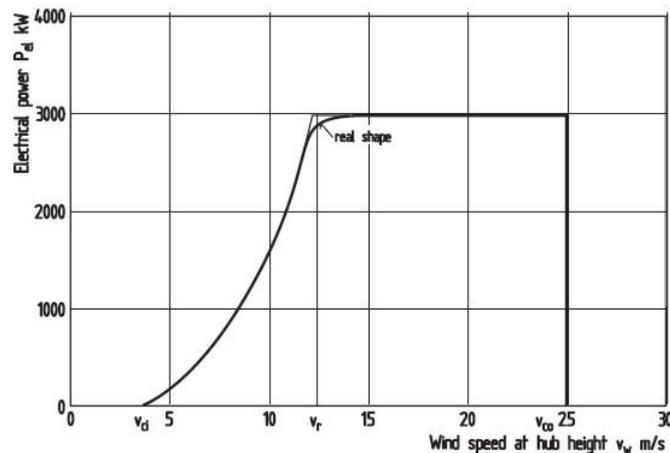


Εικόνα 3.24: Μεταβολή του συντελεστή ισχύος αναλόγως του τύπου της ανεμογεννήτριας^[5]

Όπως φαίνεται από το σχεδιάγραμμα όλες οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται για ηλεκτροπαραγωγή (διπτέρυγες, τριπτέρυγες και Darrius) έχουν αρκετά μεγάλο συντελεστή ισχύος, από 0,4 έως 0,48 έτσι μετατρέπουν όσο το δυνατό περισσότερη αιολική ενέργεια σε μηχανικό έργο.

3.4.3 Καμπύλη ισχύος

Ένα τρίτο σημαντικό χαρακτηριστικό μιας ανεμογεννήτριας είναι η καμπύλη ισχύος. Είναι ένα διάγραμμα το οποίο παρέχει ο κατασκευαστής στους αγοραστές του και δείχνει την αποδιδόμενη ισχύ από την ανεμογεννήτρια αναλόγως της ταχύτητας του ανέμου. Η ισχύς που δίνει αυτό το διάγραμμα είναι η ηλεκτρική ισχύς που θα δώσει η ανεμογεννήτρια στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται αυτή η καμπύλη.



Εικόνα 3.25: Καμπύλη ισχύος μιας πειραματικής ανεμογεννήτριας Growian^[5]

Αυτή η καμπύλη είναι πολύ σημαντική για τον αγοραστή που θέλει να επενδύσει σε ανεμογεννήτριες έτσι ώστε να αποκομίσει το μέγιστο κέρδος γιατί του δίνει τρεις χαρακτηριστικές ταχύτητες του ανέμου. Η πρώτη είναι η V_d ή V_{min} , είναι η ταχύτητα έναρξης (cut – in speed), είναι η ελάχιστη ταχύτητα ανέμου για την οποία η ανεμογεννήτρια μας λειτουργεί και παράγει έστω και ένα μικρό ποσό ηλεκτρικής ισχύος. Η δεύτερη είναι η V_r , είναι η ονομαστική ταχύτητα (rated speed), είναι η ελάχιστη ταχύτητα ανέμου για την οποία η ισχύς που παράγεται από την ανεμογεννήτρια είναι ίση με την ονομαστική ισχύ. Η τρίτη είναι η V_{co} ή V_{max} , είναι η μέγιστη ταχύτητα ανέμου (cut – out speed) για την οποία η μηχανή μας λειτουργεί με ασφάλεια. Αν ο άνεμος ξεπεράσει αυτή την ταχύτητα τότε πρέπει να σταματήσει η λειτουργία της ανεμογεννήτριας μας. Ένας επενδυτής, γνωρίζοντας τα χαρακτηριστικά του ανέμου στην περιοχή που θα τοποθετήσει τις ανεμογεννήτριες πρέπει να επιλέξει την ανεμογεννήτρια με την οποία θα λειτουργεί τον περισσότερο καιρό στην ονομαστική της ισχύ. Με αυτό τον τρόπο θα πετύχει και τον βέλτιστο συντελεστή εκμετάλλευσης f (είναι ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που πέρνουμε από την ανεμογεννήτρια μας προς την ονομαστική της ισχύ) έτσι θα θεωρηθεί επιτυχημένη η επένδυση.^{[4], [5], [9], [10], [11]}

ΜΕΡΟΣ Β: ΑΙΟΛΙΚΟ ΠΑΡΚΟ ΣΤΟΝ ΑΧΛΑΔΟΚΑΜΠΟ ΑΡΓΟΛΙΔΟΣ

Στο πρώτο μέρος της εργασίας μας ασχοληθήκαμε γενικά με το ενεργειακό πρόβλημα, με την πηγή ενέργειας που ονομάζεται άνεμος και με τις ανεμογεννήτριες. Έγινε μια γενική αναφορά στην αιολική ενέργεια και παρουσιάστηκαν όσα μπορούσαν να παρουσιαστούν σε μια τέτοια εργασία έτσι ώστε να μπορούν να επεξηγηθούν κατά τον καλύτερο τρόπο οι επιλογές για το υπό μελέτη αιολικό πάρκο.

Στο δεύτερο μέρος θα ασχοληθούμε αποκλειστικά με το αιολικό πάρκο. Στην αρχή, στο τέταρτο κεφάλαιο, θα παρουσιαστεί η ανεμογεννήτρια Vestas V90 που επιλέχθηκε για αυτό το έργο. Θα παρουσιαστεί η κατασκευή της, η λειτουργία της, η απόδοση της και θα επιχειρηθεί μια ανάλυση των αιτιών που προκάλεσαν την συγκεκριμένη επιλογή. Στο πέμπτο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με το αιολικό πάρκο ως ολοκληρωμένο έργο. Θα παρουσιαστούν πρώτα μερικά στοιχεία για την περιοχή κατασκευής τους αιολικού πάρκου και στην συνέχεια θα γίνει προσπάθεια να ερμηνευτεί η χωροθέτηση του πάρκου στην συγκεκριμένη τοποθεσία με βάση όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την λήψη της απόφασης.

Κεφάλαιο 4

4 Η ανεμογεννήτρια Vestas V90 – 3MW

4.1 Η εταιρία Vestas

Η εταιρία Vestas εμφανίστηκε το 1898 όταν ο H. S. Hansen κατασκευάζει ένα εργαστήριο παρασκευής μεταλλικών παραθύρων για βιομηχανικά κτίρια στην Δανία, σε μια μικρή πόλη με το όνομα Lem. Το 1945 ο γιος του, P. Hansen ίδρυσε μια εταιρία με την ονομασία VEstjyskSTåltechnik A/S (West – Jutlandish steel technology) η οποία σε συντομογραφία γραφόταν Vestas. Στην αρχή ήταν μια εταιρία παρασκευής οικιακών εφαρμογών με έμφαση στον γεωργικό εξοπλισμό το 1950. Στην συνέχεια ειδικεύτηκε στις κατασκευές υδραυλικών γερανών το 1968. Στην βιομηχανία των ανεμογεννητριών εισήλθε το 1979 αφού η πετρελαϊκή κρίση οδήγησε τους ιδιοκτήτες της να εξετάσουν το ενδεχόμενο παραγωγής ηλεκτρισμού από τον άνεμο. Η κίνηση αυτή σηματοδότησε την πορεία της εταιρίας αφού κατάφερε να την κάνει αναγνωρίσιμη ανά το παγκόσμιο. Το 2003 η εταιρία συγχωνεύεται με την επίσης Δανική εταιρία κατασκευής ανεμογεννητριών NEG Micon δημιουργώντας την μεγαλύτερη εταιρία παραγωγής ανεμογεννητριών στον κόσμο, με την ονομασία Vestas Wind Systems. Η εταιρία αυτή το 2006 κατείχε το 28% της παγκόσμιας αγοράς. Το 2009 το ποσοστό αυτό μειώθηκε στο 12,5% λόγω της αύξησης των ανταγωνιστών της αλλά εξακολουθούσε να έχει το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς.



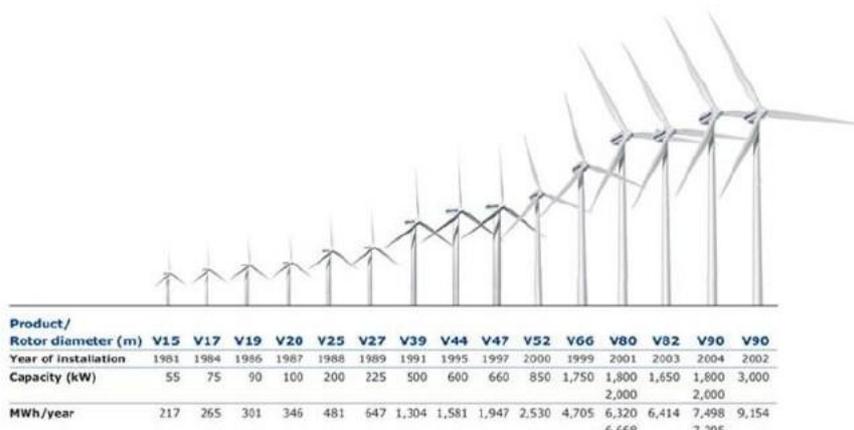
Εικόνα 4.1: Το λογότυπο της εταιρίας^[44]

Η εταιρία Vestas έχει το αρχηγείο της στην πόλη Randers της Δανίας ενώ έχει επεκταθεί και στην βόρειο Αμερική ιδρύοντας κατασκευαστική μονάδα στο Κολοράντο και ανοίγοντας κεντρικά γραφεία στο Πόρτλαντ. Το 2010 και ένεκα της οικονομικής κρίσης που πλήττει την Ευρώπη αναγκάζεται να κλείσει τα εργοστάσια της στις Σκανδιναβικές χώρες (Δανία και Σουηδία) και να απολύσει 3000 εργαζόμενους. Παρόλα αυτά, τον Σεπτέμβριο του 2010

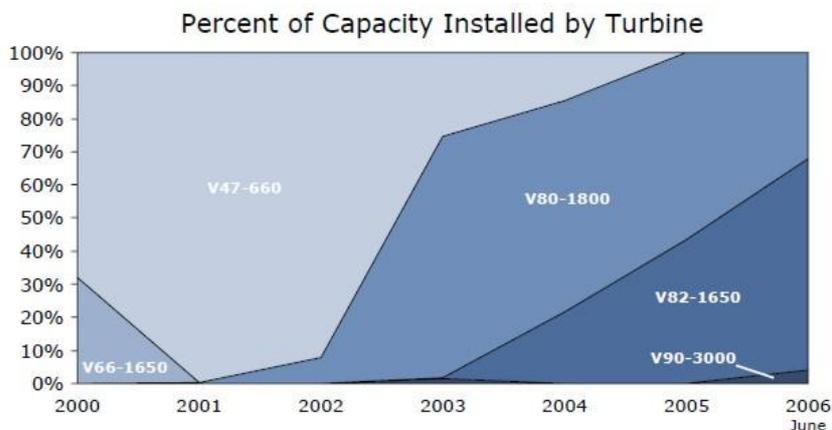
απασχολεί περισσότερους από 23000 εργαζόμενους και έχει εργοστάσια παραγωγής σε 12 χώρες.

4.1.1 Η Vestas στον κόσμο

Η εταιρία Vestas έχει περισσότερες από 41000 ανεμογεννήτριες, εγκατεστημένες σε 65 χώρες ανά την υφήλιο. Ήδη έχει παρουσιάσει 17 μοντέλα ανεμογεννητριών με πιο πρόσφατο το V112 έτσι ώστε να μπορεί να ικανοποιήσει όσο το δυνατό περισσότερους πελάτες. Ειδικά το μοντέλο της V90 που παρουσιάστηκε το 2002 αποτελεί μια από τις αγαπημένες ανεμογεννήτριες των επενδυτών στον άνεμο τα τελευταία χρόνια. Στις επόμενες εικόνες φαίνεται η εξέλιξη των μοντέλων της Vestas και η προτίμηση σε συγκεκριμένα μοντέλα. Τα γραφήματα είναι του 2006 για αυτό και απουσιάζουν τα δύο τελευταία μοντέλα V100 και V112 και δεν φαίνεται η μεγάλη ζήτηση για την V90.



Εικόνα 4.2: Εξέλιξη ανεμογεννητριών της εταιρίας Vestas στην πορεία των ετών^[16]



Εικόνα 4.3: Εγκατεστημένη ισχύς ανά μοντέλο της εταιρίας Vestas^[16]

4.1.2 Η Vestas στην Ελλάδα

Στον ελληνικό χώρο τα πράγματα είναι πολύ καλύτερα για την Vestas. Καταρχήν η δέσμευση της Ελλάδας για να παράγει από ΑΠΕ το 20% της ηλεκτρικής της ενέργειας έως το 2020 αυξάνει κατά πολύ τις προοπτικές επενδύσεων στις ανεμογεννήτριες. Την τετραετία 2006 – 2009 κατασκευάστηκαν 40 αιολικά πάρκα και χρησιμοποιήθηκαν σε αυτά 357 ανεμογεννήτριες διπλασιάζοντας έτσι την εγκατεστημένη ισχύ σε ανεμογεννήτριες της χώρας μας. Από αυτές τις ανεμογεννήτριες οι 142 δηλαδή ένα ποσοστό που προσεγγίζει το 40% είναι της εταιρίας Vestas. Μάλιστα οι 60 από αυτές είναι μοντέλα V90. Αυτό μοιραία οδηγεί την Vestas στην πρώτη θέση εγκατεστημένης ισχύος στην χώρα μας. Αυτό φαίνεται και στον επόμενο πίνακα.

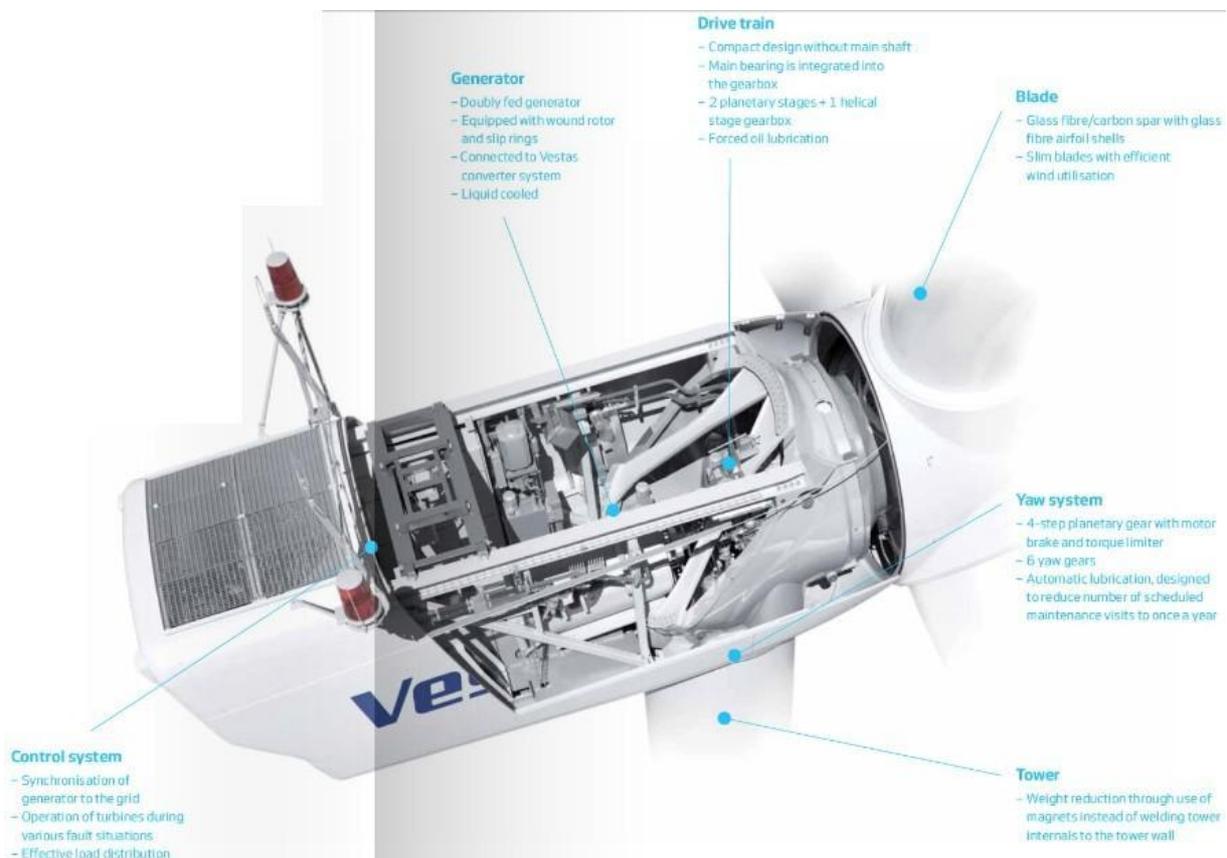
ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΗΣ	ΙΣΧΥΣ (MW)	Αριθμ. Α/Γ	%
VESTAS	420,37	310	38,7%
NEG Micon (VESTAS)	117,28	149	10,8%
ENERCON	238,04	266	21,9%
BONUS	196,60	264	18,1%
NORDEX	28,50	45	2,6%
ZOND	18,53	40	1,7%
GAMESA	31,45	37	2,9%
JACOBS	12,00	20	1,1%
HMZ WINDMASTER	10,80	36	1,0%
NEDWIND	5,00	10	0,5%
EAB WINDMATIC	3,92	50	0,4%
NORDTANK	1,25	5	0,1%
TACKE	1,50	3	0,1%
OA	1,10	2	0,1%
WINCON	0,65	6	0,1%
MICON	0,63	2	0,1%
ΣΥΝΟΛΟ	1087,61	1245	100%

Εικόνα 4.4: Κατασκευάστριες ανεμογεννητριών που δραστηριοποιούνται στον ελληνικό χώρο^[46]

Παρατηρούμε ότι η Vestas έχει περί το 40% της εγκατεστημένης ισχύος έως το 2009 στην χώρα μας ενώ αν προστεθεί και το ποσοστό της NEG Micon με την οποία έχει συγχωνευτεί τότε παρατηρούμε ότι το ποσοστό αυτό προσεγγίζει το 50%. Η αύξηση του ποσοστού αυτού κατά πολύ ωφείλεται στην γαλλική εταιρία κατασκευής αιολικών πάρκων EDF που σε όσα έργα ανέλαβε την τετραετία 2006 – 2009 εγκατέστησε ανεμογεννήτριες Vestas V90.^{[16], [44], [45], [46]}

4.2 Τεχνικά δεδομένα – Κατασκευαστικά στοιχεία

Εδώ θα παρουσιαστούν όλα τα κατασκευαστικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας μας. Θα δούμε αναλυτικά το τι περιέχει και πως λειτουργεί και γιατί έχει επιλεγεί. Η ανεμογεννήτρια μπορεί να θεωρηθεί ότι χωρίζεται σε τρία κομμάτια, τον πυλώνα, τον ρότορα και την νασέλλα ενώ ένα τέταρτο ξεχωριστό κομμάτι είναι η μονάδα ελέγχου. Ο σχεδιασμός και η επιλογή του κάθε κομματιού γίνεται για να εξυπηρετηθεί μια λειτουργία της μηχανής. Πριν όμως περάσουμε στην ανάλυση των επιμέρους κομματιών παραθέτουμε την επόμενη εικόνα στην οποία φαίνεται η νασέλλα, το εσωτερικό της, ο σύνδεσμος με τον ρότορα και η έναρξη του πυλώνα.



Εικόνα 4.5: Διάγραμμα ανεμογεννήτριας V90 – 3MW^[17]

4.2.1 Ο πυλώνας

Η ανεμογεννήτρια V90 – 3MW βγαίνει σε τρεις διαφορετικές εκδόσεις, σε πυλώνες 80 και 90 μέτρων (για χρήση σε περιοχές με ισχυρούς ανέμους IEC – IA μέσης ταχύτητας 10 m/s) και με πυλώνα 105 μέτρων (για χρήση σε περιοχές με μέτριους ανέμους IEC – IIA). Στο δικό μας αιολικό πάρκο χρησιμοποιείται ανεμογεννήτρια με πυλώνα ύψους 80 μέτρων. Ο πυλώνας

μας είναι σωληνοειδής και έχει σχήμα κωνοειδές. Η διάμετρος στην βάση είναι ίση με 3,98 μέτρα ενώ στην κορυφή μειώνεται στα 2,3 μέτρα. Είναι κατασκευασμένος από χάλυβα S355 και επικαλυμμένος για την προστασία του από φαινόμενα διάβρωσης. Η εταιρία προμηθεύει και ανεμογεννήτριες με ανελκυστήρα στο εσωτερικό του πυλώνα για μετάβαση στην νασέλλα των συντηρητών. Για να ανέβει ο συντηρητής στην νασέλλα χωρίς να χρησιμοποιήσει τον ανελκυστήρα πρέπει να πάρει όλα τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας προκειμένου να μην υπάρχει κίνδυνος πτώσης. Ο εξοπλισμός ασφαλείας περιλαμβάνει το κράνος (1), την ζώνη (2), συστήματα συγκράτησης (3), συσκευή προστασίας κατά την πτώση (4) και ειδικά παπούτσια με ελαστικές σόλες, σφιχτά στα πόδια (5). Εάν η ανεμογεννήτρια είναι εφοδιασμένη με ανελκυστήρα τότε ο μηχανικός πρέπει να πάρει μαζί του τον εξοπλισμό. Επιτρέπεται η ανάβαση μόνο ενός μηχανικού σε κάθε σκέλος της σκάλας. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται ένας εργάτης ο οποίος ανεβένει μέσα στον πυλώνα μιας V90.



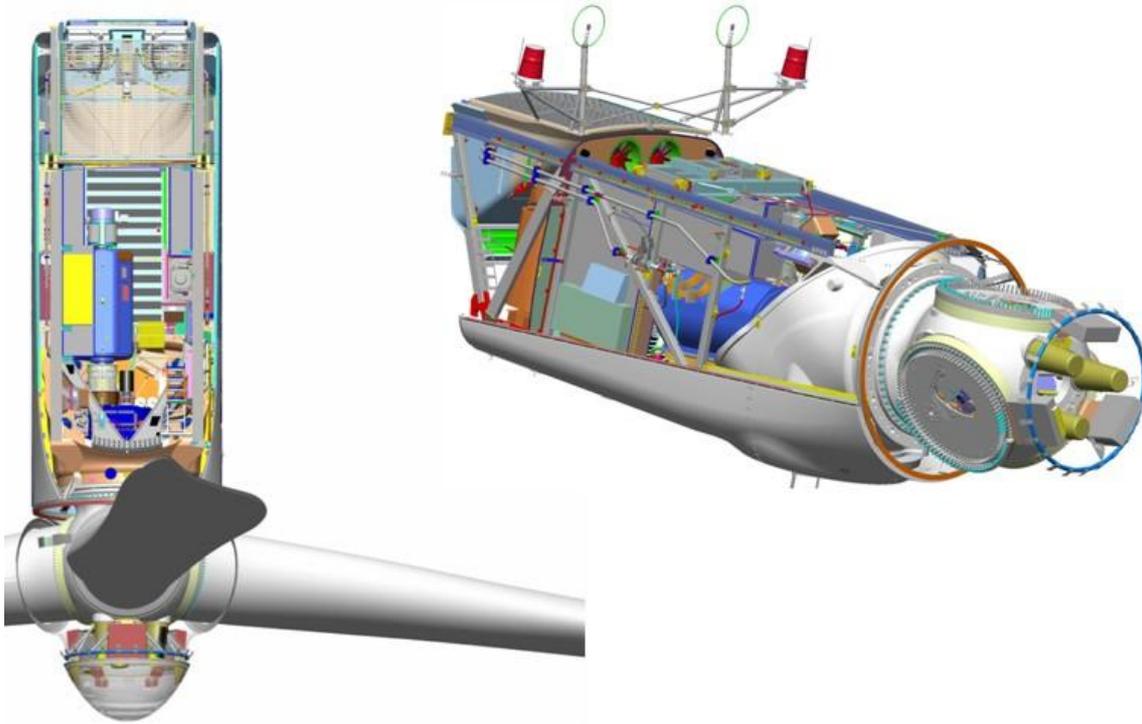
Εικόνα 4.6: Μηχανικός συντήρησης κατά την άνοδο του στον πύργο μιας ανεμογεννήτριας V90^[18]

4.2.2 Η νασέλλα

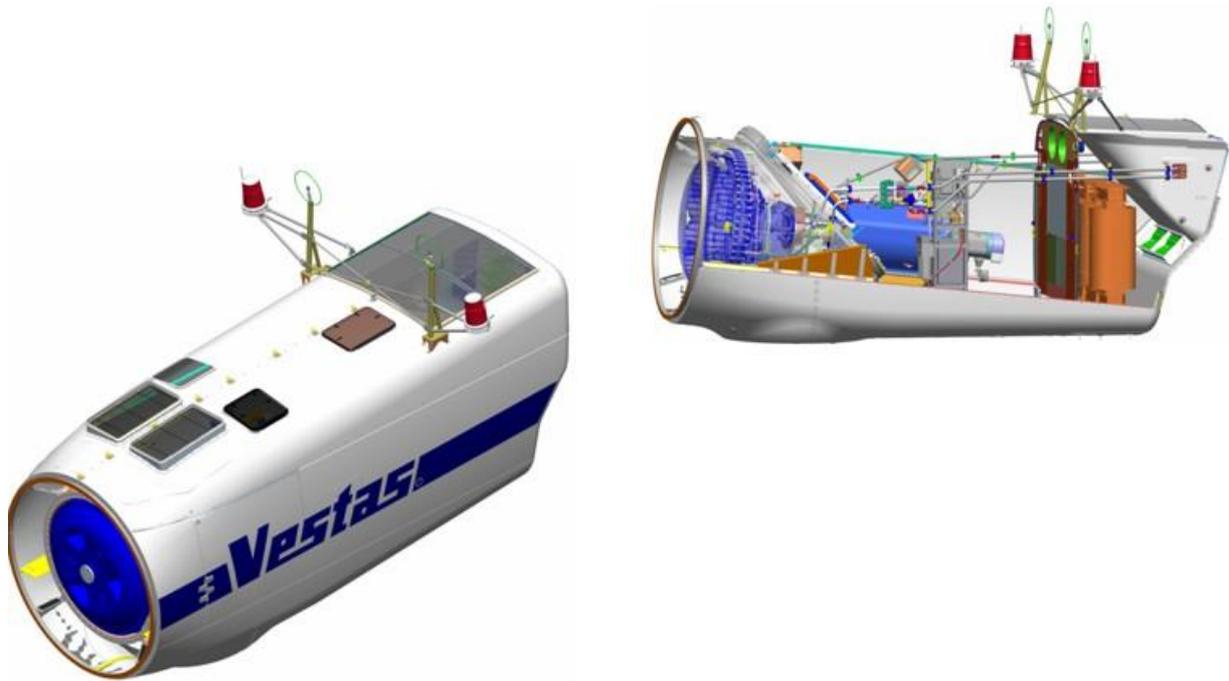
Η νασέλλα είναι το μέρος μέσα στο οποίο τοποθετούντε όλοι οι μηχανισμοί της ανεμογεννήτριας. Το περίβλημα της είναι κατασκευασμένο από πλαστικό (fiberglass) και αεροδυναμικά σχεδιασμένο έτσι ώστε να μειώνοντε όσο το δυνατό οι δυνάμεις αντίστασης στην κίνηση του αέρα. Στο κάτω μέρος της έχει ένα άνοιγμα που είναι η είσοδος της από τον πύργο. Στην οροφή της υπάρχουν κάποιες εξόδους για να υπάρχει πρόσβαση στους αισθητήρες του ανέμου που βρίσκοντε έξω στο πίσω μέρος της. Στην ίδια θέση υπάρχουν και φώτα τα οποία προειδοποιούν αεροσκάφη για την ύπαρξή της.

Η νασέλλα έχει μήκος 13,25 μέτρα εάν συμπεριλάβουμε μέσα το σύνδεσμο με τον ρότορα (hub) και τον κώνο που υπάρχει μπροστά και 9,65 μέτρα χωρίς αυτά. Έχει πλάτος 3,6 μέτρα και ύψος 4,05 μέτρα, είναι λίγο ψηλότερη από ένα κανονικό διαμέρισμα. Έχει βάρος 91 τόνων με μια διακύμανση ± 3 τόνους εάν συνυπολογιστεί το βάρος του συνδέσμου και του κώνου και 70 τόνους με μια διακύμανση ± 2 τόνους χωρίς αυτά.

Μέσα στην νασέλλα είναι τοποθετημένα όλα τα συστήματα της ανεμογεννήτριας, η γεννήτρια, η άτρακτος μεταφοράς της ισχύος, το κιβώτιο ταχυτήτων, τα φρένα, ο μετασχηματιστής, το σύστημα ψύξης, το σύστημα λίπανσης και το σύστημα προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας. Στο άκρο της υπάρχει ο σύνδεσμος με τον οποίο γίνεται η σύνδεση με τον ρότορα. Στο πίσω μέρος της υπάρχουν οι αισθητήρες μέτρησης της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου. Τέλος περιέχει και ένα μέρος του συστήματος ελέγχου. Αυτά τα συστήματα φαίνοντε στις δύο εικόνες της επόμενης σελίδας τις οποίες παρουσιάζει η ίδια η Vestas σε σεμινάρια^[19] που παράθεσε για ενημέρωση των ενδιαφερομένων. Η πρώτη από τις δύο εικόνες δείχνει τον σχεδιασμό της νασέλλας περιλαμβανομένου και του συνδέσμου και του κώνου που μπαίνει στην μύτη της. Στην δεύτερη εικόνα παρουσιάζεται η κατασκευή μόνο της νασέλλας. Σε αυτή φαίνοντε πολύ καθαρά οι εξόδους που υπάρχουν στην κορυφή. Στο εμπρόσθιο μέρος παρατηρούμε μια ισχυρότερη κατασκευή και ο λόγος είναι απλός, αυτό το κομμάτι είναι υπεύθυνο για την μεταφορά των φορτίων που ασκούντε στον ρότορα και στην νασέλλα στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας.



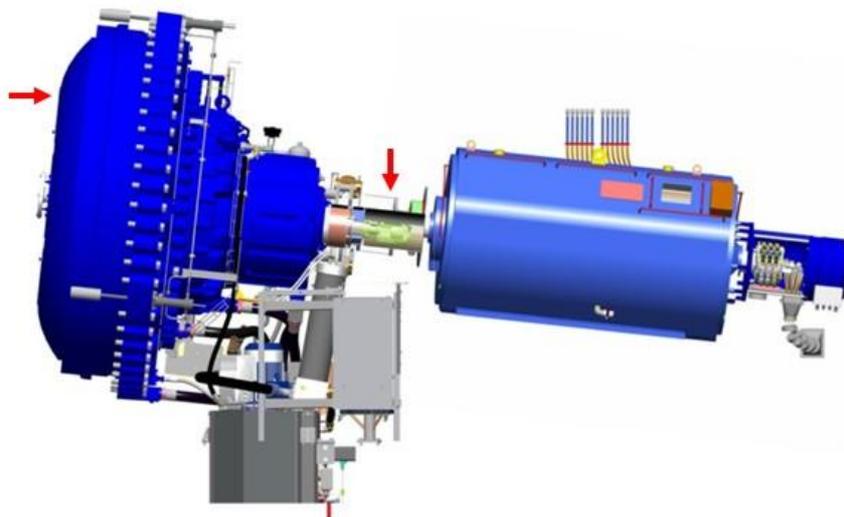
Εικόνα 4.7: Σχεδιασμός νασέλλας μαζί με τον σύνδεσμο και τον κώνο^[19]



Εικόνα 4.8: Σχεδιασμός νασέλλας χωρίς τον σύνδεσμο και τον κώνο^[19]

4.2.2.1 Άτρακτος μεταφοράς ισχύος

Το πρώτο από τα περιεχόμενα της νασέλλας που θα εξετάσουμε είναι η άτρακτος μεταφοράς της ισχύος. Είναι το τεμάχιο το οποίο είναι υπεύθυνο για την μεταφορά της ισχύος από τον ρότορα στην γεννήτρια. Είναι χωρισμένη σε δύο κομμάτια, στην «αργή» και την «γρήγορη» άτρακτος. Η αργή άτρακτος έχει στο ένα άκρο της τον ρότορα και στο άλλο άκρο της καταλήγει στο κιβώτιο ταχυτήτων. Λέγεται αργή γιατί περιστρέφεται με την ταχύτητα περιστροφής του ρότορα η οποία είναι μεταξύ 8,6 και 18,4 στροφών ανά λεπτό. Η γρήγορη άτρακτος έχει το ένα της άκρο στην έξοδο του κιβωτίου ταχυτήτων και το άλλο άκρο της καταλήγει στην γεννήτρια. Ονομάζεται γρήγορη άτρακτος γιατί περιστρέφεται με την ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας η οποία είναι 1680 στροφές το λεπτό (η ονομαστική ταχύτητα περιστροφής). Πολλές φορές η αργή άτρακτος δεν πολυμοιάζει με άτρακτο γιατί εφαρμόζει κατευθείαν στο κιβώτιο ταχυτήτων αποτελώντας ένα κομμάτι του ενός εκ των δύο πλανητικών συστημάτων που περιέχει. Το μεγάλο μέγεθος της είναι δυνατό λόγω της αργής ταχύτητας περιστροφής έτσι δεν θα υπάρχει πρόβλημα αυξημένων απωλειών λόγω μεγάλης ροπής αδράνειας. Η γρήγορη άτρακτος στηρίζεται με δύο κυλινδρικά ρουλεμάν. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η αργή άτρακτος, με το μπλε χρώμα (οριζόντιο κόκκινο βέλος), αμέσως πριν το κιβώτιο ταχυτήτων επίσης με το μπλε χρώμα (γύρω γύρω μοιάζει με γρανάζι) και η γρήγορη άτρακτος, με το γκρι χρώμα (κατακόρυφο κόκκινο βέλος), τοποθετημένη μετά το κιβώτιο ταχυτήτων και πριν την γεννήτρια με το γαλάζιο χρώμα .

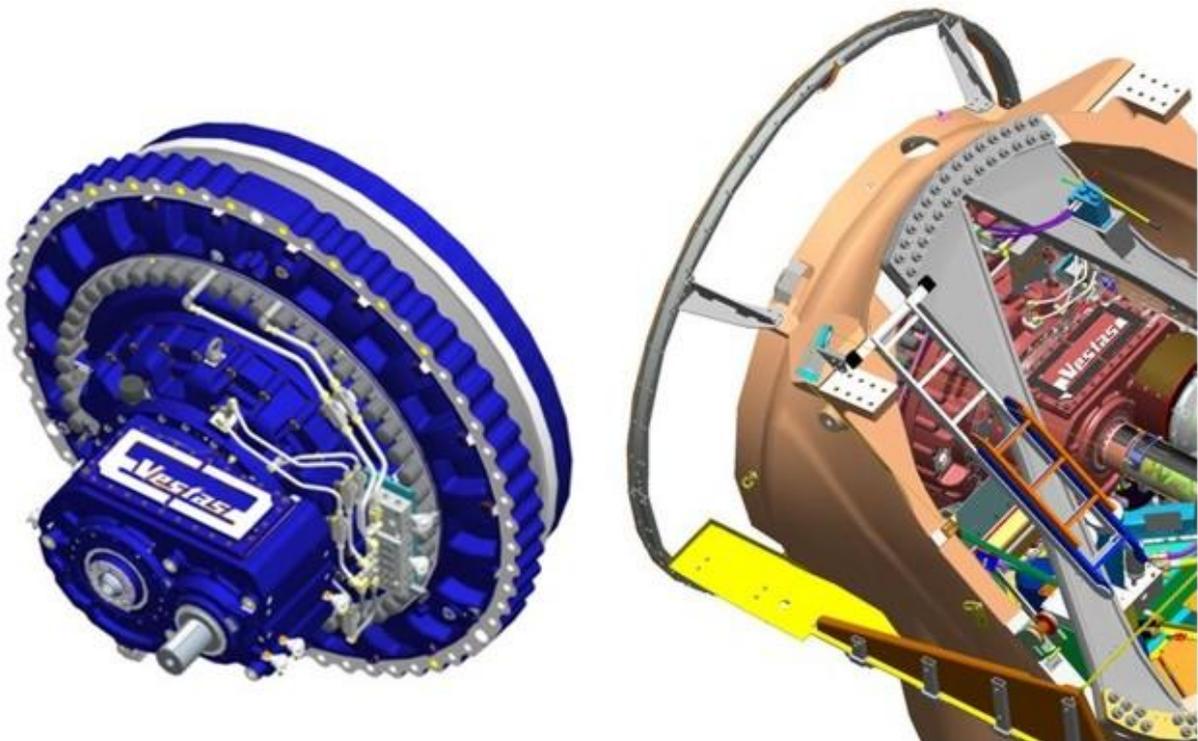


Εικόνα 4.9: Παρουσίαση της διπλής άτρακτος μετάδοσης της ισχύος συνδεδεμένης με το κιβώτιο ταχυτήτων και την γεννήτρια^[19]

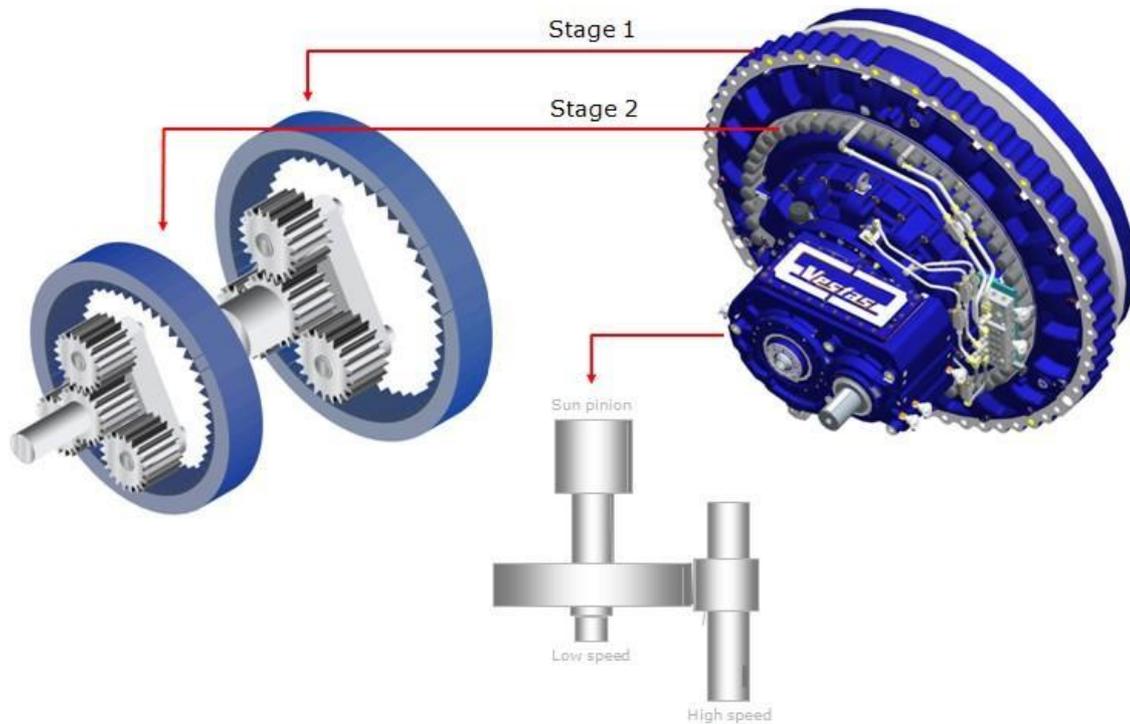
4.2.2.2 Κιβώτιο ταχυτήτων

Το κιβώτιο ταχυτήτων παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο ατράκτων και έχει ως στόχο να μετατρέψει την αργή περιστροφική ταχύτητα του ρότορα σε μια γρήγορη περιστροφική ταχύτητα της γεννήτριας έτσι ώστε να γίνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος πιο αποδοτικά. Ο ρότορας έχει μια ονομαστική περιστροφική ταχύτητα ίση με 16,1 στροφές ανά λεπτό ενώ η γεννήτρια έχει ονομαστική περιστροφική ταχύτητα ίση με 1680 στροφές το λεπτό έτσι ώστε να παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα συχνότητας 50 Hz. Η μεταβολή στις στροφές θα γίνει μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων το οποίο έχει λόγο μετάδοσης 1:104,5

Η κατασκευή του κιβωτίου ταχυτήτων γίνεται από την εταιρία Divers και αποτελείται από δύο πλανητικά και ένα ελικοειδές σύστημα ταχυτήτων. Η τοποθέτηση του γίνεται στην είσοδο της νασέλλας, ακριβώς μετά τον σύνδεσμο με τον ρότορα. Στην σειρά των εικόνων που ακολουθεί φαίνεται η κατασκευή και η τοποθέτηση του κιβωτίου ταχυτήτων αλλά και ο τρόπος με τον οποίο είναι διαμορφωμένα τα πλανητικά και το ελικοειδές σύστημά του.



Εικόνα 4.10: Εξωτερική διαμόρφωση κιβωτίου ταχυτήτων (αριστερά) και τοποθέτηση του στην νασέλλα (δεξιά – με το καφέ χρώμα το κιβώτιο)^[19]



Εικόνα 4.11: Σχηματική παράσταση των τριών στάσεων του κιβωτίου ταχυτήτων^[19]

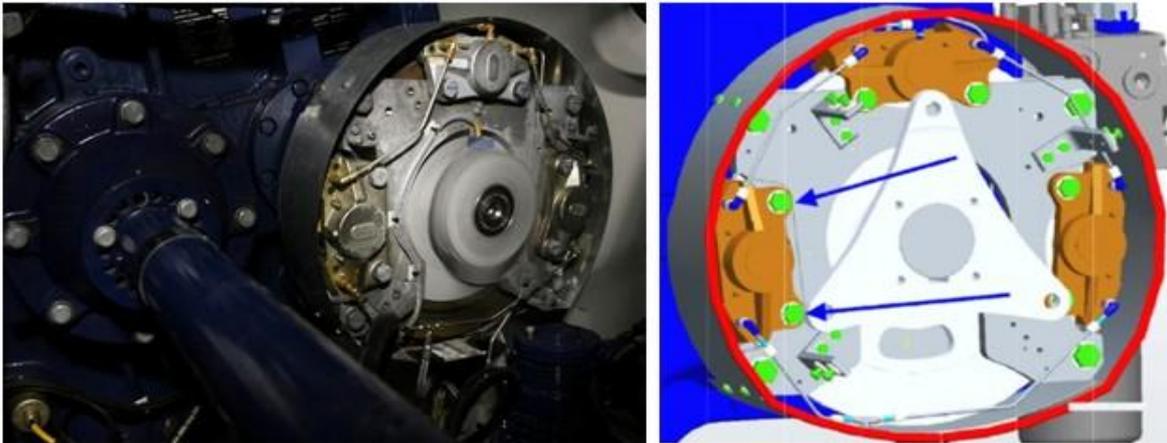
Η απόσταση μεταξύ των δύο γκρίζων αξόνων, που καθορίζουν την τελική σχέση μετάδοσης είναι 461 mm. Το κιβώτιο ταχυτήτων έχει συνολικό μήκος 2100 mm, διάμετρο 2600 mm και συνολικό βάρος 23 τόνων. Το κιβώτιο ταχυτήτων έχει και κάποια περιφερειακά συστήματα χρήσιμα για την σωστή λειτουργία του. Έχει σύστημα λίπανσης και ψύξης και στο εξωτερικό του μέρος είναι τοποθετημένο και το σύστημα πέδησης της ανεμογεννήτριας όπως φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 4.12: Κιβώτιο ταχυτήτων (μπλέ χρώμα) στο οποίο φαίνεται η άτρακτος υψηλής ταχύτητας και το σύστημα φρένων (γκρι χρώμα δεξιά)^[20]

4.2.2.3 Φρένα

Οι ανεμογεννήτριες V90 βασίζονται κυρίως σε αερόφρενα τα οποία στην ουσία είναι η απενεργοποίηση των πτερυγίων μέσω της αλλαγής γωνίας προσβολής και θα τα δούμε αναλυτικότερα στην σχετική ενότητα. Πέραν αυτών όμως υπάρχει ένα εφεδρικό φρένο, υδραυλικό δισκόφρενο, το οποίο φρενάρει την άτρακτο υψηλής ταχύτητας. Είναι τύπου PZ.I.4420.2802.10 με τρεις δαγκάνες επιφάνειας τύπου MPM 030 και ανεξάρτητο υδραυλικό σύστημα το οποίο θα αναλύσουμε σε επόμενη ενότητα. Το φρένο αυτό λειτουργεί συμπληρωματικά και χρησιμοποιείται όταν σταματούμε τελείως την ανεμογεννήτρια, όπως το χειρόφρενο σε ένα αμάξι. Παρακάτω ακολουθούν μια φωτογραφία και ένα διάγραμμα αυτού του φρένου.



Εικόνα 4.13: Υδραυλικό φρένο της ανεμογεννήτριας σε πραγματική εφαρμογή πάνω στο κιβώτιο ταχυτήτων (αριστερά)^[48] και σε σχηματική αναπαράσταση (δεξιά)^[20]

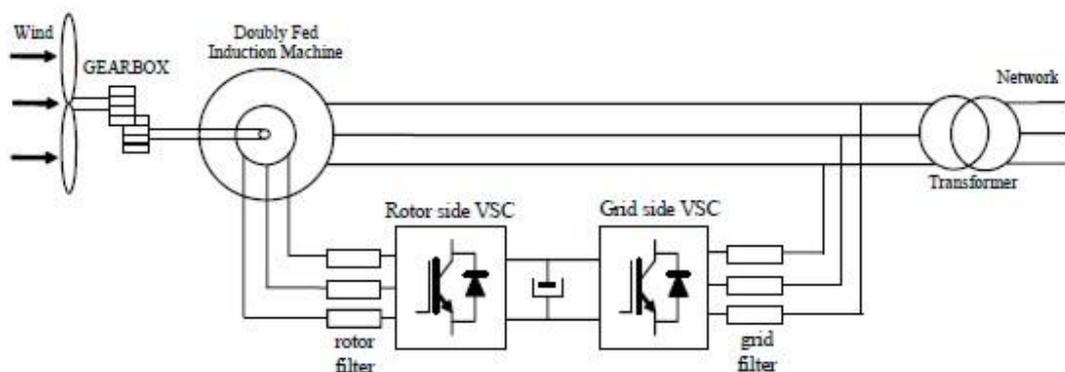
4.2.2.4 Γεννήτρια

Η ανεμογεννήτρια V90 – 3MW χρησιμοποιεί ασύγχρονη γεννήτρια τεχνολογίας dfim (double fed induction machine) τεσσάρων πόλων με διέγερση από τον ρότορα μέσω του συτήματος VCRS. Η γεννήτρια αυτή έχει την ικανότητα να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα ισχύος 3 MW, τάσεως 1000 VAC και συχνότητας 50 Hz στις 1680 στροφές ανά λεπτό ταχύτητα που είναι και η ονομαστική της. Έχει ονομαστικό συντελεστή ισχύος $\cos\phi$ ίσο με 1 και πραγματικό που κυμαίνεται μεταξύ 0,96 και 0,98. Έχει συνολικό μήκος ίσο με 2800 mm, διάμετρο ίση με 1100 mm και βάρος ίσο με 8,6 τόνους.

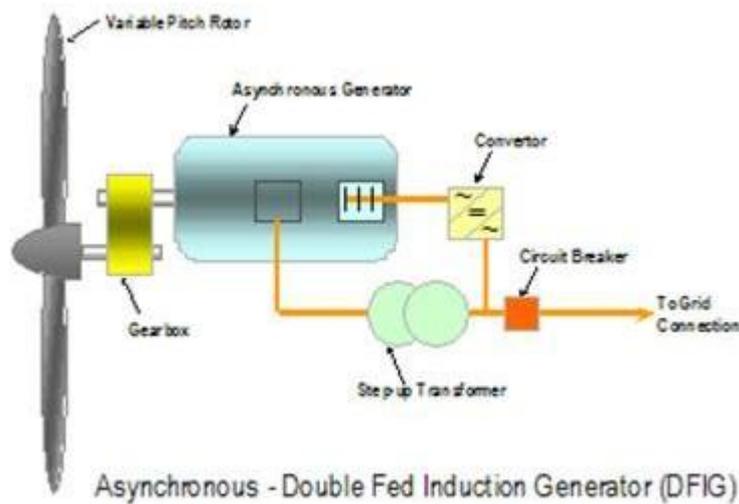
Η ανεμογεννήτρια πέρνει κίνηση από την άτρακτο υψηλής ταχύτητας και αποδίδει την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει κατευθείαν στο δίκτυο, με την παρεμβολή μόνο ενός

μετασηματιστή. Καθώς την θέλουμε για την χώρα μας την ανεμογεννήτρια τότε αυτόματα καθορίζοντε οι στροφές στις 1680 ως ονομαστική ταχύτητα για να υπάρχει παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος συχνότητας 50 Hz. Η σύνδεση της γεννήτριας με την άτρακτο υψηλής ταχύτητας φαίνεται στην εικόνα 5.9 στην ενότητα που περιγράφουμε την άτρακτο.

Η τεχνολογία dfim στην ανεμογεννήτρια συνεπάγεται την δυνατότητα μεταβλητών στροφών. Έχει περιελίξεις τόσο στον ρότορα όσο και στον στάτορα. Στα τυλίγματα του ρότορα παρέχεται ρεύμα με την βοήθεια ψυκτρών μέσω ενός πολυφασικού δακτυλιδιού (multiphase slip ring). Το ρεύμα που παρέχεται στον ρότορα προέρχεται από το δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα (converter) ο οποίος έχει την ιδιότητα να ελέγχει τόσο το ρεύμα του ρότορα όσο και το ρεύμα του δικτύου. Μεταβάλλοντας την τάση στον ρότορα μπορούμε να ρυθμίσουμε την ισχύ που δίνει ο στάτορας στο δίκτυο ανεξαρτήτως της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας. Αυτό δίνει την δυνατότητα του συνεχούς συγχρονισμού της γεννήτριας με το δίκτυο ανεξαρτήτως της ταχύτητας περιστροφής της. Η δυνατότητα του συγχρονισμού υπάρχει για μια μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας της τάξεως του $\pm 30\%$ της ονομαστικής ταχύτητας περιστροφής. Η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας μεταβάλλεται με αλλαγή του pitch, της γωνίας προσβολής των πτερυγίων. Η βελτιστοποίηση της διαδικασίας εξασφαλίζεται με την χρήση του συστήματος ελέγχου λειτουργίας OptiTip που εξέλιξε η ίδια η Vestas. Σε όλη την ενότητα αυτή όταν μιλάμε για ρότορα εννοούμε το περιστρεφόμενο τμήμα της γεννήτριας και όχι τον ρότορα της ανεμογεννήτριας με τα πτερύγια. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνοντε δύο διατάξεις σύνδεσης της γεννήτριας τεχνολογίας DFIM με τον converter και το δίκτυο.



Εικόνα 4.14: Διάγραμμα γεννήτριας DFIM στο οποίο φαίνεται η σύνδεση του converter στον ρότορα και το δίκτυο^[21]



Εικόνα 4.15: Σχηματική απεικόνιση γεννήτριας τεχνολογίας DFIM^[49]

4.2.2.5 Μετασηματιστής

Το τελευταίο εξάρτημα που χρησιμοποιείται πριν την διασύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο είναι ένας μετασηματιστής (transformer). Ο μετασηματιστής έχει ως στόχο την ανύψωση της τάσεως του ηλεκτρικού ρεύματος έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες κατά την μεταφορά. Είναι τύπου cast resin, τριφασικός, τοποθετημένος στο πίσω μέρος της νασέλλας, ονομαστικής ισχύος 3160 kVA σε υψηλή τάση 10 – 34,5 kV, ισχύος 3326 kVA για χαμηλή τάση 1000 V και συχνότητας 50 Hz. Έχει μήκος 2340 mm, πλάτος 1090 mm, ύψος 2150 mm και βάρος 8 τόνων.

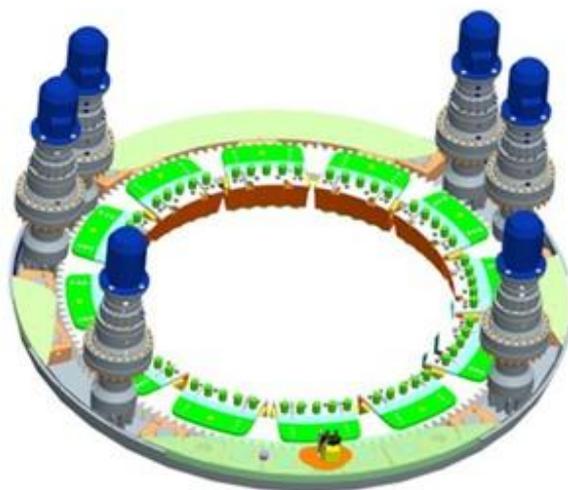
Η διασύνδεση με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο γίνεται μετά τον μετασηματιστή και μετά τον διακόπτη ισχύος αν υπάρχει. Η τάση εξόδου του μετασηματιστή πρέπει να συμπίπτει με την τάση του δικτύου με μια διαφορά το πολύ $\pm 5\%$ στις υψηλές τάσεις. Η διακύμανση στην συχνότητα πρέπει να είναι το πολύ ± 2 Hz. Η κατάσταση του δικτύου υπολογίζεται από το πρόγραμμα VGMS III (Vestas Grid Measuring Station) το οποίο με σήμα στην κεντρική μονάδα ελέγχου καθορίζει την κατάσταση του ρεύματος εξόδου από την ανεμογεννήτρια ώστε να υπάρχει ο βέλτιστος συγχρονισμός..

4.2.2.6 Σύστημα προσανατολισμού ανεμογεννήτριας

Το σύστημα προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας έχει ως στόχο να περιστρέφει την νασέλλα της ανεμογεννήτριας έτσι ώστε πάντα να δέχεται τον άνεμο κατά μέτωπον έτσι ώστε να αξιοποιεί όσο το δυνατό περισσότερη από την διαθέσιμη ενέργεια του. Ο προσανατολισμός

γίνεται αυτόματα με την χρήση έξι ασύγχρονων κινητήρων τεσσάρων πόλων, ισχύος 2,2 kW με ηλεκτρικό φρένο οι οποίοι δέχοντε εντολές από το σύστημα ελέγχου. Ο κάθε κινητήρας έχει και το δικό του φρένο έτσι ώστε να σταματάει αυτή η περιστροφή. Η διεύθυνση του ανέμου καθορίζεται από αισθητήρες στο επάνω τμήμα της οροφής της νασέλλας τους οποίους θα αναλύσουμε σε επόμενη ενότητα.

Πέραν το προσανατολισμου το σύστημα αυτό πρέπει να είναι έτσι κατασκευασμένο ώστε να συγκρατεί την νασέλλα πάνω στον πυλώνα αλλά και να μεταφέρει όλες τις δυνάμεις που δέχεται η νασέλλα στον πυλώνα. Έτσι το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα δακτυλίδι το οποίο στην ουσία είναι ένα ρουλεμάν ολίσθησης απο υλικό PETP, με ενσωματωμένο τριβέα. Η ταχύτητα περιστροφής του συστήματος είναι μικρότερη από 0,5°/s. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται το δακτυλίδι του συστήματος προσανατολισμού μαζί με κομμάτια σύνδεσης του μοτέρ.



Εικόνα 4.16: Δακτυλίδι του συστήματος προσανατολισμού^[19]

4.2.2.7 Υδραυλικό σύστημα

Ήδη στην ενότητα στην οποία περιγράψαμε την λειτουργία και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των φρένων αναφέραμε την χρήση υδραυλικού συστήματος. Υδραυλικό σύστημα λειτουργίας έχει και το περύγιο για να μεταβάλλει το pitch του το οποίο θα δούμε σε παρακάτω ενότητα. Άρα είναι φανερό ότι πρέπει να υπάρχει ένα υδραυλικό δίκτυο στην ανεμογεννήτρια μας που θα τροφοδοτεί με λάδι συγκεκριμένης πίεσεως τα φρένα και τα περύγια. Το δίκτυο αυτό δεν θα χρησιμοποιείται για την λίπανση των εξαρτημάτων.

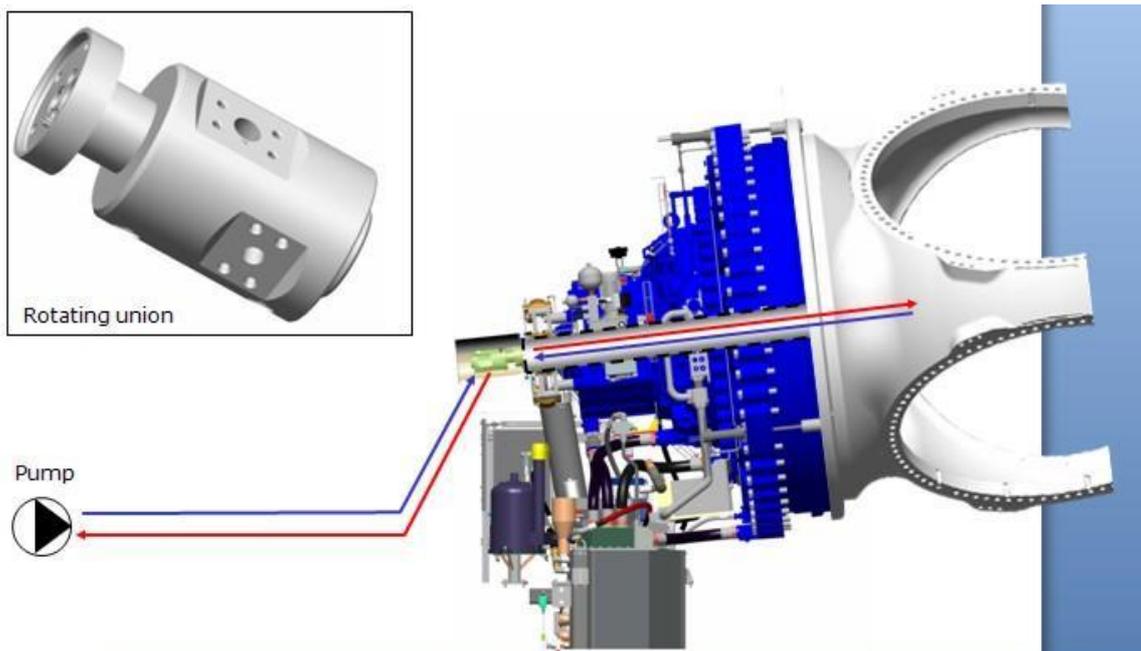
Το υδραυλικό δίκτυο για την ρύθμιση της γωνίας πρόσπτωσης στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας έχει πίεση 250 bar και είναι τοποθετημένο εξ' ολοκλήρου μέσα στην νασέλλα. Μόνο μια σωλήνα βγαίνει έξω, από τον σύνδεσμο σύνδεσης νασέλλας ρότορα και τροφοδοτεί τα πτερύγια. Το υδραυλικό σύστημα έχει μια αντλία χαμηλής πίεσεως με μια βαλβίδα παράκαμψης των 10 bar και παροχή 40 λίτρων το λεπτό η οποία έχει ως στόχο να θερμαίνει το λάδι έτσι ώστε όταν φτάσει σε ιδανική θερμοκρασία να ξεκινήσει η αντλία υψηλής πίεσεως. Μετά την έναρξη της λειτουργίας της αντλίας υψηλής πίεσεως αυτή η αντλία έχει ως στόχο της να ψύχει το λάδι έτσι ώστε να παραμένει σε σωστή θερμοκρασία λειτουργίας. Η αντλία αυτή λειτουργεί πάντα σε καταστάσεις λειτουργίας Start και Pause, σταματάει μετά από κάποιο χρονικό διάστημα σε κατάσταση λειτουργίας Stop και σταματάει αμέσως μόνο σε κατάσταση λειτουργίας Emergency Stop. Η αντλία υψηλής πίεσεως δίδει πιέσεις 200 bar στο δίκτυο και ξεκινάει όταν η πίεση πέσει κάτω από τα 180 bar. Εάν η πίεση του δικτύου φτάσει τα 250 bar τότε ανοίγει μια βαλβίδα ασφαλείας. Το δίκτυο περιέχει λάδι 60 λίτρων με παροχή γύρω στα 8,5 λίτρα το λεπτό. Η αντλία υψηλής πίεσεως λειτουργεί με την βοήθεια ηλεκτροκινητήρα ισχύος 4kW. Στην εικόνα παρακάτω φαίνεται το σύστημα αντλιών σχεδιαγραμματικά.



Εικόνα 4.17: Αντλία χαμηλής πίεσης για θέρμανση του λαδιού (αριστερά πάνω), αντλία υψηλής πίεσης (αριστερά κάτω καλυμμένη)^[22] και αντλία φρένων (δεξιά)^[20]

Το λάδι αυξημένης πίεσης με κάποιο τρόπο πρέπει να καταλήξει στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας. Για να γίνει αυτό περνάει με ένα σωλήνα μέσα από το κιβώτιο ταχυτήτων

καταλήγει στο hub Εκεί υπάρχει ένα ειδικά κατασκευασμένο εξάρτημα το οποίο γυρνάει στην μια του πλευρά και στην άλλη είναι σταθερό. Το περιστρεφόμενο του μέρος συνδέεται με το περιστρεφόμενο κομμάτι του κιβωτίου ταχυτήτων μέσω του άξονα υψηλών στροφών ενώ το σταθερό του μέρος συνδέεται με το δίκτυο μεταφοράς του λαδιού. Στον σύνδεσμο με τον ρότορα καταλήγουν οι τρεις αγωγοί από τα πτερύγια και μέσω ενός διανομέα διαμοιράζεται το λάδι σε αυτά. Ένας υδραυλικός κύλινδρος υπάρχει σε κάθε πτερύγιο και είναι υπεύθυνος για την ρύθμιση του pitch του έτσι αναλόγως της πίεσης που δέχεται από το υδραυλικό σύστημα καθορίζει την γωνία πρόσπτωσης του αέρα στα πτερύγια. Τρία αεροφυλάκια, ένα για κάθε πτερύγιο λειτουργούν ως συσσωρευτές έτσι το σύστημα έχει πάντα υψηλή πίεση πάνω από 80 bar έστω και αν δεν λειτουργεί η αντλία. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η πορεία του λαδιού μέχρι να φτάσει στον σύνδεσμο και το εξάρτημα με το οποίο ενώνεται το δίκτυο στα σταθερά και τα περιστρεφόμενα μέρη.



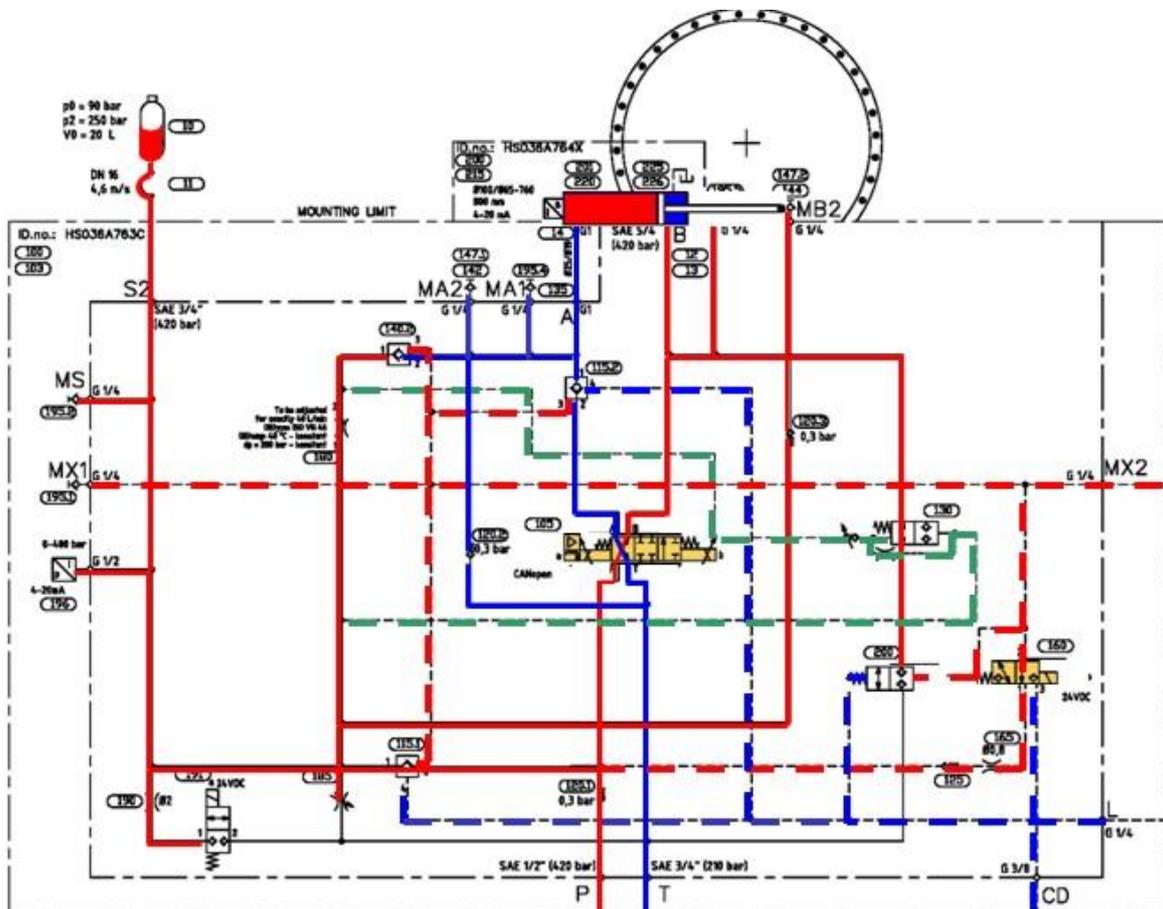
Εικόνα 4.18: Διαδρομή λαδιού υψηλής πίεσης μέσα από το κιβώτιο ταχυτήτων έως τον σύνδεσμο με τον ρότορα. Επάνω δεξιά φαίνεται το περιστρεφόμενο εξάρτημα με το οποίο γίνεται η παροχή στα πτερύγια^[22]

Στην επόμενη σελίδα θα παρουσιαστεί το εξάρτημα του υδραυλικού κυλίνδρου που υπάρχει σε κάθε πτερύγιο. Με την μεταβολή της πίεσης στον κύλινδρο περιστρέφεται ο άξονας ο οποίος αλλάζει και την γωνία του πτερυγίου. Στην συνέχεια θα παρουσιαστεί το δίκτυο κατά

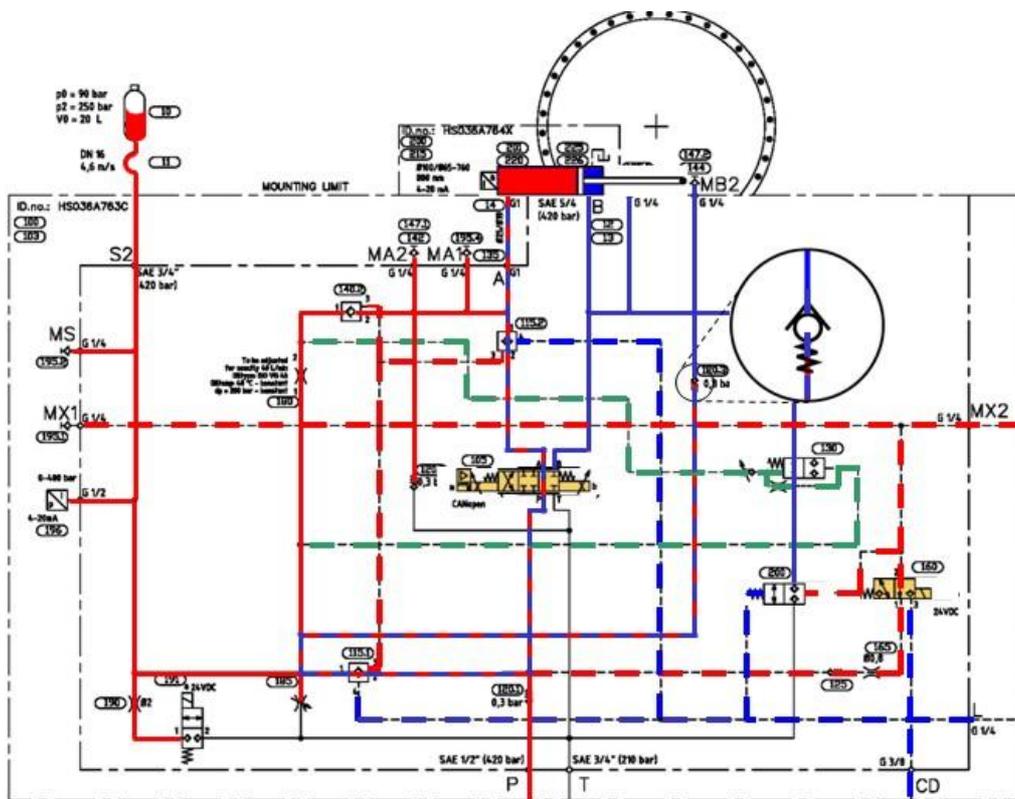
την λειτουργία του. Στο τέλος παρουσιάζεται μια συνολική εικόνα του δικτύου μαζί με τον διανομέα που βρίσκεται στον σύνδεσμο.



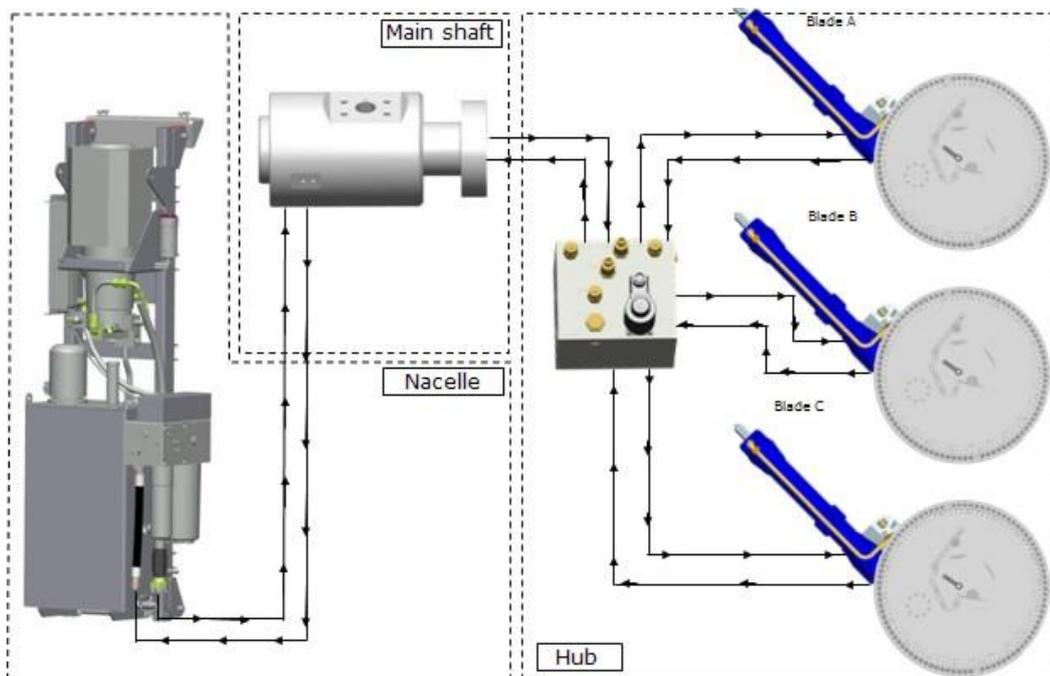
Εικόνα 4.19: Υδραυλικός κύλινδρος για την αλλαγή του pitch ενός πτερυγίου^[22]



Εικόνα 4.20: Πίεση δικτύου όταν το πτερύγιο βρίσκεται σε γωνία pitch 90° (ουσιαστικά είναι ανενεργό, λειτουργεί ως αερόφρενο)^[22]

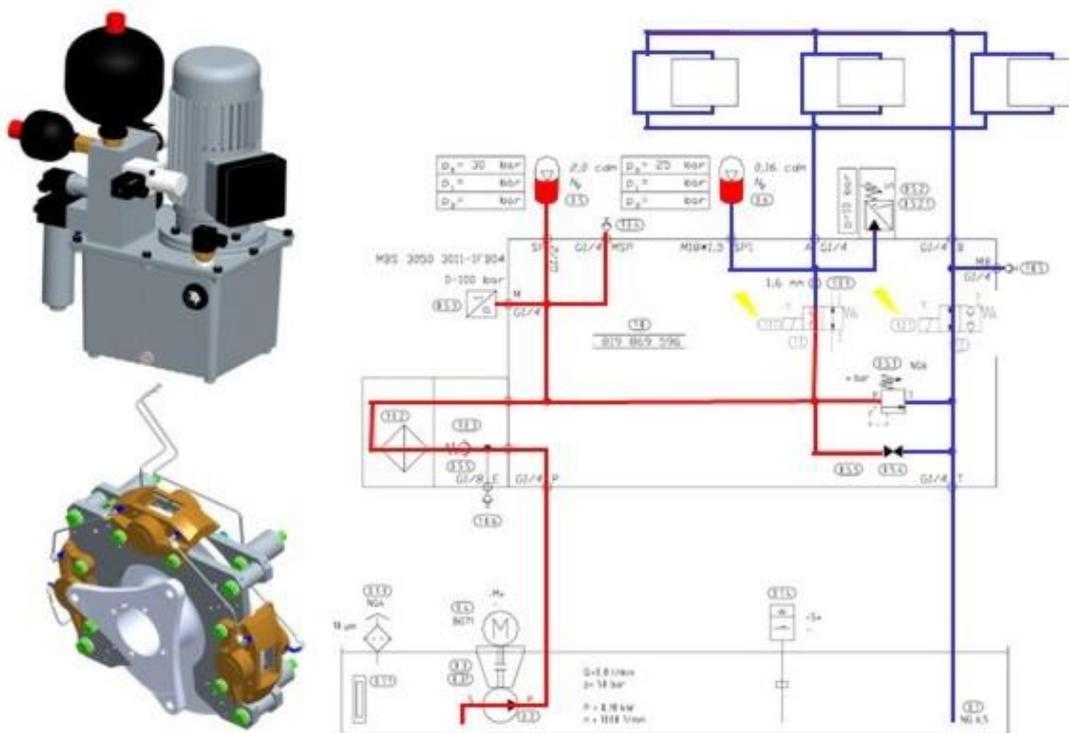


Εικόνα 4.21: Πίεση δικτύου όταν το περσόγιο βρίσκεται σε γωνία pitch 0° (είναι ενεργό)^[22]



Εικόνα 4.22: Συνολικό υδραυλικό δίκτυο μεταβολής του pitch των περσόγιων^[22]

Για τα φρένα υπάρχει ένα άλλο, ανεξάρτητο δίκτυο υψηλής πίεσης αλλά πολύ χαμηλότερης από την πίεση του δικτύου ρύθμισης του pitch. Μια μικρότερη αντλία συμπιέζει το ρευστό έως και τα 35 bar. Η λειτουργία της ξεκινάει όταν η πίεση πέσει κάτω από τα 28 bar. Η μέση πίεση του δικτύου είναι 32 bar. Είναι σαφώς μικρότερο δίκτυο και τροφοδοτεί με ρευστό υψηλής πίεσης τις τρεις δαγκάνες του φρένου. Το φρένο αυτό έχουμε ήδη αναφέρει ότι λειτουργεί συμπληρωματικά με τα αερόφρενα, κυρίως κατά την διαδικασία του σταματήματος έτσι ενεργοποιείται μόνο σε κατάσταση λειτουργίας Emergency Stop. Ένα αεροφυλάκιο λειτουργεί ως συσσωρευτής για να υπάρχει πάντα υψηλή πίεση στο σύστημα.

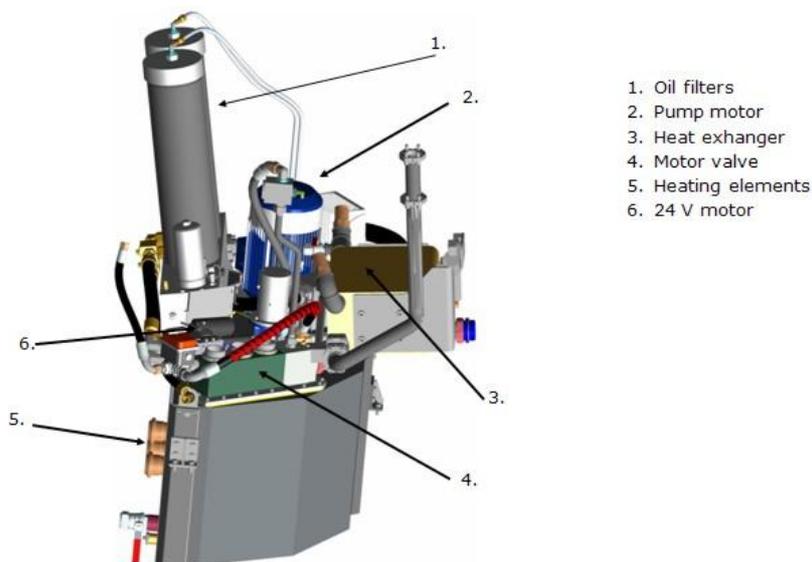


Εικόνα 4.23: Επάνω δεξιά φαίνεται η αντλία παροχής πίεσης στο υδραυλικό σύστημα των φρένων. Κάτω αριστερά φαίνεται το φρένο μαζί με τα σωληνάκια (γκρι χρώμα) τα οποία μεταφέρουν και απάγουν το λάδι στις τρεις δαγκάνες. Δεξιά φαίνεται η δράση του συστήματος κατά την διάρκεια του φρεναρίσματος^[22]

4.2.2.8 Σύστημα λίπανσης

Τα κυριότερα συστήματα που χρειάζονται λίπανση είναι δύο, το κιβώτιο ταχυτήτων και ο μηχανισμός προσανατολισμού της γεννήτριας. Ο λόγος που χρειάζονται λίπανση είναι γιατί έχουν μηχανικά μέρη σε έντονη τριβή. Παρακάτω θα δούμε την λίπανση ξεχωριστά για το κάθε σύστημα.

Το κιβώτιο ταχυτήτων λιπαίνεται με την βοήθεια ενός συστήματος κυκλοφορίας λαδιού. Με την χρήση αντλίας αποστέλεται σε όλα τα σημαντικά σημεία του κιβωτίου λάδι. Το λάδι αυτό χρησιμοποιείται τόσο για να λιπάνει τα μέρη του κιβωτίου (μειώνοντας έτσι την φθορά) αλλά και για να τα ψύξει (θα το δούμε αναλυτικά στην επόμενη ενότητα αυτό). Το σύστημα κυκλοφορίας λαδιού περιέχει μια αντλία – κυκλοφορητή, ένα ηλεκτροκινητήρα για να δίνει ισχύ στην αντλία, ένα φίλτρο λαδιού, ένα θερμαντικό στοιχείο, ένα εναλλάκτη θερμότητας, μια δεξαμενή μεσα στην οποία βρίσκεται το λάδι και ένα εναλλακτικό δίκτυο λίπανσης σε περίπτωση εκτάκτου ανάγκης. Η παρακάτω εικόνα δείχνει τα κυριότερα μέρη του συστήματος λίπανσης του κιβωτίου ταχυτήτων.

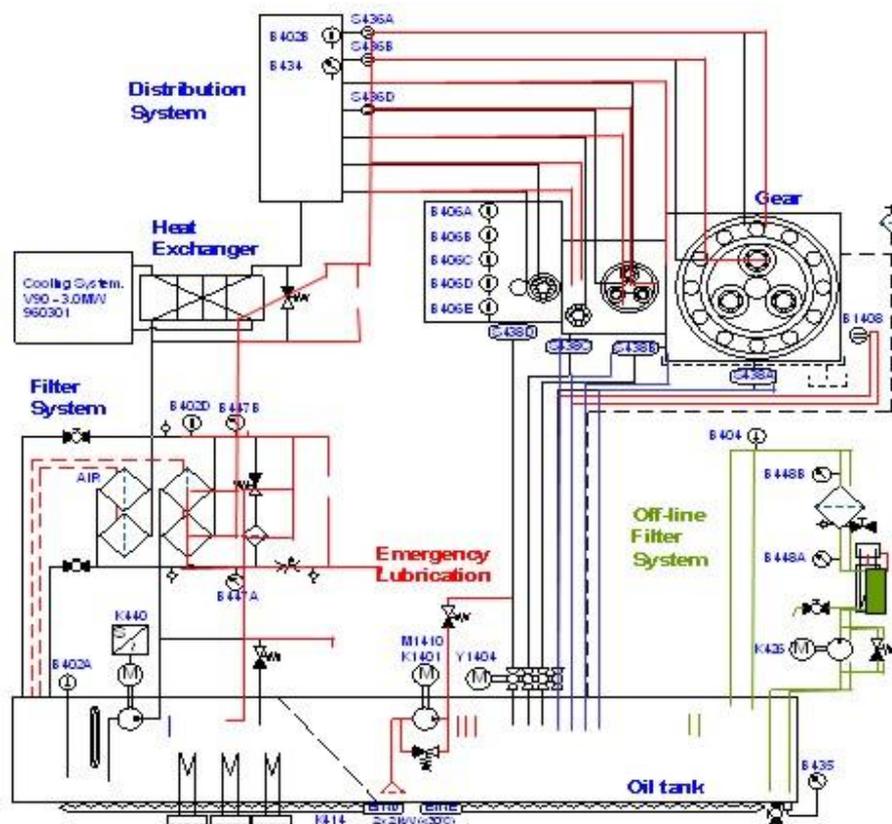


Εικόνα 4.24: Σύστημα λίπανσης κιβωτίου ταχυτήτων^[24]

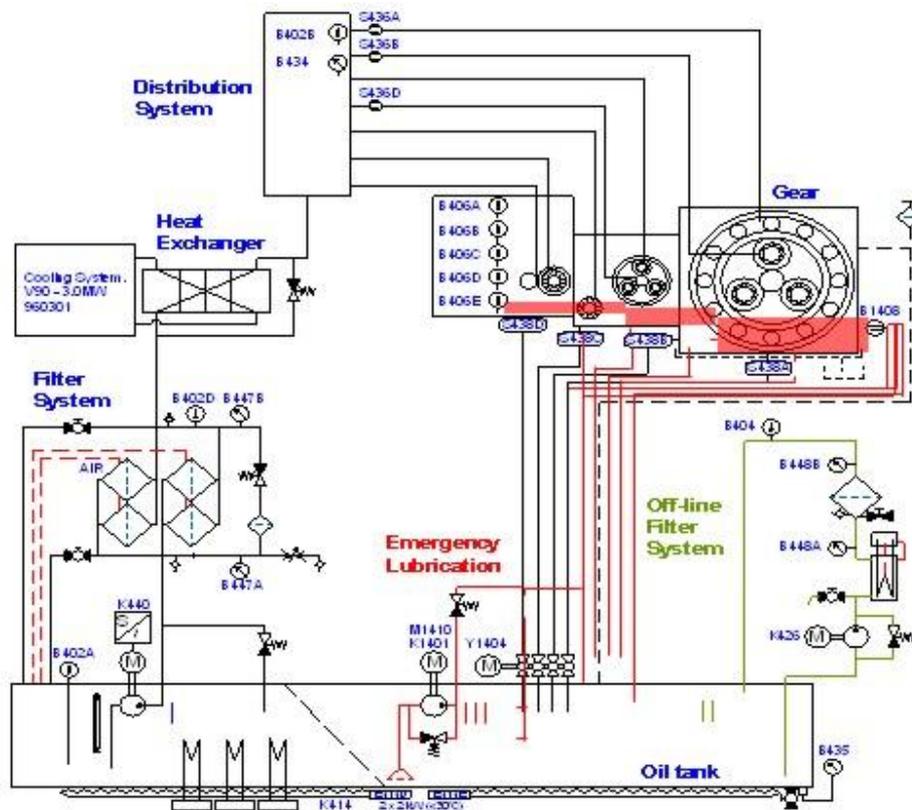
Ο κυκλοφορητής δίνει κίνηση στο λάδι που βρίσκεται μέσα στο δίκτυο. Το λάδι περνάει από τα θερμαντικά στοιχεία έτσι ώστε να αποκτήσει την σωστή θερμοκρασία εισόδου. Εάν η μέση θερμοκρασία του λαδιού στις ταχύτητες πέσει κάτω από 30°C τότε τα θερμαντικά σώματα ανάβουν ώστε να ζεσταθεί το λάδι. Αν ανέβει πάνω από τους 35°C τότε σβήνουν. Στην συνέχεια το λάδι περνάει από το φίλτρο και καταλήγει στα σημεία τα οποία πρέπει να λιπάνει. Κάνει την δουλειά του και μετά απάγεται μέσω ενός δευτέρου δικτύου. Κατά την πορεία του προς την δεξαμενή περνάει από τον εναλλάκτη θερμότητας και ψύχεται.

Αυτός είναι ο κύκλος λίπανσης κατά την απλή, σωστή λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Εάν η ελάχιστη θερμοκρασία του λαδιού στην θέση λίπανσης πέσει κάτω από τους 25°C τότε η

ανεμογεννήτρια μπαίνει σε κατάσταση λειτουργίας Pause με το μήνυμα «Waiting.... Heating Gearbox». Όταν η θερμοκρασία ανέβει πάνω από τους 30°C τότε ξαναμπαίνει σε κατάσταση λειτουργίας Run η ανεμογεννήτρια μας και δουλεύει κανονικά. Εάν η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους 0°C τότε η μηχανή μπαίνει σε κατάσταση λειτουργίας Stop και εμφανίζεται το ίδιο μήνυμα με πριν. Όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 5°C τότε η μηχανή ξαναμπαίνει σε κατάσταση λειτουργίας Pause. Εάν η θερμοκρασία πέσει κάτω από τους -5°C τότε η μηχανή μπαίνει σε κατάσταση λειτουργίας Emergency. Αυτό σημαίνει ότι επιπλέον λιπαντικό μπαίνει στο κιβώτιο ταχυτήτων με ρυθμό 1,6 λίτρων το λεπτό με αποτέλεσμα πλέον η λίπανση να γίνεται με λουτρό ελαίου. Το λιπαντικό εισέρχεται μέσω του δικτύου έκτακτης ανάγκης. Όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει τους 0°C τότε η μηχανή ξαναμπαίνει σε κατάσταση Pause. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η ροή του λιπαντικού κατά την απλή λειτουργία Run και κατά την λειτουργία εκτάκτου ανάγκης Emergency.

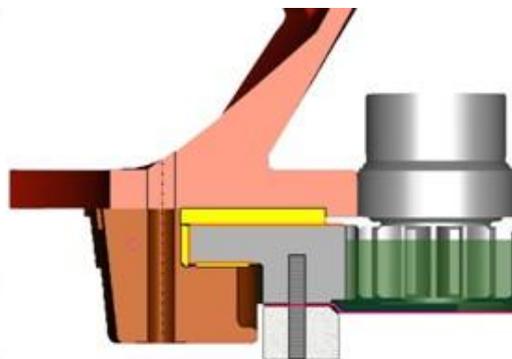


Εικόνα 4.25: Σύστημα λίπανσης κιβωτίου ταχυτήτων στην κατάσταση λειτουργίας Run^[24]



Εικόνα 4.26: Σύστημα λίπανσης κιβωτίου ταχυτήτων στην κατάσταση λειτουργίας Emergency^[24]

Πέρα από το κιβώτιο ταχυτήτων η λίπανση θεωρείται ζωτικής σημασίας και για τον μηχανισμό προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας. Γύρω από το δακτυλίδι υπάρχουν περάσματα τα οποία γεμίζουν με λάδι. Χρησιμοποιούντε 55 λίτρα λαδιού για να γεμίσει ο χώρος αυτός και τα εξαρτήματα λιπαίνοντε με λουτρό ελαίου. Το λάδι αυτό πρέπει να αλλάζει κάθε ένα δωδεκάμηνο. Ο χώρος κίνησης μεταξύ των δύο δακτυλιδιών είναι γεμάτος με γράσο. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η διάταξη με την οποία λιπαίνεται ο μηχανισμός περιστροφής.



Εικόνα 4.27: Λίπανση μηχανισμού προσανατολισμού ανεμογεννήτριας με λουτρό ελαίου^[19]

4.2.2.9 Σύστημα ψύξης

Η θερμοκρασία ανεβαίνει μέσα στην νασέλλα λόγω όλων αυτών των μηχανημάτων που δουλεύουν μέσα όπως τα είδαμε παραπάνω. Για να μην υπάρχουν προβλήματα λειτουργίας λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας τοποθετείται ένα σύστημα ψύξης. Το σύστημα αυτό είναι πολύ απλό, αποτελείται μονάχα από ένα ανεμιστήρα ο οποίος επιτρέπει στον εξωτερικό αέρα να περνάει μέσα στην νασέλλα και να την ψύχει. Ο ανεμιστήρας είναι τοποθετημένος ψηλά στο πίσω μέρος της νασέλλας και διοχετεύει εξωτερικό αέρα ο οποίος περνάει πρώτα μέσα από το κουτί του μετασχηματιστή και στην συνέχεια κινείται μέσα σε όλο το εσωτερικό της νασέλλας.

Πέραν της νασέλλας ψύξη θέλουν και τα υπόλοιπα εξαρτήματα ώστε να μην υπάρχει φθορά λόγω υπερθέρμανσης. Το κιβώτιο ταχυτήτων ψύχεται μέσω του λαδιού που χρησιμοποιείται για την λίπανση του και με το οποίο ασχοληθήκαμε αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα. Η γεννήτρια είναι υδρόψυκτη, ένα σύστημα προσάγει κρύο νερό στα θερμά μέρη της γεννήτριας και απάγει το ζεστο. Τόσο το λάδι του κιβωτίου ταχυτήτων όσο και το νερό ψύξης της γεννήτριας με κάποιο τρόπο πρέπει να απάγουν την θερμότητα που παραλαμβάνουν από τα εξαρτήματα στο περιβάλλον. Αυτό γίνεται με την χρήση εναλλακτών θερμότητας. Σε μια θέση της νασέλλας υπάρχει μια εσοχή από την οποία μπαίνει αέρας. Ο αέρας εκείνος περνάει από ένα εναλλάκτη θερμότητας αέρος / νερού. Απάγει την θερμότητα από το νερό. Το νερό με την σειρά του περνάει από τέσσερις εναλλάκτες, δύο εναλλάκτες νερού / λαδιού για την ψύξη του λαδιού του κιβωτίου ταχυτήτων και δύο εναλλάκτες νερού / νερού για την ψύξης του νερού της γεννήτριας. Οι τέσσερις εναλλάκτες είναι τοποθετημένοι πάνω από το κουτί του μετασχηματιστή. Ψύξη χρειάζεται και ο μετασχηματιστής. Αυτή επιτυγχάνεται με την βοήθεια ενός δεύτερου ανεμιστήρα, ανεξάρτητου από τον πρώτο ο οποίος φέρνει αέρα από το εξωτερικό μέρος της νασέλλας και τον διοχετεύει στα τυλίγματα του κάτω μέρους του μετασχηματιστή.

4.2.2.10 Αισθητήρες

Μέσα στην νασέλλα, σε πολλά σημεία είναι τοποθετημένοι αισθητήρες με διάφορους στόχους. Για διευκρίνιση εδώ δεν μιλάμε για μετρητές πίεσης, θερμοκρασίας ή τάσης που υπάρχουν σε πολλά από τα επιμέρους συστήματα που είδαμε παραπάνω. Μέσα στην νασέλλα (όπως και μέσα στον πυλώνα) υπάρχουν οπτικοί αισθητήρες καπνού. Εάν οποιοσδήποτε από αυτούς ανιχνεύσει καπνό τότε στέλνεται ένα σήμα κινδύνου στο κέντρο ελέγχου και

ενεργοποιείται ο κεντρικός διακόπτης σταματώντας την λειτουργία της μηχανής. Το σήμα αυτό είναι ψηφιακό, τάσεως 24 V. Εάν για κάποιο λόγο δεν λειτουργεί ένας από τους αισθητήρες καπνού τότε μια προειδοποίηση αποστέλλεται στο κέντρο ελέγχου. Στα άκρα των πτερυγίων υπάρχουν αισθητήρες οι οποίοι μπορούν να εντοπίσουν υψηλές τάσεις άρα προειδοποιούν για κεραυνούς. Οι αισθητήρες αυτοί είναι οπτικο αναλογικοί. Στον μετασχηματιστή υπάρχει ένας αισθητήρας ο οποίος μπορεί να προβλέψει την δημιουργία ηλεκτρικού τόξου έτσι να στείλει ένα σήμα και να ανοίξει το κύκλωμα για να μην καταστραφεί.

Ο σημαντικότερος όμως από τους αισθητήρες είναι ο αισθητήρας μέτρησης του ανέμου. Στην οροφή της νασέλλας, στο πίσω μέρος είναι τοποθετημένοι δύο τέτοιοι αισθητήρες για μεγαλύτερη ακρίβεια. Οι αισθητήρες είναι τύπου ultrasonic, αξιοποιούν τα υπερηχητικά ακουστικά κύματα που δημιουργούνται μεταξύ δύο μεμβράνων από την ταχύτητα του αέρα. Κατά την μεταβολή της διεύθυνσης του ανέμου στέλνουν σήμα που ενεργοποιεί τον μηχανισμό προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας ενώ κατά την μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου στέλνουν σήμα που ενεργοποιεί το υδραυλικό σύστημα για αλλαγή του pitch των πτερυγίων. Τα σήματα που στέλνουν είναι οπτικά RS485. Ένα θερμικό στοιχείο εφοδιάζει αυτούς τους αισθητήρες έτσι ώστε να παραμένουν λειτουργικοί και σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου έχουν ακρίβεια $\pm 0,1$ m/s για ταχύτητες έως 5 m/s και $\pm 2\%$ για ταχύτητες μεγαλύτερες των 5 m/s. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η τοποθέτηση τους στο επάνω μέρος της νασέλλας.



Εικόνα 4.28: Αισθητήρες ανέμου τοποθετημένοι στο πίσω μέρος της νασέλλας^[19]

4.2.3 Ο ρότορας

Ο ρότορας είναι το τρίτο ξεχωριστό μέρος μετά την νασέλλα και τον πυλώνα και αποτελείται μόνο από περιστρεφόμενα τμήματα. Τοποθετείται μπροστά από την νασέλλα έτσι η ανεμογεννήτρια μας ανήκει στην κατηγορία των ανάντη ανεμογεννητριών. Το πρώτο κομμάτι

του είναι ο σύνδεσμος με την νασέλλα μέσω του hub και ο κώνος της μύτης που είναι τοποθετημένος μπροστά από το hub. Το δεύτερο κομμάτι του είναι τα πτερύγια.

Ο ρότορας στην ανεμογεννήτρια V90 – 3MW έχει διάμετρο 90 μέτρα και αξιοποιεί την ενέργεια του αέρα σε μια επιφάνεια 6361,73 m². Περιστρέφεται με ονομαστική ταχύτητα 16,1 στροφές ανά λεπτό και μπορεί να παράξει την μέγιστη ισχύ του σε ένα εύρος ταχυτήτων μεταξύ 8,6 και 18,4 στροφών ανά λεπτό χάρη στην δυνατότητα μεταβλητών στροφών της γεννήτριας. Είναι κατασκευασμένος από πλαστικό fiberglass από την ίδια την Vestas. Φέρει 3 πτερύγια τα οποία είναι τοποθετημένα με μια κωνικότητα της τάξεως των 4° και περιστρέφονται με ωρολογιακή φορά. Με τα πτερύγια θα ασχοληθούμε στην επόμενη ενότητα. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η φωτογραφία του ρότορα της ανεμογεννήτριας V90 κατά την διάρκεια της συναρμολόγησης της.

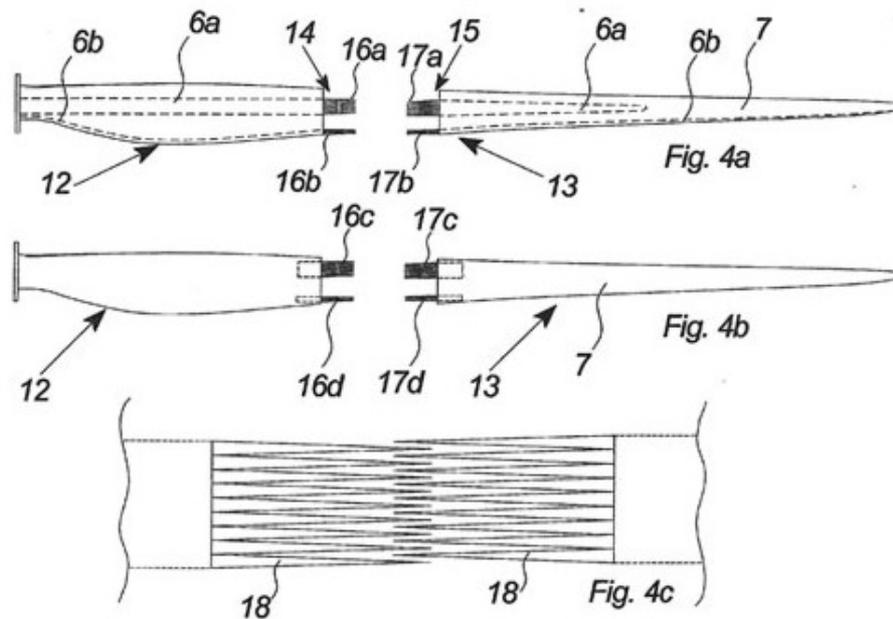


Εικόνα 4.29: Ρότορας ανεμογεννήτριας V90 κατά την διάρκεια συναρμολόγησης στο Kreuzstetten της Αυστρίας^[51]

4.2.3.1 Πτερύγια

Η V90 έχει τρία πτερύγια τοποθετημένα συμμετρικά στον ρότορα με μια κωνικότητα ίση με 4°. Είναι κατασκευασμένα από πλαστικό fiberglass. Κάθε πτερύγιο αποτελείται από δύο κομμάτια τα οποία είναι η ρίζα και η κορυφή και συγκολλούνται μεταξύ τους με την χρήση εποξικής κόλλας, ενισχυμένης με ίνες άνθρακα. Αυτή την μέθοδο την ανακάλυψε η ίδια η

Vestas και την έχει κατοχυρώσει και ως ευρεσιτεχνία. Ένα απλό διάγραμμα φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 4.30: Ευρεσιτεχνία της Vestas, κατασκευή του πτερυγίου σε δύο κομμάτια και σύνδεση του με εποξική ρητίνη^[52]

Στερεώνονται στον σύνδεσμο με την είσοδο της ρίζας τους μέσα σε αυτόν. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα και στην εικόνα της προηγούμενης σελίδας. Στο άκρο της ρίζας τους έχουν ένα ρουλεμάν το οποίο συναρμολογείται στην πλύμνη του φτερού δηλαδή στο hub. Έχουν αεροτομή τύπου RISÖ P + FFA – W3 και ικανότητα μεταβλητού pitch έτσι από -5° έως 90° έτσι ώστε να λειτουργούν και σαν αερόφρενα. Την λειτουργία τους αυτή την έχουμε αναλύσει σε προηγούμενη ενότητα. Ο σχεδιασμός τους είναι τέτοιος έτσι ώστε να είναι βέλτιστη η απόδοση τους παράγοντας ταυτόχρονα τον ελάχιστο δυνατό θόρυβο και μεταφέροντας όσο το δυνατό μικρότερα φορτία στον πυλώνα.

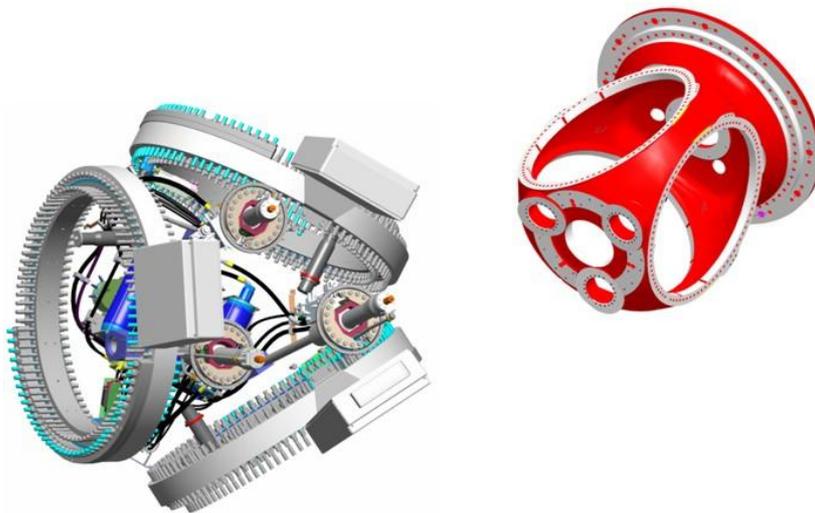
Το μήκος τους φτάνει τα 44 μέτρα, η χορδή της αεροτομής στην ρίζα είναι ίση με 3,512 μέτρα και η χορδή της αεροτομής στην κορυφή είναι ίση με 0,391 μέτρα. Στο πτερύγιο υπάρχει μια στροφή (twist) στην γωνία προσβολής από την κορυφή στην βάση της τάξεως των $17,5^{\circ}$. Στην κορυφή αναπτύσσεται ταχύτητα της τάξεως των 70 m/s. Κάθε πτερύγιο ζυγίζει περί τους 6,6 τόνους με μια διακύμανση της τάξεως των $\pm 0,4$ τόνων. Ένα πτερύγιο της V90 τοποθετημένο στο εργοστάσιο φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 4.31: Πτερύγιο ανεμογεννήτριας V90^[53]

4.2.3.2 Κόμβος σύνδεσης πτερυγίων – νασέλλας (hub)

Τα πτερύγια συνδέονται μέσω ενός συνδέσμου, του hub, με την διάταξη παραγωγής ισχύος. Ο σύνδεσμος αυτός έχει από την μια πλευρά τα πτερύγια τοποθετημένα συμμετρικά και από την άλλη πλευρά ενώνεται κατευθείαν με το κιβώτιο ταχυτήτων έτσι δεν υπάρχει μια άτρακτος χαμηλών στροφών με την παραδοσιακή έννοια της άτρακτου. Μπροστά από τον σύνδεσμο είναι τοποθετημένος ένας κώνος, ο κώνος μύτης έτσι ώστε να κάνει αεροδυναμικότερο το σχήμα της ανεμογεννήτριας μειώνοντας τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτήν. Μέσα από τον σύνδεσμο αυτό περνάει και το υδραυλικό σύστημα με το οποίο ρυθμίζονται οι γωνίες προσβολής των πτερυγίων. Είναι κατασκευασμένο από το υλικό GJS – 400 – 18U – LT, είναι τύπου cast iron και ζυγίζει 8 τόνους. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η κατασκευή του hub μαζί με όλα τα παρελκόμενα του.



Εικόνα 4.32: Κατασκευαστική διαμόρφωση του συνδέσμου hub^[19]

4.2.4 Συστήματα ασφαλείας

Για την ασφάλεια όλων των εξαρτημάτων που περιλαμβάνει μια ανεμογεννήτρια αλλά και του προσωπικού το οποίο μπορεί να τύχει να βρίσκεται στον χώρο είτε για συντήρηση είτε για εκπαίδευση – ενημέρωση χρησιμοποιούνται κάποια συστήματα ασφαλείας. Τα συστήματα αυτά είναι τρία, είναι ο διακόπτης ισχύος, η γείωση και η αντικεραυνική προστασία. Στις τρεις επόμενες ενότητες θα αναφερθούμε με λεπτομέρεια σε αυτά.

4.2.4.1 Διακόπτης ισχύος

Ο διακόπτης ισχύος είναι μια διάταξη ασφαλείας η οποία προστατεύει την ανεμογεννήτρια από σφάλματα στο δίκτυο όπως για παράδειγμα οι υψηλές εντάσεις. Η Vestas τον παρέχει ως προαιρετική επιλογή και μάλιστα σε δύο λειτουργίες, μια πιο ήπια (feeder function) και μια πιο δραστική (circuit breaker function). Είναι τεχνολογίας SF6 δηλαδή λειτουργεί με το αέριο SF6. Όταν το ρεύμα φτάσει ένταση 600 A τότε διακόπτει το κύκλωμα έτσι ώστε να μην καταστραφεί ο εξοπλισμός. Είναι συνδεδεμένος με τον διακόπτη και μπορεί να σταματήσει αμέσως την λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Ο διακόπτης ισχύος έχει ονομαστική τάση 24 ή 36 V, πλάτος 370/480mm ή 420/600 mm, ύψος 1400 ή 1800 mm, βάθος 850 mm και βάρος 135/218 ή 140/238 κιλά. Το πρώτο νούμερο, πριν την διαγώνιο γραμμή αφορά την λειτουργία feeder ενώ το δεύτερο νούμερο αφορά την λειτουργία circuit breaker. Για κάθε λειτουργία προτείνοντε δύο εναλλακτικές λύσεις διακοπών ισχύος, αναλόγως των επιθυμιών του πελάτη. Τα χαρακτηριστικά του φαίνοντε στον πίνακα που ακολουθεί.

Feeder Function

Rated voltage [kV] (Max. system voltage)	27	38
Rated current [A]	600	600
Short time withstand current (1 or 3 s) [kA]	25	25
Insulation level:		
Power frequency (1 min) [kV]	50	50
Lightning impulse [kV _{peak}]	125	150
Making capacity [kA _{peak}]	40	40
Breaking capacity:		
Mainly active current [A]	600	600

Circuit Breaker Function

Rated voltage [kV] (Max. system voltage)	27	38
Rated current [A]	600	600
Short time withstand current (1 or 3 s) [kA]	25	25
Insulation level:		
Power frequency (1 min) [kV]	50	50
Lightning impulse [kV _{peak}]	125	150
Making capacity [kA _{peak}]	40	40
Breaking capacity [kA]	25	25

Εικόνα 4.33: Χαρακτηριστικά μεγέθη διακοπών ισχύος^[23]

4.2.4.2 Γείωση

Η γείωση χρησιμοποιείται για την αύξηση της ασφάλειας, κυρίως του προσωπικού το οποίο εργάζεται στην ανεμογεννήτρια. Γίνεται με βάση τους κανονισμούς IEC 36413.2.2.1, IEC 413.1.3.2 και IEC 413.1.3.3. Ανεμογεννήτρια και μετασχηματιστής γειώνονται μαζί είτε με τον ουδέτερο ως καλώδιο γείωσης είτε με ένα ξεχωριστό γυμνό χάλκινο αγωγό διαμέτρου 50 mm². Σε περίπτωση υψηλών τάσεων τότε τάση θα διαφύγει από την γείωση στο έδαφος. Η σύνθετη αντίσταση στο κύκλωμα βραχυκυκλώματος θα μειωθεί και τότε ο κεντρικός διακόπτης θα λάβει ένα σήμα έτσι ώστε να σταματήσει την λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

Το σύστημα της γείωσης περιλαμβάνει και την περιμετρική γείωση της οποίας οι απαιτήσεις καθορίζονται αναλόγως του τύπου του εδάφους. Οι δύο ράβδοι που θα μπουν στην γη πρέπει να έχουν απόσταση 1 μέτρο από τα θεμέλια της ανεμογεννήτριας και να είναι τοποθετημένες στις αντιθετες πλευρές της ανεμογεννήτριας. Αν η ποιότητα του εδάφους δεν είναι αρκετά καλή (δεν έχει πολύ χαμηλή αντίσταση) τότε μπορώ είτε να βάλω ακόμα δύο ράβδους είτε να αυξήσω την απόσταση έως και τα 10 μέτρα είτε να κάνω και τα δύο.

4.2.4.3 Αντικεραυνική προστασία

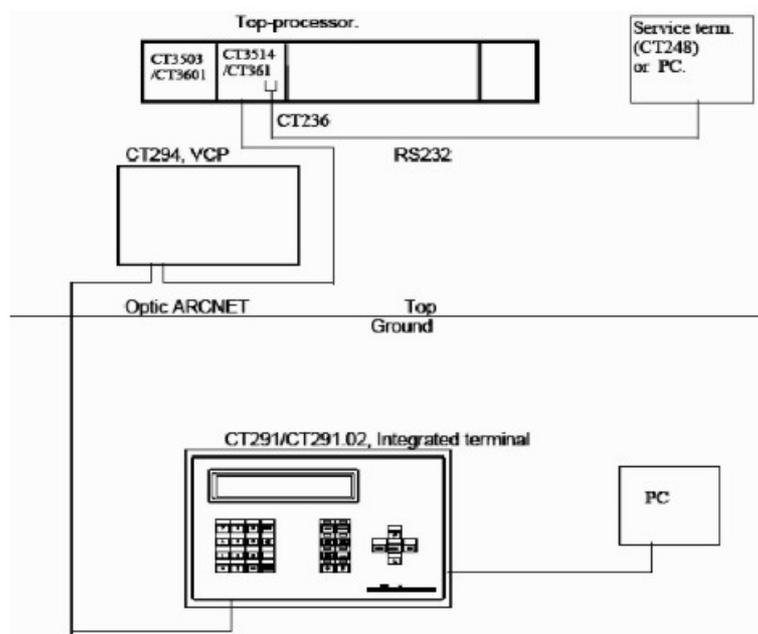
Η αντικεραυνική προστασία της V90 συμπεριλαμβάνει τόσο την νασέλλα όσο και τα τρία φτερά. Στην κορυφή κάθε φτερού και στο πίσω μέρος της νασέλλας έχει τους αισθητήρες ανίχνευσης κεραυνών. Οι αισθητήρες αυτοί επιτρέπουν στην μονάδα ελέγχου να ξέρει ακριβώς την στιγμή που χτυπάει ο κεραυνός πιο πτερύγιο κτυπήθηκε και πόσο ισχυρός ήταν ο κεραυνός.

Το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας σχεδιάστηκε με βάσει τον κανονισμό IEC 61024, πήρε το όνομα Vestas Lighting Protection και χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλα τα σύγχρονα μοντέλα ανεμογεννητριών της Vestas. Περιέχει χάλκινα καλώδια τα οποία επιτρέπουν στο ρεύμα υψηλής τάσης που προήλθε από τον κεραυνό να παρακάμψει όλα τα ζωτικής σημασίας εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας και να οδηγηθεί στο έδαφος.

4.2.5 Μονάδα ελέγχου

Μια μονάδα ελέγχου η οποία περιλαμβάνει ένα σύστημα μικροεπεξεργαστών, με το όνομα VMPC (Vestas Multi Processor Controller) ελέγχει και συντονίζει όλες τις λειτουργίες που κάνει η ανεμογεννήτρια. Ο κεντρικός ελεγκτής χωρίζεται σε πολλούς υποελεγκτές από τους οποίους ο κάθε ένας είναι υπεύθυνος για διαφορετική εργασία και επικοινωνούν μεταξύ

τους με το δίκτυο οπτικών ινών (Arc – net). Η εγκατάσταση της μονάδας ελέγχου είναι μέσα στην νασέλλα κυρίως (converter controller και top controller) αλλά τμήματα της υπάρχουν τόσο στον σύνδεσμο με τον ρότορα όσο και στον πυλώνα (ground controller ο οποίος ελέγχει τους κύριους διακόπτες). Πέρνει ενέργεια από το δίκτυο αλλά είναι εφοδιασμένη και με εφεδρικές μπαταρίες. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται σε ένα ενδεικτικό σχεδιάγραμμα ο τρόπος επικοινωνίας του τμήματος της μονάδας ελέγχου του πύργου (ground controller) με ένα από τα τμήματα της μονάδας ελέγχου που βρίσκεται στην νασέλλα (top controller).

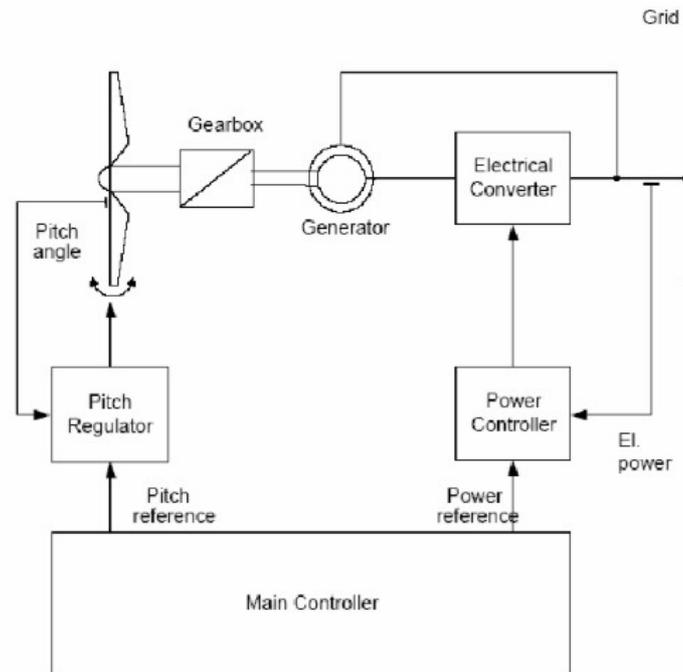


Εικόνα 4.34: Επικοινωνία με οπτικές ίνες δύο τμημάτων της μονάδας ελέγχου^[20]

Η μονάδα ελέγχου χρησιμοποιεί λειτουργικό σύστημα VxWorks σχεδιασμένο από την ίδια την Vestas έτσι ώστε να εξυπηρετεί πλήρως τις ανάγκες για ασφάλεια, σταθερότητα και ευελιξία που χρειάζεται μια ανεμογεννήτρια. Συλλέγει δεδομένα ταχυτήτων ρότορα και γεννήτριας, ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου, υδραυλικής πίεσης, θερμοκρασιών, τάσεως και άλλα τα οποία τα αποθηκεύει σε αρχεία καταγραφής για επιπλέον μελέτη από το αρμόδιο προσωπικό.

Η μονάδα ελέγχου είναι υπεύθυνη για μια σειρά λειτουργιών όπως ο συντονισμός και η επίβλεψη όλων των λειτουργιών των τμημάτων της ανεμογεννήτριας, ο συγχρονισμός της γεννήτριας με το δίκτυο, ο προσανατολισμός της ανεμογεννήτριας με βάση την φορά του

ανέμου, η λειτουργία του συστήματος OptiTip για μεταβολή του pitch αναλόγως της ταχύτητας του ανέμου, η σωστή λειτουργία της γεννήτριας ελέγχοντας την ανατροφοδοτούμενη ισχύ και την μεταβλητή ταχύτητα της, ο έλεγχος του θορύβου που παράγει η ανεμογεννήτρια και πολλές άλλες μικρότερης σημασίας. Το κεντρικό σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.^{[17], [18], [19], [20], [21], [22], [23], [24], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53]}



Εικόνα 4.35: Κεντρικό σύστημα ελέγχου ανεμογεννήτριας^[20]

4.3 Λειτουργία

Στην προηγούμενη ενότητα έχουν παρουσιαστεί όλα τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας V90. Τώρα θα ασχοληθούμε με την λειτουργία της. Την λειτουργία των επιμέρους συστημάτων την έχουμε δει κατά την περιγραφή τους. Εδώ θα δούμε την χαρακτηριστική ισχύος και την καμπύλη παραγωγής θορυβού της ανεμογεννήτριας.

Πρώτα όμως ας δούμε τις γενικές συνθήκες θερμοκρασίας και ανέμου που είναι απαραίτητες για να λειτουργήσει η V90. Η ανεμογεννήτρια μπορεί να λειτουργήσει σε όλες τις θερμοκρασίες μεταξύ $- 20^{\circ} \text{C}$ και $+ 40^{\circ} \text{C}$ άρα πρακτικά μπορεί να λειτουργήσει και τις τέσσερις εποχές του χρόνου στην χώρα μας. Η λειτουργία της σταματάει, μπαίνει σε κατάσταση λειτουργίας Pause εάν η θερμοκρασία στην νασέλλα ξεπεράσει τους 50°C . Η

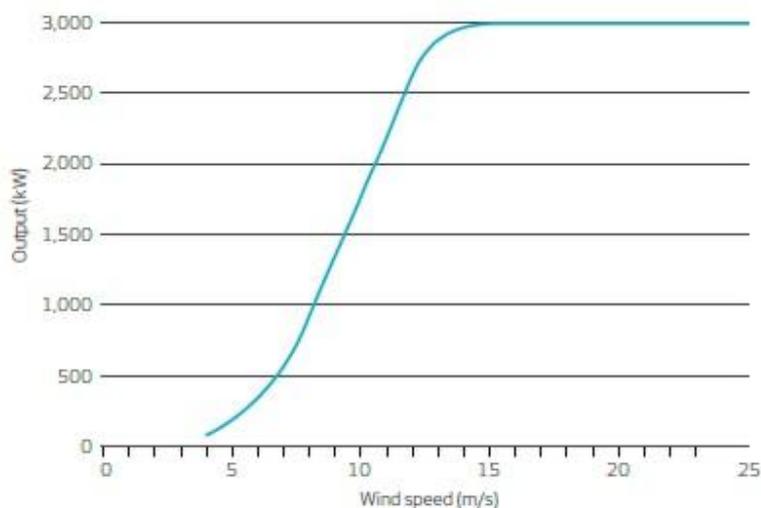
υγρασία δεν επηρεάζει την λειτουργία της, μπορεί να λειτουργήσει ακόμη και σε περιπτώσεις υγρασίας 100%.

Η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια με τον πυλώνα των 90 μέτρων είναι σχεδιασμένη να λειτουργεί για ισχυρούς ανέμους που ανήκουν στην κατηγορία IEC IA. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει ανέμους που περιγράφονται από την κατανομή Weibull (την έχουμε δει σε προηγούμενο κεφάλαιο), μέσης ταχύτητας 10 m/s και συντελεστή μορφής ίσο με 2 και μια μέση τύρβη ίση με 16%. Η ανεμογεννήτρια μας έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να λειτουργεί με ποσοστό τύρβης ανέμου 18% σε ταχύτητα ανέμου ίση με 15 m/s, μπορεί να λειτουργήσει για μέση ταχύτητα ανέμου ίση με 50 m/s για δέκα λεπτά χωρίς κίνδυνο καταστροφής και επίσης μπορεί να αντέξει διακυμάνσεις του ανέμου οι οποίες θα φτάνουν έως και τα 70 m/s για χρονικές στιγμές μικρότερες των τριών δευτερολέπτων.

Με βάση τα κατασκευαστικά και τα λειτουργικά της στοιχεία η ανεμογεννήτρια V90 πιστοποιήθηκε με βάσει τους διεθνείς κανονισμούς IEC WT01, DS 472, NVN 11400 – 0, DIBt Richtlinie für Windkraftanlagen και SITAC.

4.3.1 Χαρακτηριστική ισχύος

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο για την λειτουργία της ανεμογεννήτριας είναι η χαρακτηριστική ισχύος της. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται αυτή η χαρακτηριστική έτσι όπως την δίνει η εταιρία Vestas με το φυλλάδιο που συνοδεύει την ανεμογεννήτρια.

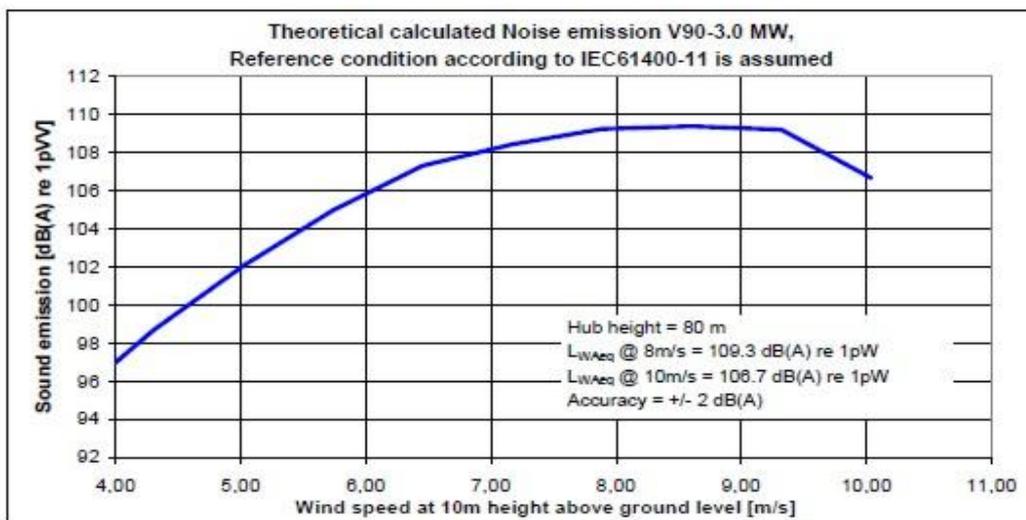


Εικόνα 4.36: Χαρακτηριστική ισχύος ανεμογεννήτριας V90 – 3MW^[17]

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο πρώτο μέρος της εργασίας μας υπάρχουν τρεις πολύ σημαντικές ταχύτητες ανέμου που καθορίζουν την ισχύ που παράγει η ανεμογεννήτρια μας. Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας της ανεμογεννήτριας μας (cut – in) είναι ίση με 4 m/s. Η ταχύτητα αποσύνδεσης της ανεμογεννήτριας μας από το δίκτυο (cut – out) είναι ίση με 25 m/s. Η ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας της ανεμογεννήτριας μας (rated speed) είναι ίση με 15 m/s. Για να ληφθεί αυτή η χαρακτηριστική χρησιμοποιήθηκε ως πυκνότητα του αέρα η τιμή $1,225\text{kg/m}^3$. Η ταχύτητα του αέρα στην οποία αναφερόμαστε είναι η μέση τιμή ταχύτητας για δέκα λεπτά και όχι στιγμιαία τιμή.

4.3.2 Καμπύλη θορύβου

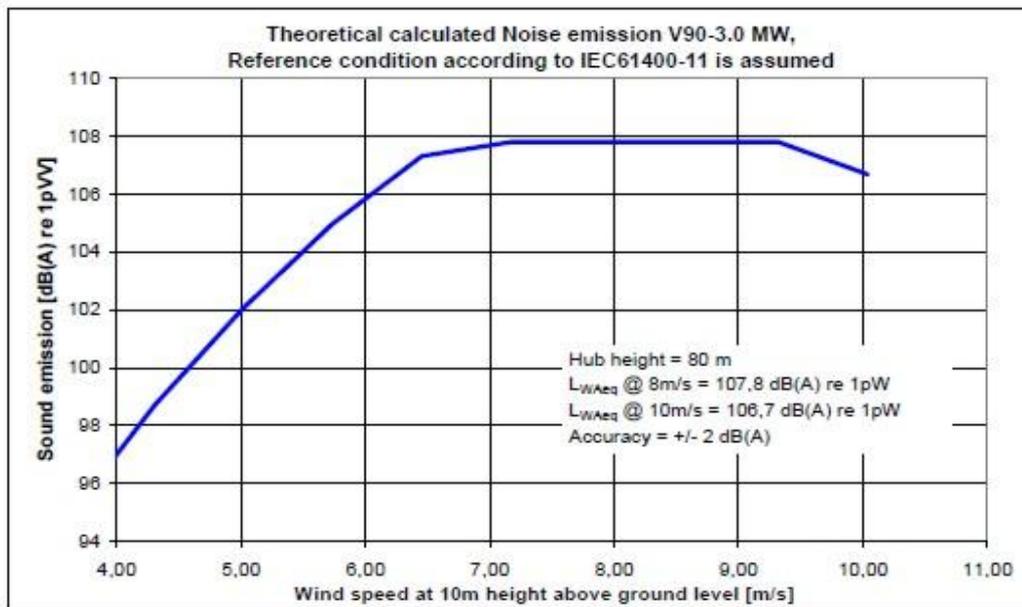
Η ανεμογεννήτρια κατά την λειτουργία της παράγει θόρυβο. Επειδή δεν είναι τοποθετημένες σε κατοικημένες περιοχές ανεχόμαστε παραγωγή υψηλών θορύβων της τάξεως των 100 decibel. Στην κανονική της λειτουργία έχει μετρηθεί ότι θόρυβος ξεπερνάει τα 109 db. Η μεταβολή του θορύβου συναρτηθεί της ταχύτητας του ανέμου δημιουργεί την καμπύλη θορυβου την οποία και παραθέτουμε παρακάτω.



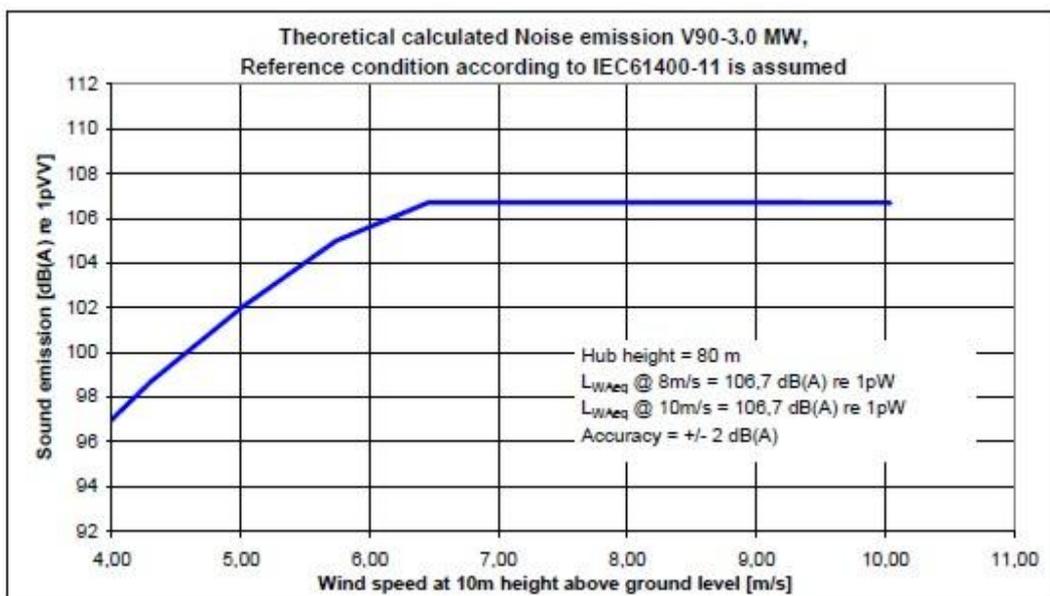
Εικόνα 4.37: Καμπύλη παραγωγής θορύβου για την κανονική λειτουργία της ανεμογεννήτριας^[23]

Η καμπύλη αυτή έχει υπολογιστεί για ανεμογεννήτρια με πύλωνα τοποθετημένο στα 80 μέτρα. Η κανονική λειτουργία της ανεμογεννήτριας ονομάζεται και mode 0. Εάν για οποιοδήποτε λόγο θέλουμε να παράγουμε θόρυβο χαμηλότερης έντασης τότε μπορούμε να επιλέξουμε τις λειτουργίες mode 1 και mode 2. Η καμπύλη θορύβου για αυτές τις δύο λειτουργίες φαίνεται παρακάτω. Παρατηρούμε ότι με αυτές τις λειτουργίες έχουμε θόρυβο της

τάξεως των 108 και 107 db αντίστοιχα. Υπάρχει μια ελαφρά μείωση στον μέγιστο θόρυβο αλλά όμως η περιοχή ταχυτήτων ανέμου για τις οποίες έχουμε υψηλότερο θόρυβο είναι πολύ μεγαλύτερη. Η μεταβολή στις λειτουργίες επηρεάζει λίγο και την καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας αλλά οι διαφορές είναι πολύ μικρές. Η διαφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των λειτουργιών mode 0 και mode 2 θα είναι της τάξεως των 400 MWh το έτος.^{[17], [23], [47]}



Εικόνα 4.38: Καμπύλη παραγωγής θορύβου για την λειτουργία mode 1 της ανεμογεννήτριας^[23]



Εικόνα 4.39: Καμπύλη παραγωγής θορύβου για την λειτουργία mode 2 της ανεμογεννήτριας^[23]

4.4 Συντήρηση

Η ανεμογεννήτρια, για να έχει πάντα όσο το δυνατό καλύτερη απόδοση, χρειάζεται συντήρηση. Η συντήρηση πρέπει να γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό και να τηρούντε πιστά όλοι οι κανόνες ασφαλείας έτσι ώστε να μην υπάρχουν κίνδυνοι ατυχημάτων. Η εταιρία θεωρεί αναγκαία την ύπαρξη τρίμηνης, εξάμηνης, δωδεκάμηνης και τετραετούς συντήρησης.

Η τρίμηνη συντήρηση γίνεται τρεις μήνες μετά την έναρξη λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και περιλαμβάνει έλεγχο των ηλεκτρικών μερών και έλεγχο και σύσφιξη στις βίδες αφού έχουν υποστεί την φθορά προσαρμογής. Η εξάμηνη συντήρηση γίνεται έξι μήνες μετά την έναρξη λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και επαναλαμβάνεται κάθε χρόνο, έξι μήνες μετά την ετήσια συντήρηση. Ελέγχονται μηχανικά και ηλεκτρικά μέρη, ελέγχεται η πίεση του υδραυλικού συστήματος και γίνονται όλα τα απαραίτητα γρασαρίσματα. Ένα έτος μετά την έναρξη λειτουργίας της μηχανής γίνεται η πρώτη ετήσια συντήρηση και επαναλαμβάνεται κάθε έτος. Γίνονται όλες οι εργασίες της εξάμηνης συντήρησης, ελέγχονται οι μετρητές πίεσης, αντικαθιστούνται φίλτρα και αλλάζουν τα λάδια λίπανσης του κιβωτίου ταχυτήτων και του συστήματος προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας. Η τετραετής συντήρηση γίνεται τέσσερα χρόνια μετά την έναρξη λειτουργίας της ανεμογεννήτριας και επαναλαμβάνεται κάθε τετραετία αντί της ετήσιας συντήρησης που θα έπρεπε να γίνει εκείνη την ημέρα. Περιλαμβάνει όλες της εργασίες συντήρησης της τρίμηνης και της ετήσιας συντήρησης. Περισσότερα για τις λειτουργίες συντήρησης ξεφεύγουν από τον σκοπό της παρούσας εργασίας.^{[18], [20]}

4.5 Οικονομικά μεγέθη

Ένας επενδυτής όταν καλείται να πάρει μια απόφαση για την ανεμογεννήτρια που θα χρησιμοποιήσει σε ένα αιολικό πάρκο το κάνει με γνώμονα το κέρδος. Η κοστολόγηση της ανεμογεννήτριας, της μεταφοράς και της μετασκευής της, της πλήρους ρύθμισης της και της παρακολούθησης της τιμολογείται διαφορετικά από κάθε εταιρία αναλόγως των σχέσεων της με τον συγκεκριμένο πελάτη. Για παράδειγμα η κατασκευάστρια εταιρία του αιολικού πάρκου στον Αχλαδόκαμπο EDF προμηθεύεται εδώ και χρόνια ανεμογεννήτριες από την εταιρία Vestas έτσι πιθανότατα θα έχει ευνοϊκή τιμολόγηση αυξάνοντας το κέρδος της. Η Vestas προσφέρει φθηνότερα τις ανεμογεννήτριες και όλες τις παρελκόμενες υπηρεσίες της στην EDF και έτσι έχει καταφέρει να έχει ένα πολύ μεγάλο ποσοστό διεισδυσης στην ελληνική αγορά. Με βάση τις σχέσεις των δύο συμβαλλομένων μερών δεν μπορεί να εκτιμηθεί ένα κόστος εγκατάστασης.

Αντιθέτως μπορεί να εκτιμηθεί το κόστος συντήρησης. Η εταιρία πέραν όλων των υπηρεσιών εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας παρέχει και πενταετή εγγύηση. Από εκεί και πέρα το κόστος συντήρησης βαραίνει τον επενδυτή ο οποίος είναι αναγκασμένος να πληρώνει 50000 ευρώ ετησίως για κάθε αιολική μηχανή. Η Vestas παρέχει δύο μηχανικούς για συντήρηση για κάθε δεκάδα ανεμογεννητριών και ο πελάτης πρέπει να έχει οποιοδήποτε επιπλέον προσωπικό του ζητήσει η εταιρία. Επίσης πρέπει να προμηθεύσει με τον απαραίτητο εξοπλισμό τους τεχνικούς της Vestas αλλά και να διαθέτει τα απαραίτητα ανταλλακτικά στις αποθήκες του. Το κόστος του εξοπλισμού και των ανταλλακτικών αντιστοιχεί περίπου σε 250000 ευρώ για δέκα ανεμογεννήτριες. Με βάση τα νούμερα αυτά μπορούμε να πούμε ότι για 10 ανεμογεννήτριες το κόστος συντήρησης μπορεί να φτάσει έως και τα 1000000 ευρώ.

Επιπροσθέτως ο επενδυτής επιβαρύνεται με το κόστος συντήρησης του οδικού δικτύου μεταξύ των ανεμογεννητριών και με το κόστος συντήρησης των υποσταθμών του δικτύου που εγκαθίσταντε για να τον εξυπηρετήσουν. Πέραν του κόστους συντήρησης των υποσταθμών υποχρεούτε να στέλνει και σημαντικά στατιστικά στοιχεία στην Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ).

Εν αντιθέσει με τα έξοδα συντήρησης, τα λειτουργικά έξοδα του αιολικού πάρκου είναι πολύ μικρά, τόσο που πολλές φορές δεν υπολογίζοντε καν στο ισοζύγιο εσόδων – εξόδων.

Τα έσοδα που έχουν οι επενδυτές είναι από μειωμένες τιμές από τις εταιρίες κατασκευής των ανεμογεννητριών σε περιπτώσει μεγάλων και συχνών παραγγελιών και αγορών συντήρησης και από την επιδότηση της παραγόμενης κιλοβατόρας και της εγγυημένης τιμής της για κάποια έτη που τους παρέχει η ελληνική κυβέρνηση. Αυτή την στιγμή η μεγαβατόρα αγοράζεται με μια τιμή της τάξεως των 85 ευρώ (87,85 ευρώ για το 2009). Για μια μικρή ταχύτητα ανέμου της τάξεως των 5 m/s (αν πάμε στην καμπύλη ισχύος βλέπουμε ότι μόλις μπήκε σε λειτουργία η ανεμογεννήτρια) κάθε ανεμογεννήτρια V90 παράγει γύρω στις 3000 MWh το έτος ο επενδυτής θα κερδίσει περί τα 250000 ευρώ. Σε ένα πάρκο με δέκα ανεμογεννήτριες υπερκαλύπτει κατά 2,5 φορές το κόστος συντήρησης. Και όλα αυτά με μικρή ταχύτητα ανέμου. Αν αυξηθεί η ταχύτητα πολλαπλασιάζεται το κέρδος έτσι για ταχύτητες ανέμου 10 m/s κάθε ανεμογεννήτρια αποφέρει έσοδα γύρω στο 1000000 ευρώ αφού παράγει περισσότερες από 11000 MWh ανά έτος. Αυτό είναι και ο κύριος λόγος που είναι συμφέρουσα αυτή η επένδυση.^{[20], [23], [25]}

Κεφάλαιο 5

5 Η τοποθεσία και το αιολικό πάρκο

5.1 Η τοποθεσία

Η τοποθεσία του αιολικού πάρκου είναι πολύ σημαντική έτσι ώστε να υπάρχει η βέλτιστη δυνατή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η βέλτιστη αξιοποίηση των δυνατοτήτων της ανεμογεννήτριας μας. Στην πρώτη ενότητα του κεφαλαίου αυτού θα προσπαθήσουμε να γνωρίσουμε την τοποθεσία γύρω από το χωριό Αχλαδόκαμπος έτσι ώστε να μπορέσουμε να αντιληφθούμε τα πλεονεκτήματα που μας προσφέρει και το επιλέξαμε για να γίνει εκεί η επένδυση μας. Θα δούμε στοιχεία σχετικά με το χωριό και την μορφολογία της περιοχής και στην συνέχεια θα δούμε το αιολικό δυναμικό της περιοχής.

5.1.1 Η κοινότητα του Αχλαδόκαμπου

Η κοινότητα του Αχλαδόκαμπου βρίσκεται στην νοτιοανατολική Πελοπόννησο, στο βορειοδυτικό άκρο του νομού Αργολίδος στις πλαγιές του βουνού Αρτεμίσιο, σε υψόμετρο 450 μέτρων. Υπάγεται διοικητικά στην νεοσύστατη περιφέρεια Πελοποννήσου στην επαρχία Αργολίδος. Δεν ανήκει σε κάποιο δήμο, είναι ξεχωριστή κοινότητα. Αποτελείται από ένα δημοτικό διαμέρισμα, καταλαμβάνει έκταση 105,9 km² και έχει πληθυσμό 654 κατοίκων. Δημιουργήθηκε κατά την περίοδο της τουρκοκρατίας από διάφορους κτηνοτροφικούς και γεωργικούς οικισμούς της περιοχής. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ο χάρτης του νομού Αργολίδος και η τοποθέτηση της κοινότητας του Αχλαδόκαμπου σε αυτόν.



Εικόνα 5.1: Με κόκκινο χρώμα τοποθετείται στον χάρτη η κοινότητα Αχλαδόκαμπου^[54]

Από τον χάρτη φαίνεται ότι το χωριό έχει θέα και πρόσβαση στον αργολικό κόλπο ενώ στην φωτογραφία παρακάτω φαίνεται η τοποθέτηση του στις πλαγές ενός λόφου. Αυτά τα δύο μορφολογικά χαρακτηριστικά της τοποθεσίας είναι πολύ ενδιαφέροντα και θα μας απασχολήσουν στην συνέχεια καθώς είναι δύο από τους παράγοντες που μας ώθησαν στην επιλογή αυτής της τοποθεσίας για την τοποθέτηση του αιολικού παρκου.

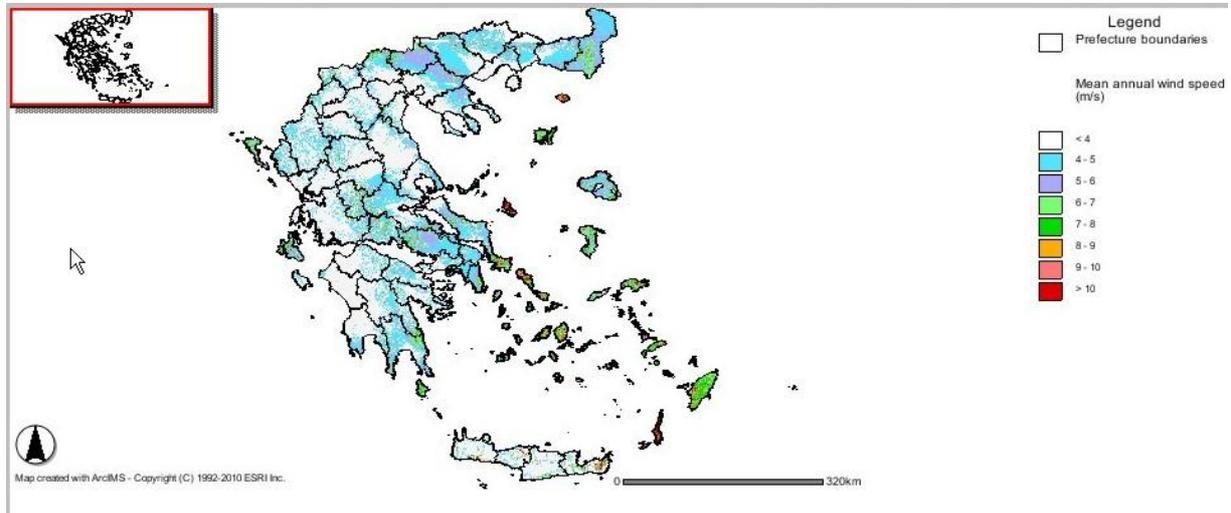


Εικόνα 5.2: Χωριό Αχλαδόκαμπος και αιολικό πάρκο στο βουνό από πίσω^[55]

5.1.2 Το αιολικό δυναμικό της περιοχής

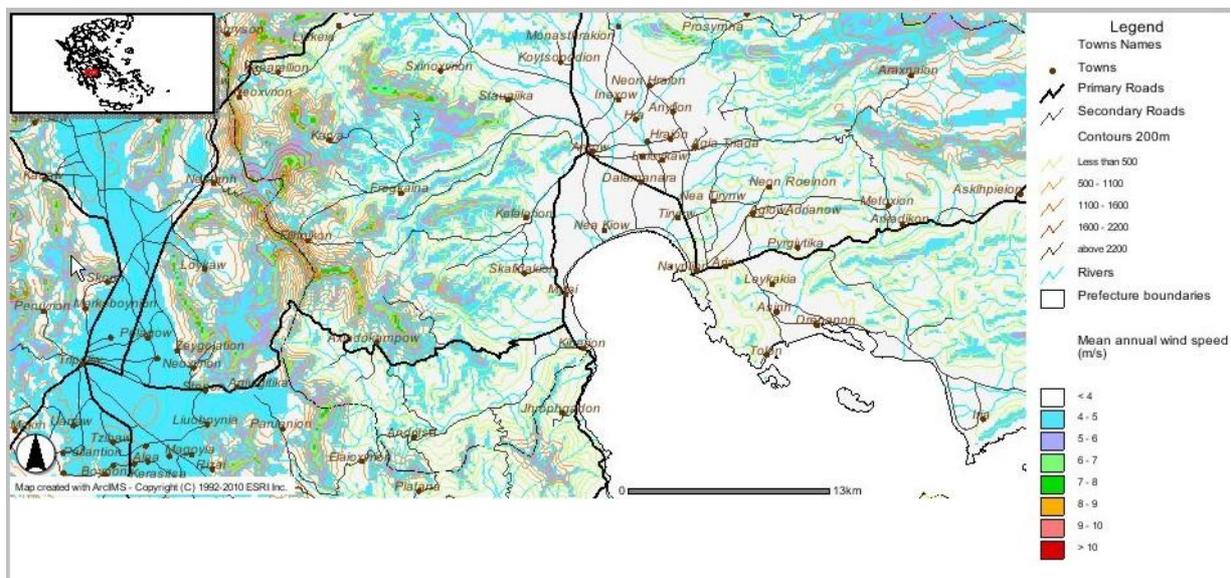
Στην αρχή της εργασίας μας είχαμε αναφερθεί στο αιολικό δυναμικό και εξηγήσαμε ότι ένα μέρος αυτού είναι εκμεταλλεύσιμο. Το υψηλό αιολικό δυναμικό μιας περιοχής την καθιστά αυτόματα ελκυστική για αιολικές επενδύσεις, είναι ένα από τα πρώτα κριτήρια που εξετάζουν οι υποψήφιοι επενδυτές πριν καταλήξουν στην τοποθέτηση του αιολικού τους πάρκου. Ποιο είναι το αιολικό δυναμικό στην περιοχή του Αχλαδόκαμπου που την καθιστά ελκυστική; Όπως ήδη έχουμε αναφέρει η Ελλάδα θεωρείται από τις πλουσιότερες χώρες στον πλανήτη σε αιολικό δυναμικό. Ειδικά στην θαλάσσια περιοχή του Αιγαίου υπάρχει αιολικό δυναμικό από τα μεγαλύτερα στον ευρωπαϊκό χώρο. Στην περιοχή της Αργολίδας όμως πόσο είναι το αιολικό δυναμικό; Στον παρακάτω χάρτη φαίνεται το τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό όλης της χώρας (ασχολούμαστε μόνο με το τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό καθώς δεν μας

νοιάζει αυτό το οποίο δεν μπορούμε να εκμεταλλευτούμε). Τον χάρτη τον παρέχει το κέντρο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΚΑΠΕ) στην ιστοσελίδα του.



Εικόνα 5.3: Χάρτης τεχνικά αξιοποιήσιμου αιολικού δυναμικού Ελλάδος^[56]

Με μια πρώτη όψη στην περιοχή της αργολίδας φαίνεται χαμηλό τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό με ταχύτητες ανέμων της τάξεως των 4 με 5 m/s. Εάν όμως μεγενθύνουμε τον χάρτη στην περιοχή βλέπουμε αυξημένο αιολικό δυναμικό σε κάποια συγκεκριμένα σημεία. Ας δούμε τις επόμενες δύο φωτογραφίες από την περιοχή.



Εικόνα 5.4: Τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό στα βορειοδυτικά του νομού Αργολίδας^[56]

Σε αυτή την φωτογραφία μπορούμε να διακρίνουμε μια περιοχή με ανέμους αυξημένης έντασης γύρω από το χωριό του Αχλαδόκαμπου και γενικά στις κορυφές των βουνών γύρω από την κοιλάδα που υπάρχει στην περιοχή. Με ακόμη μια μεγένθυση που φαίνεται στην επόμενη φωτογραφία παρατηρούμε ότι στην κορυφή του βουνού πίσω από το χωριό (εκεί που βρίσκεται το αιολικό πάρκο της φωτογραφίας που είδαμε πιο πριν) το τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό είναι αυξημένο, εμφανίζοντε ταχύτητες 7 έως 8 m/s ενώ στο βουνό πίσω και αριστερά του χωριού η ταχύτητα του ανέμου φτάνει έως και τα 9 m/s.



Εικόνα 5.5: Τεχνικά αξιοποιήσιμο δυναμικό γύρω από την κοινότητα του Αχλαδόκαμπου^[56]

Στο τέλος της προηγούμενης ενότητας είχαν αναφερθεί δύο πολύ σημαντικά μορφολογικά στοιχεία. Η περιοχή βρίσκεται κοντά στον αργολικό κόλπο με αποτέλεσμα ο άνεμος που έρχεται μέσω της θάλασσας να μην συναντάει εμπόδια (η τραχύτητα του νερού είναι πολύ μικρή) και να έχει την μεγαλύτερη δυνατή ταχύτητα. Η περιοχή βρίσκεται στην πλαγιά ενός λόφου. Όπως είδαμε στο δεύτερο κεφάλαιο, εάν το βουνό δεν είναι πολύ απότομο τότε μπορεί έως και να διπλασιαστεί η ταχύτητα του ανέμου (δες εικόνα 2.8). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολύ μεγάλες ταχύτητες στις κορυφές των λόφων γύρω από την περιοχή έτσι κρίνετε κερδοφόρα η κατασκευή αιολικού πάρκου σε αυτές τις λοφοσειρές. Ήδη τέσσερα αιολικά πάρκα είναι κατασκευασμένα στην ευρύτερη περιοχή εκμεταλλευόμενα αυτά τα μορφολογικά πλεονεκτήματα. Σύμφωνα με οδηγία της ΡΑΕ στην ευρύτερη περιοχή της κοινότητας μπορούν να τοποθετηθούν έως και 70 τυπικές ανεμογεννήτριες. Στην επόμενη

φωτογραφία φαίνονται οι ανεμογεννήτριες του πάρκου μας τοποθετημένες σε λοφοσειρά στην περιοχή του Αχλαδόκαμπου.^{[54], [55], [56], [57], [58]}



Εικόνα 5.6: Ανεμογεννήτριες V90 σε λοφοσειρά στον Αχλαδόκαμπο

5.2 Αιολικό πάρκο

Στην ενότητα αυτή θα δούμε τα κατασκευαστικά και τα οικονομικά στοιχεία ενός αιολικού πάρκου και θα τα εξειδικεύσουμε για το υπό μελέτη αιολικό πάρκο στον Αχλαδόκαμπο. Τέλος θα δούμε τις πιθανές επιπτώσεις που μπορεί να φέρει στην περιοχή. Το αιολικό παρκο του Αχλαδόκαμπου έχει συνολική ισχύ 42 MW καθώς αποτελείται από 14 ανεμογεννήτριες V90 ισχύος 3 MW έκαστη.

5.2.1 Κατασκευαστικά στάδια ανάπτυξης αιολικού πάρκου

Για την κατασκευή ενός αιολικού πάρκου πρέπει να παρθούν καταρχήν κάποιες αποφάσεις σχετικά με τον χώρο κατασκευής του. Αφού αποφασιστεί η γενική χωροθέτηση ενός αιολικού πάρκου πρέπει να αποφασιστεί και η εσωτερική του χωροθέτηση δηλαδή η τοποθέτηση

των ανεμογεννητριών, των εσωτερικών δρόμων κλπ. Στην συνέχεια πρέπει να μελετηθεί και να κατασκευαστεί ο δρόμος πρόσβασης σε αυτό. Τέλος πρέπει να προβλεφθεί και να κατασκευαστεί η διασύνδεση του με το ηλεκτρικό δίκτυο της περιοχής.

Οι επιλογές αυτές πρέπει να γίνουν με κάποια κριτήρια. Τα σημαντικότερα των κριτηρίων είναι η οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης, η περιβαλλοντική εναρμόνιση, η ασφάλεια, λειτουργικότητα και η τεχνική αρτιότητα του πάρκου. Στην συνέχεια θα δούμε τους παράγοντες που επηρεάζουν τις κατασκευαστικές αποφάσεις.

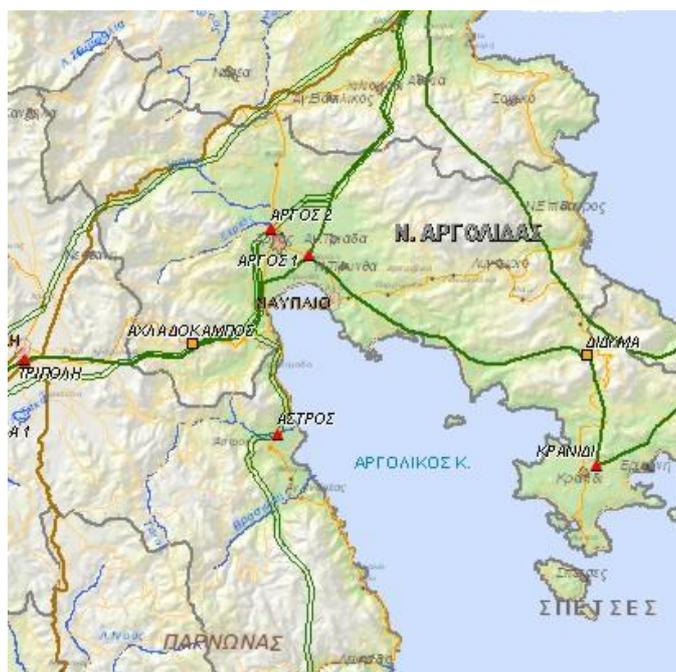
5.2.1.1 Γενική χωροθέτηση αιολικού πάρκου

Η χωροθέτηση ενός αιολικού πάρκου είναι μια πολύ δύσκολη υπόθεση γιατί επηρεάζεται από μια πλειάδα παραγόντων. Κάποιοι από αυτούς τους παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την απόφαση μας είναι το αιολικό δυναμικό της περιοχής, η χρονική διάρκεια στην οποία θα μπορούμε να εκμεταλλευτούμε την αιολική ενέργεια, η ιδιοκτησία της περιοχής στην οποία γίνει η εγκατάσταση, η θέση του πάρκου σε σχέση με το υφιστάμενο οδικό δίκτυο και σε σχέση με το υφιστάμενο ηλεκτρικό δίκτυο, η θέση του σε σχέση με κατοικημένες περιοχές, η θέση του σε σχέση με χώρους μεγάλης περιβαλλοντικής σημασίας, και η δυνατότητα ενσωμάτωσης του στο περιβάλλον της περιοχής.

Εξετάζοντας όλους τους παραπάνω παράγοντες πρέπει να αποφασιστεί μια λύση κατασκευής του πάρκου σε ένα χώρο ο οποίος θα εξασφαλίζει ικανό αιολικό δυναμικό έτσι ώστε να μπορεί να λειτουργήσει και να είναι αποδοτική και προσοδοφόρα η επένδυση, την προσβασιμότητα σε αυτό, την δυνατότητα αξιοποίησης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει, τις βέλτιστες δυνατές συνθήκες ασφάλειας και την προστασία του φυσικού αλλά και του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος της περιοχής. Η εξασφάλιση πάντως του υψηλότερου αιολικού δυναμικού είναι ο σημαντικότερος από τους παράγοντες που πρέπει να ληφθεί υπόψη.

Ο επιλεγμένος χώρος στον Αχλαδόκαμπο προσφέρει πολλά από τα ζητούμενα έτσι ώστε να επιλεγθεί ως χώρος κατασκευής αιολικού πάρκου. Καταρχήν έχει ένα πολύ υψηλό τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό το οποίο αναλύσαμε στην προηγούμενη ενότητα. Δεύτερον, γειτνιάζει με τον οικισμό του Αχλαδόκαμπου έτσι μπορεί να χαρακτηί εύκολα οδικό δίκτυο μέχρι την κορυφή του λόφου χωρίς πολλές παρεμβάσεις και μεγάλο κόστος. Η γειτνίαση του με την κοινότητα προσφέρει και εύκολη πρόσβαση στο δίκτυο της ΔΕΗ έτσι ώστε να διαθέσει τις

παραγόμενες κιλοβατώρες. Στον χάρτη που επισυνάπτεται στο τέλος της παραγράφου φαίνεται η διέλευση γραμμής υψηλής ισχύος δίπλα από το χωριό. Τρίτον, ακόμη υπήρχε η δυνατότητα για τοποθέτηση ανεμογεννητριών στην περιοχή καθώς δεν είχε συμπληρωθεί ο μέγιστος αριθμός έτσι όπως το έχει καθορίσει η ΡΑΕ. Τέταρτον, η τοποθέτηση του επάνω στην κορυφή των λόφων εξασφάλιζε την μη ύπαρξη ιδιοκτησιών από ιδιώτες και την μη χρήση γης για γεωργικούς σκοπούς έτσι αναμένονταν μειωμένες αντιδράσεις των κατοίκων. Πέμπτον, η προκύρυξη της περιοχής ως εκμεταλλεύσιμης για εκμεταλλευση της αιολικής ενέργειας (έχει οριστεί ως ΠΑΚ δηλαδή περιοχή αιολικής καταλληλότητας) κάνει πολύ πιο εύκολη της αδειοδότηση του έργου. Έκτον, η μη ύπαρξη αρχαιολογικών χώρων, εθνικών δρυμών ή άλλων προστατευόμενων περιοχών και στρατιωτικών χώρων στην ευρεία περιοχή της κοινότητας ευνοεί την τοποθέτηση του αιολικού πάρκου. Το μόνο πρόβλημα είναι ότι η απόσταση με το χωριό είναι αρκετά μικρή και οι ανεμογεννήτριες φαίνονται από τα σπίτια έτσι προκαλούν αισθητική όχληση πέραν του θορύβου ο οποίος λόγω της απόστασης δεν φτάνει στους κατοίκους.



Εικόνα 5.7: Δίκτυο ΔΕΗ στην περιοχή του Αχλαδόκαμπου^[59]

5.2.1.2 Εσωτερική χωροθέτηση αιολικού πάρκου

Η εσωτερική χωροθέτηση του αιολικού πάρκου εξαρτάτε κυρίως από τις ανεμογεννήτριες που θα χρησιμοποιηθούν και από το ανάγλυφο της περιοχής. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την εσωτερική χωροθέτηση είναι η δυνατότητα κατασκευής δρόμων πρόσβασης

σε κάθε ανεμογεννήτρια, η έκταση της κορυφογραμμής, περιορισμοί αποστάσεων ασφαλείας από διάφορες υποδομές της περιοχής, αποφυγή σκίασης οικιών η οποία δημιουργεί αντίδραση των κατοίκων κλπ. Στόχος είναι η τοποθέτηση όσο το δυνατό περισσότερων ανεμογεννητριών για παραγωγή περισσότερης ηλεκτρικής ενέργειας και αύξηση του κέρδους.

Η ανεμογεννήτρια V90 που χρησιμοποιείται μπορεί να μπει δίπλα από μια άλλη αν η μαξύ τους απόσταση είναι τουλάχιστον ίση με πέντε διαμέτρους του ρότορα δηλαδή τουλάχιστον 450 μέτρα. Αυτό το νούμερο το δίνει η ίδια η Vestas θεωρώντας ότι από αυτή την απόσταση και πέρα ελαχιστοποιούνται οι απώλειες λόγω επικάλυψης (wake losses) μεταξύ των γειτονικών ροϊκών πεδίων. Πέραν αυτού ο λόφος είναι αρκετα ομαλός και δεν θα υπάρξει δυσκολία στην δημιουργία των έργων τοποθέτησης και θεμελίωσης των ανεμογεννητριών ούτε στην σχεδίαση ενός δικτύου πρόσβασης στις μηχανές, απαιτούντε μονάχα κάποια χωματουργικά έργα με πολύ μικρό οικονομικό κόστος. Με βάση το μήκος της κορυφογραμμής θα τοποθετηθούν 11 ανεμογεννήτριες V90 σε μια απόσταση πέραν των 5 km. Διάφορες υποδομές δεν υπάρχουν κοντά έτσι δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός σχετικά με αυτό. Επίσης δεν υπάρχει κάποιος περιορισμός σχετικά με την σκίαση των οικιών καθώς το πάρκο είναι τοποθετημένο βόρεια του χωριού έτσι δεν υπάρχει πρόβλημα ούτε κατά την ανατολή ούτε κατά την δύση του ηλίου.



Εικόνα 5.8: Η ομαλότητα του λόφου πάνω από το χωριό προσφέρει ευκολία στην κατασκευή των δρόμων προσέγγισης των ανεμογεννητριών

5.2.1.3 Οδική πρόσβαση και πρόσβαση στο δίκτυο της ΔΕΗ

Αφού γίνει η γενική και η εσωτερική χωροθέτηση του αιολικού πάρκου το μόνο που μένει είναι ο σχεδιασμός της σύνδεσης με το οδικό δίκτυο και η διασύνδεση του πάρκου με το δίκτυο της ΔΕΗ. Η παρουσία του οικισμού του Αχλαδόκαμπου πολύ κοντά στον πάρκο ευκολύνει πάρα πολύ τον σχεδιασμό του οδικού δικτύου και την πρόσβαση στο δίκτυο της ΔΕΗ αφού δεν χρειάζονται μεγάλες παρεμβάσεις για να προσεγγιστούν οι ανεμογεννήτριες.

5.2.2 Επιπτώσεις της κατασκευής του αιολικού πάρκου στην ευρύτερη περιοχή

Η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου, όπως και κάθε «ξένου» έργου, σε μια περιοχή έχει σίγουρα κάποιες επιπτώσεις. Το θέμα είναι να είναι τέτοια η κατασκευή του πάρκου, να γίνει σωστά, έτσι ώστε να μειωθούν στο ελάχιστο οι επιπτώσεις.

5.2.2.1 Οπτική όχληση

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που προκαλεί ένα αιολικό παρκο στους κατοίκους της περιοχής είναι η οπτική όχληση καθώς οι ανεμογεννήτριες, λόγω του μεγάλου ύψους τους φαίνονται από πολύ μακρινές αποστάσεις. Η ανάγκη για κάθετη πρόσπτωση του ανέμου στα πτερύγια οδηγεί στην τοποθέτηση τους ακριβώς πάνω στον ορίζοντα έτσι είναι ορατές από πολύ μεγάλες αποστάσεις. Επίσης η πληθώρα των ανεμογεννητριών που θα χρησιμοποιηθούν στην περιοχή (αναμένεται να χρησιμοποιηθούν σχεδόν όλες οι θέσεις που επιτρέπεται γιατί είναι ιδιαίτερα κερδοφόρες) επιβαρύνει και άλλο την οπτική όχληση. Βέβαια στην περιοχή ο χώρος είναι ανοικτός έτσι δεν προκαλεί τόσο άσχημη εντύπωση όση θα προκαλούσε εάν γινόταν σε ένα πολύ πιο κλειστό χώρο. Η οπτική όχληση συνήθως προκαλεί και τις μεγαλύτερες αντιδράσεις των κατοίκων για την κατασκευή ενός τέτοιου έργου καθώς δεν έχουν συνηθίσει να βλέπουν τέτοιες κατασκευές δίπλα από το σπίτι τους αλλά είναι τελείως υποκειμενική.

5.2.2.2 Ακουστική όχληση

Η ακουστική όχληση είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την κατασκευή ενός αιολικού πάρκου κοντά σε μια κατοικημένη περιοχή όπως το δικό μας. Η χρήση της ανεμογεννήτριας Vestas V90, μιας ανεμογεννήτριας προηγμένης τεχνολογίας μειώνει την πιθανή ηχορύπανση της περιοχής. Η ανεμογεννήτρια αυτή παράγει θόρυβο της τάξεως των 100 db όπως είδαμε σε σχετική προηγούμενη ενότητα όμως δεν είναι αυτός ο θόρυβος που φτάνει στα αυτιά των κατοίκων. Οι κάτοικοι αντιλαμβάνονται πολύ μικρότερο θορύβο και αυτό γιατί σε υψηλές

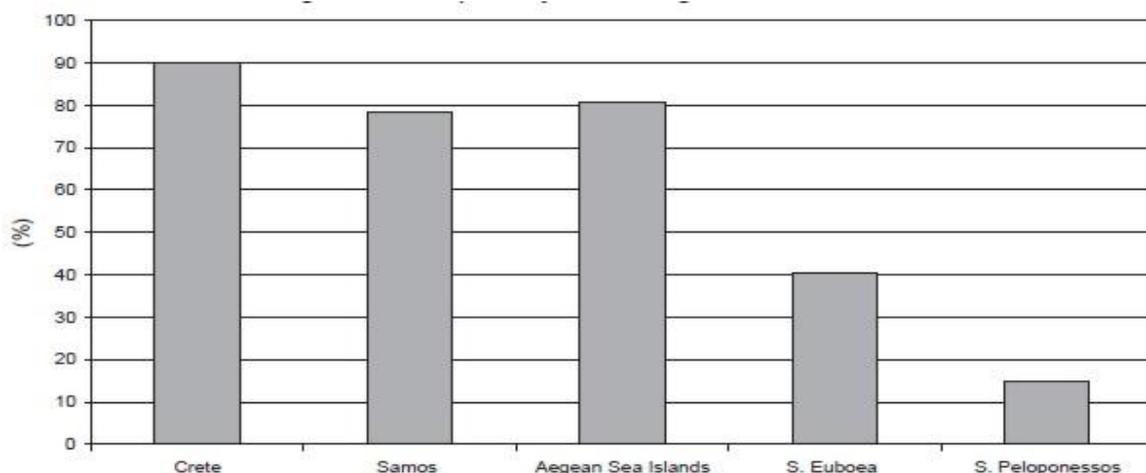
ταχύτητες ο αέρας κάνει και αυτός μεγάλο θόρυβο έτσι επικαλύπτει τον θόρυβο της ανεμογεννήτριας. Οι δυνατότητες της V90, που επιλέχθηκε, για λειτουργία σε δύο καταστάσεις χαμηλότερης παραγωγής θορύβου της δίνουν την δυνατότητα να ρυθμίσει τον θόρυβο που παράγει αναλόγως των αντιδράσεων των κατοίκων.

5.2.2.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

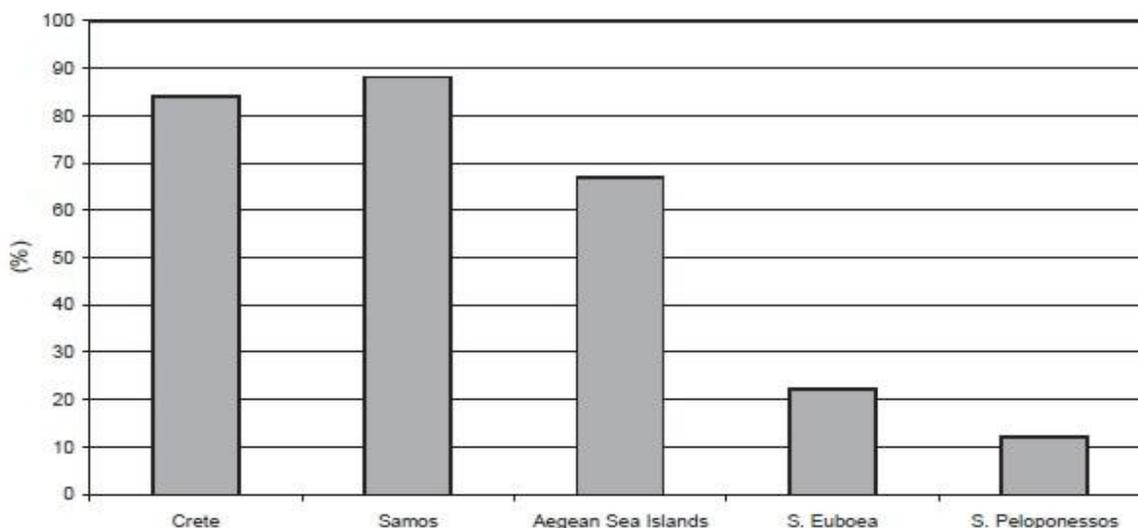
Οι επιπτώσεις στο περιβάλλον ενός αιολικού πάρκου έχουν πολλές εκφάνσεις. Μπορεί να είναι επιπτώσεις σχετικά με την πανίδα ή την χλωρίδα, σχετικά με το έδαφος, ή και στην χρήση και την αξία της γης. Στην πανίδα οι επιπτώσεις έχουν να κάνουν κυρίως με τα πουλιά γιατί συγκρούονται με τα πτερόγια και σκοτώνονται. Για να αποτραπεί αυτό χρησιμοποιούνται ειδικές συσκευές που εκπέμπουν ακτινοβολία και απωθούν τα πουλιά. Έτσι όμως δημιουργείται αλλά πρόβλημα, της μετανάστευσης πουλιών τα οποία μέχρι τώρα ζούσαν σε αυτή την περιοχή. Στην χλωρίδα οι επιπτώσεις είναι σχετικά μικρές γιατί συνήθως οι ανεμογεννήτριες τοποθετούντε σε περιοχές με χαμηλή έως καθόλου βλάστηση έτσι ώστε η τραχύτητα του εδάφους να είναι όσο το δυνατό μικρότερη. Αυτό συμβαίνει και στον Αχλαδόκαμπο. Κατά την κατασκευή του αιολικού πάρκου οι παρεμβάσεις στο έδαφος δεν θα είναι μεγάλες, θα γίνουν μόνο κάποια χωματουργικά έργα για την τοποθέτηση και την θεμελίωση των ανεμογεννητριών και η διανοίξη των δρόμων έτσι οι επιπτώσεις δεν θα είναι μεγάλες. Αντίθετα με το έδαφος η υπέρξη αιολικού πάρκου αλλάζει τις χρήσεις της γης αφού πολλοί κάτοικοι είναι απρόθυμοι να συνεχίσουν τις δραστηριότητες τους κοντά στις ανεμογεννήτριες. Στον Αχλαδόκαμπο το πρόβλημα αυτό δεν υφίστατε καθώς στον λόφο δεν υπήρχε κάποιας μορφής χρήση της γης έτσι δεν έχει αλλάξει κάτι. Το μόνο που έχει αλλάξει είναι η αξία της γης γιατί οι κάτοικοι πλέον δεν κτίζουν προς το πάνω μέρος του χωριού, κτίζουν προς το κάτω για να απομακρυνθούν όσο είναι δυνατό από τις ανεμογεννήτριες.

Η μείωση των επιπτώσεων που προκαλούν τα αιολικά πάρκα είναι ζωτικής σημασίας για δύο λόγους. Ο πρώτος λόγος είναι καθαρά για την υγεία των ανθρώπων και την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος. Ο δεύτερος λόγος είναι καθαρά τεχνοκρατικός. Εάν μειωθούν οι επιπτώσεις του αιολικού πάρκου στην περιοχή τότε θα γίνει πολύ πιο εύκολα αποδεκτό στους κατοίκους. Μην ξεχνάμε ότι μιλάμε για επαρχιακή περιοχή στην οποία οι κάτοικοι είναι λιγότερο εξοικιωμένα με την σύγχρονη τεχνολογία και ότιδήποτε διαταράσσει το περιβάλλον τους βρίσκει αντίθετους. Σε μετρήσεις έχει βρεθεί ότι οι κάτοικοι της Πελοποννήσου

παρουσιάζουν μια έντονη αρνητικότητα στην αποδοχή των αιολικών πάρκων, θέμα το οποίο μάλλον έχει να κάνει με την ιδιοσυγκρασία τους. Ο αρνητισμός και η μη αποδοχή δεν περιορίζεται μόνο σε νέα πάρκα όπου ο φόβος του αγνώστου προδιαθέτει αρνητικά αλλά διευρύνεται και στα ήδη εγκατεστημένα έργα γεγονός που δείχνει ότι η λειτουργία τους στον χώρο δεν κατάφερε να πείσει τους κατοίκους. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται ακριβώς αυτό, η μη αποδοχή των αιολικών πάρκων από τους κατοίκους της νότιας Πελοποννήσου.



Εικόνα 5.9: Ποσοστό απόδοχής υφιστάμενων αιολικών πάρκων σε 5 περιοχές της χώρας^[25]



Εικόνα 5.10: Ποσοστό αποδοχής νέων αιολικών πάρκων σε 5 περιοχές της χώρας^[25]

Με την ενότητα αυτή έχει τελειώσει η περιγραφή της κατασκευής του αιολικού παρκου του Αχλαδόκαμπου, των οικονομικών μεγεθών του και των επιπτώσεων του στους ανθρώπους και στο περιβάλλον.^{[6], [12], [25], [59]}

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία:

1. BP Statistical Review of World Energy, June 2008
2. Energy Outlook of Greece, Υπουργείο Ανάπτυξης, Ελληνική Δημοκρατία, Φεβρουάριος 2009.
3. Γ. Τσιλιγκιρίδης, Διαχείριση Ενεργειακών Πόρων, ΑΠΘ τμήμα εκδόσεων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2006
4. Γ. Τσιλιγκιρίδης, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, ΑΠΘ τμήμα εκδόσεων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2008 – 2009
5. E. Hau, Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Applications, Economics, Second Edition, Springer – Verlag, Berlin, Germany, 2006.
6. A. R. Jha, Wind Turbine Technology, CRC Press, Taylor & Francis Group, Florida, USA, 2011.
7. T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, E. Bossanyi, Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons, West Sussex, UK, 2001
8. D. Chiras, Wind Power Basics: A Green Energy Guide, New Society Publishers, Gabriola Island, Canada, 2010
9. J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers, Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, John Wiley & Sons, West Essex, UK, 2002.
10. M. O. L. Hansen, Aerodynamics of Wind Turbines, Second Edition, Earthscan. London, UK, 2008.
11. European Wind Energy Association, Wind Energy – The Facts: A guide to the technology, economics and future of wind power, Earthscan, London, UK, 2009.
12. National Research Council, Environmental Impacts of Wind Energy Projects, The National Academy Press, Washington, USA, 2007.

Άρθρα:

13. Οι ΑΠΕ αποτελούν αναγκαία αλλά και ελκυστική επένδυση, Διεύθυνση Σχεδιασμού και Οικονομικής Ανάλυσης, Εθνική Τράπεζα της Ελλάδος, Αθήνα, 25 Ιουνίου 2008.

14. Μελέτη σχεδιασμού και ένταξης της αιολικής ενέργειας σε τοπικά ηλεκτρικά δίκτυα, Χ. Ντούσκας, Π. Σκαρτσό, Γ. Κισσάς, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Τεχνολογιών Αντιρύπανσης, ΤΕΙ Κοζάνης, 2009.
15. Μελέτη αιολικού πάρκου στη θέση Αγία Ελέσσα της νήσου των Κυθήρων, Ε. Καρλής, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Ενεργειακής και Περιβαλλοντικής Τεχνολογίας, ΤΕΙ Κρήτης, Ηράκλειο, 2006.
16. Global Wind Energy Outlook, J. Soby, President & Ceo Vestas America, December, 2006.
17. V90 – 3.0 MW: Exceptional performance and reliability at high wind speed sites, Vestas official brochure.
18. Vestas complete manual, appendix O: Operation and maintenance plan, Vestas, 2005.
19. Vestas Service Training Courses, Introduction to V90 - 3.0 MW, Vestas, January, 2008.
20. Κατασκευή, λειτουργία & συντήρηση πάρκων αιολικής ενέργεια στην Στερεά Ελλάδα, Πτυχιακή Εργασία, Π. Πατης, ΤΕΙ Κρήτης.
21. G. Abad, M. A. Rodriguez, G. Iwanski, Applications of the Doubly Fed Induction Machine (DFIM), Ingeteam, September, 2009.
22. Vestas Service Training Courses, Hydraulics V90, Vestas, January, 2008
23. General Specification V90 – 3.0MW VCRS, Vestas, October, 2006.
24. Vestas Service Training Courses, Gearbox and Lubrication, Vestas, January, 2008
25. A. M. Papadopoulos, G. L. Glinou, D. A. Papachristos, Developments in the utilization of wind energy in Greece, Renewable Energy 33, pp 105 – 110, 2008.
26. J. K. Kaldellis, Social attitude towards wind energy applications in Greece, Energy Policy 33, pp. 595 – 602, 2005.

Διαδικτυακοί τόποι:

27. <http://en.wikipedia.org/wiki/Coal> (26/11/2010)
28. <http://www.dei.gr/Default.aspx?id=2619&nt=102&lang=1> (18/11/2010)
29. <http://www.marcon.com/marcon2c.cfm?SectionGroupsID=51&PageID=392>
(18/11/2010)
30. <http://www.ypeka.gr/Default.aspx?tabid=277> (18/11/2010)
31. http://www.ypan.gr/index_c cms.htm (18/11/2010)

32. http://el.wikipedia.org/wiki/Ανανεώσιμες_Πηγές_Ενέργειας (26/11/2010)
33. <http://www.telosnet.com/wind/index.html> (26/11/2010)
34. <http://ehf.uni-oldenburg.de/wind/wind.html> (26/11/2010)
35. http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_wind_power (26/11/2010)
36. <http://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/wind-power2.htm>
(26/11/2010)
37. http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine (26/11/2010)
38. http://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine (27/11/2010)
39. <http://www.rcn27.dial.pipex.com/cloudsrus/wind.html> (27/11/2010)
40. <http://mrbrammer.com/humanities/geography/weather-precipitation/> (27/11/2010)
41. <http://www.solacity.com/SiteSelection.htm> (27/11/2010)
42. http://www.aviationweather.ws/098_Ridge_or_Hill_Soaring.php (27/11/2010)
43. http://tolinionews.blogspot.com/2008/12/blog-post_04.html (28/11/2010)
44. <http://www.vestas.com/en/> (29/11/2010)
45. <http://en.wikipedia.org/wiki/Vestas> (29/11/2010)
46. http://www.eletaen.gr/Documents/installations/egatastaseis_greece_2006_7_8_9.pdf
(29/11/2010)
47. <http://www.wind-energy-market.com/en/wind-turbines/big-plants/details/details/bp/vestas-v90-30-mw-1/> (29/11/2010)
48. http://www.flickr.com/photos/brickman_photos/3326968394/ (29/11/2010)
49. <http://smsvi.com/tutorial/Wind%20Energy.htm> (29/11/2010)
50. http://en.wikipedia.org/wiki/DFIG#Double_fed_induction_generator (29/11/2010)
51. <http://www.flickr.com/photos/rockenbauer/3144668212/> (29/11/2010)
52. <http://www.compositesworld.com/articles/wind-blade-manufacturing-part-i-m-and-p-innovations-optimize-production> (29/11/2010)
53. <http://caps.fool.com/blogs/a-review-of-solar-and-wind/266286> (29/11/2010)
54. http://el.wikipedia.org/wiki/Αγλαδόκαμπος_Αργολίδας (30/11/2010)
55. <http://picasaweb.google.com/116775317521317141244/BluetoothExchangeFolder#5474922617403184914> (30/11/2010)
56. <http://aims.cres.gr/grwind150/viewer.htm> (30/11/2010)
57. <http://argolikiivivliothiki.gr/2010/05/05/αγλαδόκαμπος-αργολίδας-1821/> (30/11/2010)

58. <http://www.rae.gr/lic/FI-220710.html> (30/11/2010)

59. http://www.desmie.gr/up/files/GREECE_MODEL.png (30/11/2010)