

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ - 1286

ΘΕΜΑ: ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΠΑΡΚΟΥ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΜΠΕΚΟΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΠΡΙΦΤΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΦΑΡΜΑΚΗΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: κ.ΣΧΟΙΝΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2013

Πρόλογος

Πανευρωπαϊκά είχε τεθεί (2000) ο στόχος της παραγωγής ενέργειας από Α.Π.Ε σε ποσοστό 20 % της συνολικής, μέχρι το έτος 2020.Στον άξονα αυτό κινείται και η χώρα μας. 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 αναπτύχθηκε και το αιολικό πάρκο « Τρίκορφο » το οποίο μελετούμε στην παρούσα πτυχιακή εργασία.

Στα πρώτα δυο κεφάλαια της εργασίας παρουσιάζουμε το παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα, τις δυνατότητες της αιολικής ενέργειας και γενικά στοιχεία ανεμογεννητριών.

Στα επόμενα θα επικεντρωθούμε στη συγκεκριμένη τεχνολογία της εταιρείας Vestas που αξιοποιήθηκε στο αιολικό πάρκο « Τρίκορφο » καθώς και στη περιγραφή και ανάλυση της επένδυσης αυτής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της πτυχιακής εργασίας μας αποτελεί, αφενός η τεχνολογία που εκμεταλλεύεται την αιολική Α.Π.Ε, δηλαδή οι ανεμογεννήτριες και αφετέρου ένα τυπικό μικρό αιολικό πάρκο της Ελληνικής επικράτειας και μάλιστα πρόσφατης τεχνολογίας , αφού η λειτουργία του ξεκίνησε μέσα στο 2011. Το αιολικό πάρκο «Τρίκορφο» στη κοινότητα Πύργου Νομού Φωκίδας, τυπικής ισχύος 30 MW με 10 ανεμογεννήτριες τύπου Vestas V90/3 MW , με διάμετρο στροφείου 90 μέτρα και ύψος πυλώνα 80 μέτρα. Πιο αναλυτικά :

Όσο αφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο και συγκεκριμένα στο **1^ο κεφάλαιο**, περιγράφουμε τις ενεργειακές ανάγκες του πλανήτη και της χώρας μας καθώς και τη συμμετοχή των Α.Π.Ε σε αυτές. Στο **2^ο κεφάλαιο** εξετάζουμε τον τρόπο με τον οποίο ο άνεμος μας δίνει την ενέργειά του και αναλύουμε τα μέσα παραγωγής αυτής της ενέργειας δηλαδή τις ανεμογεννήτριες.

Παρακάτω θα δούμε ότι αφορά στο συγκεκριμένο αιολικό πάρκο, εξετάζουμε λεπτομερώς και μάλιστα αφιερώνουμε το **3^ο κεφάλαιο** στην τεχνολογία της ανεμογεννήτριας Vestas V-90 που χρησιμοποιείται στο πάρκο και το **4^ο κεφάλαιο** στη πλήρη περιγραφή όλων των παραμέτρων που αφορούν στο πάρκο αυτό και τις επιπτώσεις του στην ευρύτερη περιοχή.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Πρόλογος.....	1
Περίληψη	2
Κατάλογος εικόνων & σχημάτων.....	6
Κατάλογος κυρίως τύπων & συμβόλων	11
Κεφάλαιο 1 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη δράση του ανέμου.....	12
Διαχείριση ενέργειας και Α.Π.Ε	13
1.1 Το παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα.....	13
1.2 Ορυκτά καύσιμα και Ελληνική πραγματικότητα.....	15
1.3 Οι Α.Π.Ε σαν λύση στο ενεργειακό πρόβλημα.....	20
Κεφάλαιο 2. Ο άνεμος σαν πηγή ενέργειας	24
2.1 Δημιουργία ανέμου	24
2.2 Αιολικό Δυναμικό	27
2.3 Μεταβολή του ανέμου λόγω εμποδίων	32
2.3.1 Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους.....	32
2.3.2 Επίδραση του ανάγλυφου της γης	36
Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από άνεμο	
2.4 Ιστορική αναδρομή	39
2.5 Κατηγορίες ανεμογεννητριών	47

2.5.1	Κατηγοριοποίηση με βάση την μηχανική ισχύ N_0	47
2.5.2	Κατηγοριοποίηση με βάση την παράμετρο περιστροφής λ	48
2.5.3	Κατηγοριοποίηση με βάση την παράμετρο στιβαρότητας σ	49
2.5.4	Κατηγοριοποίηση με βάση τον αριθμό των πτερυγίων	50
2.5.5	Κατηγοριοποίηση με βάση την τοποθέτηση του άξονα περιστροφής	51
2.6	Λειτουργία ανεμογεννητριών – Παραγωγή ενέργειας	59
2.6.1	Μετατροπή της ταχύτητας του ανέμου σε περιστροφή του ρότορα	59
2.6.2	Η ανεμογεννήτρια ως μέρος ενός ροϊκού πεδίου – Η μονοδιάστατη θεωρία της συνέχειας για ιδανική ανεμογεννήτρια	62
2.6.3	Παραγωγή ισχύος	66
2.7	Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών	67
2.7.1	Ύψος ανεμογεννήτριας και διάμετρος ρότορα	67
2.7.2	Συντελεστής ισχύος C_P	71
2.7.3	Καμπύλη ισχύος	73

Κεφάλαιο 3: Αιολικό πάρκο «Τρίκορφο» Πύργου Δήμου

Δωρίδας Νομού Φωκίδας Εισαγωγή

75

Η ανεμογεννήτρια Vestas V90 3MW

76

3.1	Η εταιρία Vestas	76
3.2	Τεχνικά δεδομένα & Κατασκευαστικά στοιχεία	78
3.2.1	Ο πυλώνας	79
3.2.2	Η νασέλλα	81
3.2.2.1	Άτρακτος μεταφοράς ισχύος	83
3.2.2.2	Κιβώτιο ταχυτήτων	84
3.2.2.3	Φρένα	87
3.2.2.4	Γεννήτρια	88
3.2.2.5	Μετασχηματιστής	90

3.2.2.6 Σύστημα προσανατολισμού ανεμογεννήτριας.....	91
3.2.2.7 Υδραυλικό σύστημα	92
3.2.2.8 Σύστημα λίπανσης	97
3.2.2.9 Σύστημα ψύξης	101
3.2.2.10 Αισθητήρες	102
3.2.3 Ο ρότορας.....	103
3.2.3.1 Πτερύγια	104
3.2.3.2 Κόμβος σύνδεσης πτερυγίων – νασέλλας (hub).....	106
3.2.4 Συστήματα ασφαλείας.....	107
3.2.4.1 Διακόπτης ισχύος.....	107
3.2.4.2 Γείωση.....	108
3.2.4.3 Αντικεραυνική προστασία	109
3.2.5 Μονάδα ελέγχου	109
3.3 Λειτουργία.....	112
3.3.1 Χαρακτηριστική ισχύος.....	113
3.3.2 Καμπύλη θορύβου	114
3.4 Συντήρηση.....	116
3.5 Οικονομικά μεγέθη.....	116

Κεφάλαιο 4. Η τοποθεσία και το αιολικό πάρκο 119

4.1 Η τοποθεσία	119
4.1.1 Η κοινότητα του Πύργου.....	119
4.1.2 Το αιολικό δυναμικό της περιοχής.....	121
4.2 Αιολικό πάρκο.....	125
4.2.1 Κατασκευαστικά στάδια ανάπτυξης αιολικού πάρκου	126
4.2.1.1 Γενική χωροθέτηση αιολικού πάρκου	126

4.2.1.2 Εσωτερική χωροθέτηση αιολικού παρκου.....	130
4.2.1.3 Οδική πρόσβαση και πρόσβαση στο δίκτυο της ΔΕΗ.....	131
4.2.2 Επιπτώσεις της κατασκευής του αιολικού πάρκου	132
4.2.2.1 Οπτική όχληση.....	132
4.2.2.2 Ακουστική όχληση.....	133
4.2.2.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	133
<u>Συμπεράσματα</u>	137
<u>Βιβλιογραφία & Αναφορές</u>	138

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ & ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1: Παγκόσμια αποθέματα καρβόνου το έτος 2009.....	14
Εικόνα 2: Παγκόσμια κατανάλωση καρβόνου ανά χώρα (σε εκατομμύρια τόνων).....	15
Εικόνα 3: Κοιτάσματα λιγνίτη στην Ελληνική επικράτεια	16
Εικόνα 4: Εξόρυξη λιγνίτη (σε εκατομμύρια τόνους) για ηλεκτροπαραγωγή	17
Εικόνα 5: Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα.....	18
Εικόνα 6: Ετήσια κατά κεφαλή κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος στην Ελλάδα	19
Εικόνα 7: Εγκατεστημένη ισχύς Α.Π.Ε (σε MW – πάνω πίνακας) και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (σε GWh – κάτω πίνακας) στην Ελλάδα	22
Εικόνα 8: Κίνηση των αέριων μαζών λόγω της διαφοράς της θερμοκρασίας μεταξύ ημερινού και πόλων	25
Εικόνα 9: Κίνηση των αερίων μαζών στην γήινη ατμόσφαιρα, επηρεασμένων από το φαινόμενο Coriolis	26

Εικόνα 10: Ισχύς των ανέμων στον ευρωπαϊκό χώρο	27
Εικόνα 11: Κατανομή Weibull για διαφορετικές παραμέτρους μορφής C	31
Εικόνα 12: Μεταβολή του προφίλ του ανέμου μετά το πέρασμα από μια συστοιχία δέντρων	33
Εικόνα 13: Μεταβολή του προφίλ του ανέμου αναλόγως της τραχύτητας του εδάφους.....	34
Εικόνα 14: Τιμή της τραχύτητας αναλόγως της επιφάνειας.....	35
Εικόνα 15: 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)	37
Εικόνα 16: Κίνηση των αερίων μαζών κατά το πέρασμα τους επάνω από διαφορετικά ανάγλυφα (αριστερά) και μέσα από μια κοιλάδα (δεξιά)	38
Εικόνα 17: Ανεμόμυλοι της Αρχαίας Περσίας για άλεση δημητριακών (αριστερά) και της Αρχαίας Κίνας για άντληση νερού	40
Εικόνα 18: Γερμανικός ανεμόμυλος τύπου φυλακίου (αριστερά) και Ολλανδικός ανεμόμυλος τύπου πύργου (δεξιά).....	41
Εικόνα 19: Ανεμόμυλος αμερικάνικου τύπου για άντληση νερού	42
Εικόνα 20: Η πρώτη ανεμογεννήτρια, κατασκευασμένη από τον La Cour στο Askon της Δανίας το 1891	43
Εικόνα 21: Οι πρώτες ανεμογεννήτριες του La Cour κατασκευής του 1908 (αριστερά) και του Smidth κατασκευής του 1941 (δεξιά).	44
Εικόνα 22: Ανεμογεννήτρια ισχύος 20000 kW των KleinHerz – MAN (αριστερά) και ανεμογεννήτρια ισχύος 1250 kW των Putnam – Smith (δεξιά)	45
Εικόνα 23: Αιολικό πάρκο, κατασκευασμένο το 1986 στην Καλιφόρνια.....	46
Εικόνα 24: Πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο στην τοποθεσία Vindeby της Δανίας.....	47
Εικόνα 25: 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).....	51
Εικόνα 26: Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα τριών τύπων	52

Εικόνα 27: Ανεμογεννήτρια Darrieus τριών πτερυγίων που χρησιμοποιεί μια ανεμογεννήτρια Savonius δύο πτερυγίων για την εκκίνηση της διαγραμματικά (αριστερά) και σε εφαρμογή στην Taiwan (δεξιά)	53
Εικόνα 28: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα, τύπου Darrieus. Αριστερά παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα με τα κύρια μέρη της και δεξιά παρουσιάζεται εγκατεστημένη σε ένα αιολικό πάρκο στο Κέμπεκ του Καναδά.....	54
Εικόνα 29: Ανάντη (αριστερά) και κατάντη (δεξιά) ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα.....	56
Εικόνα 30: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα. Αριστερά παρουσιάζεται ένα σχεδιάγραμμα με τα κύρια μέρη της και δεξιά παρουσιάζεται εγκατεστημένη στην τοποθεσία Veladero της Αργεντινής.....	57
Εικόνα 31: Κίνηση του ανέμου γύρω από το πτερύγιο μιας ανεμογεννήτριας	60
Εικόνα 32: Κατανομή των δυνάμεων που ασκούνται στα πτερύγια των ανεμογεννητριών.....	62
Εικόνα 33: Ροϊκό πεδίο γύρω από ανεμογεννήτρια.....	63
Εικόνα 34: Διάταξη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μέ την χρήση ανεμογεννήτρια.....	66
Εικόνα 35: Σχεδιάγραμμα το οποίο απεικονίζει το ύψος της ανεμογεννήτριας (αριστερά) και την διάμετρο του ρότορα της (δεξιά)	68
Εικόνα 36: Μεταβολή της ισχύος της ανεμογεννήτριας αναλόγως του ύψους και της διαμέτρου του ρότορα.....	69
Εικόνα 37: Μεταβολή της ισχύος αναλόγως της διαμέτρου αλλά και άλλων σχεδιαστικών επιλογών για 10 ανεμογεννήτριες από κορυφαίους σχεδιαστές.....	70
Εικόνα 38: Μεταβολή της διαμέτρου των ανεμογεννητριών διαχρονικά	71
Εικόνα 39: Σχηματική απεικόνιση της συναρτήσης υπολογισμού του συντελεστή ισχύος.....	72
Εικόνα 40: Μεταβολή του συντελεστή ισχύος αναλόγως του τύπου της ανεμογεννήτριας	73
Εικόνα 41: Καμπύλη ισχύος μιας πειραματικής ανεμογεννήτριας Growian.....	74
Εικόνα 42: Το λογότυπο της εταιρίας.....	76
Εικόνα 43: Πορεία πωλήσεων ανεμογεννητριών Vestas.....	77
Εικόνα 44: Διαχρονική εξέλιξη ανεμογεννητριών Vestas.....	77

Εικόνα 45: Σχέση μοντέλων ανεμογεννητριών Vestas σε σχέση με τον αξιοποιήσιμο άνεμο	78
Εικόνα 46: Τομή της ανεμογεννήτριας Vestas V90 – 3MW	79
Εικόνα 47: Μηχανικός συντήρησης κατά την άνοδο του στον πύργο μιας ανεμογεννήτριας V90	80
Εικόνα 48: Σχεδιασμός νασέλλας μαζί με τον σύνδεσμο και τον κώνο	82
Εικόνα 49: Σχεδιασμός νασέλλας χωρίς τον σύνδεσμο και τον κώνο.....	83
Εικόνα 50: Παρουσίαση της διπλής ατράκτου μετάδοσης της ισχύος συνδεδεμένης με το κιβώτιο ταχυτήτων και την γεννήτρια.....	84
Εικόνα 51: Εξωτερική διαμόρφωση κιβωτίου ταχυτήτων (αριστερά) και τοποθέτηση του στην νασέλλα (δεξιά – με το καφέ χρώμα το κιβώτιο).....	85
Εικόνα 52: Σχηματική παράσταση των τριών στάσεων του κιβωτίου ταχυτήτων.....	86
Εικόνα 53: Κιβώτιο ταχυτήτων (μπλέ χρώμα) στο οποίο φαίνεται η άτρακτος υψηλής ταχύτητας και το σύστημα φρένων (γκρι χρώμα δεξιά).....	87
Εικόνα 54: Υδραυλικό φρένο της ανεμογεννήτριας σε πραγματική εφαρμογή πάνω στο κιβώτιο ταχυτήτων (αριστερά) και σε σχηματική αναπαράσταση (δεξιά).....	88
Εικόνα 55: Διάγραμμα γεννήτριας DFIM στο οποίο φαίνεται η σύνδεση του converter στον ρότορα και το δίκτυο.....	89
Εικόνα 56: Σχηματική απεικόνιση γεννήτριας τεχνολογίας DFIM.....	90
Εικόνα 57: Δακτυλίδι του συστήματος προσανατολισμού.....	92
Εικόνα 58: Αντλία χαμηλής πίεσης για θέρμανση του λαδιού (αριστερά πάνω), αντλία υψηλής πίεσης (αριστερά κάτω καλυμμένη) και αντλία φρένων (δεξιά)	93
Εικόνα 59: 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.....	94
Εικόνα 60: Υδραυλικός κύλινδρος για την αλλαγή του pitch ενός πτερυγίου	95
Εικόνα 61: Πίεση δικτύου όταν το πτερύγιο βρίσκεται σε γωνία pitch 90° (ουσιαστικά είναι ανενεργό, λειτουργεί ως αερόφρενο)	95
Εικόνα 62: Πίεση δικτύου όταν το πτερύγιο βρίσκεται σε γωνία pitch 0° (είναι ενεργό)	96
Εικόνα 63: Συνολικό υδραυλικό δίκτυο μεταβολής του pitch των πτερυγίων.....	96
Εικόνα 64: 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	97
Εικόνα 65: Σύστημα λίπανσης κιβωτίου ταχυτήτων	98
Εικόνα 66: Σύστημα λίπανσης κιβωτίου ταχυτήτων στην κατάσταση λειτουργίας Run.....	100
Εικόνα 67: Σύστημα λίπανσης κιβωτίου ταχυτήτων στην κατάσταση λειτουργίας Emergency	100
Εικόνα 68: Λίπανση μηχανισμού προσανατολισμού ανεμογεννήτριας με λουτρό ελαίου.....	101
Εικόνα 69: Αισθητήρες ανέμου τοποθετημένοι στο πίσω μέρος της νασέλλας.....	103
Εικόνα 70: Ρότορας ανεμογεννήτριας V90 κατά την διάρκεια συναρμολόγησης	104
Εικόνα 71: Ευρεσιτεχνία της Vestas, κατασκευή του πτερυγίου σε δύο κομμάτια και σύνδεση του με εποξική ρητίνη.....	105
Εικόνα 72: Πτερύγιο ανεμογεννήτριας V90.....	106
Εικόνα 73: Κατασκευαστική διαμόρφωση του συνδέσμου hub.....	107
Εικόνα 74: Χαρακτηριστικά μεγέθη διακόπτων ισχύος	108
Εικόνα 75:Επικοινωνία με οπτικές ίνες δύο τμημάτων της μονάδας ελέγχου	110
Εικόνα 76: Κεντρικό σύστημα ελέγχου ανεμογεννήτριας.....	111
Εικόνα 77: Χαρακτηριστική ισχύος ανεμογεννήτριας V90 – 3MW	113
Εικόνα 78: Καμπύλη παραγωγής θορύβου για την κανονική λειτουργία της ανεμογεννήτριας	114
Εικόνα 79: Καμπύλη παραγωγής θορύβου για την λειτουργία mode 1 της ανεμογεννήτριας	115
Εικόνα 80: Καμπύλη παραγωγής θορύβου για την λειτουργία mode 2 της ανεμογεννήτριας	115
Εικόνα 81: Με μπλε χρώμα τοποθετείται στον χάρτη ο νομός Φωκίδας	120
Εικόνα 82: Νομός Φωκίδας (λεπτομέρειες)	120
Εικόνα 83: Δήμοι Ν.Φωκίδας.....	121
Εικόνα 84: Χωριό Πύργος και αιολικό πάρκο επάνω	121
Εικόνα 85: Τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό Ελλάδας	122
Εικόνα 86: Τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό στα Ν.Δ νομού Φωκίδας.....	124
Εικόνα 87: Ανάγλυφη απεικόνιση περιοχής αιολικού πάρκου.....	125
Εικόνα 88: Η Εθνική οδός Αντιρρίου -Ιτέας και ο σταθμός διασύνδεσης με τους πυλώνες της Δ.Ε.Η.....	127

Εικόνα 89: Δίκτυο Δ.Ε.Η νοτίου Ελλάδας	128
Εικόνα 90: 'Αποψη υφιστάμενου και μελλοντικού πάρκου	128
Εικόνα 91: Κατευθύνσεις πρόσβασης στο πάρκο "Τρίκορφο"	129
Εικόνα 92: Άνετοι δρόμοι πρόσβασης στο πάρκο	129
Εικόνα 93: Ομαλότης της περιοχής	131
Εικόνα 94: Χωροθέτηση μελλοντικής επέκτασης του αιολικού πάρκου "Τρίκορφο" στα βόρεια της περιοχής Τρίκορφου Δωρίδας.....	136

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΚΥΡΙΩΣ ΤΥΠΩΝ & ΣΥΜΒΟΛΩΝ

α) Τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό (1).....	28
β) Μέση τιμή ταχύτητας ανέμου (2).....	29
γ) Μεταβλητότητα της μέσης τιμής ταχύτητας ανέμου (3)	29
δ) Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull (4).....	29
ε) Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Rayleigh (5).....	30
στ) Αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Rayleigh (6).....	30
ζ) Τιμή της τραχύτητας αναλόγως της επιφάνειας (10) & (11)	35
η) Κατηγοριοποίηση με βάση την παράμετρο περιστροφής λ (12).....	48
θ) Κατηγοριοποίηση με βάση την παράμετρο στιβαρότητας σ (13) & (14)	49
ι) Ισχύς ανέμου (15) & (16)	63,64
κ) Εξίσωση συνεχείας (17)	64
λ) Διατήρηση ορμής (19).....	64
μ) Συντελεστής ισχύος ανεμογεννήτριας C_p (21)	65

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

από τη

δράση του ανέμου.

Διαχείριση ενέργειας και Α.Π.Ε

1.1 Το παγκόσμιο ενεργειακό πρόβλημα

Η ενέργεια έχει άμεση σχέση με τον άνθρωπο. Η ανάπτυξη του, η ανάπτυξη του βιοτικού του επιπέδου, έγινε με γιγαντιαία άλματα μετά από τον ερχομό του ηλεκτρισμού στην ζωή του. 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 ηλεκτρικής ενέργειας 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.

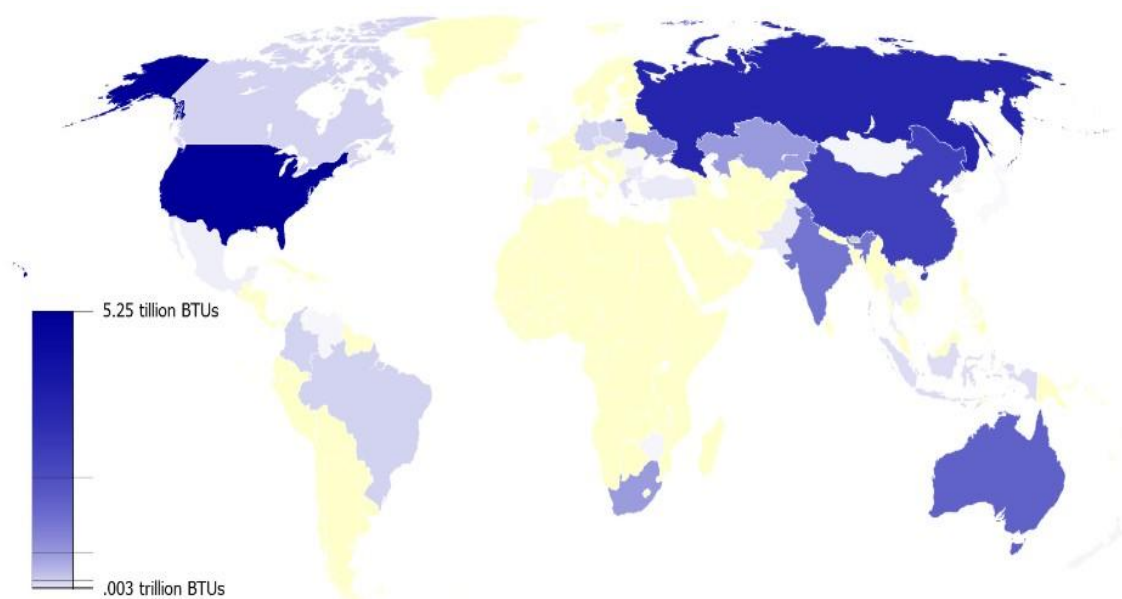
Από τις μεθόδους παραγωγής ηλεκτρισμού τη μεγαλύτερη μερίδα κατέχουν οι χρήσεις ορυκτών καυσίμων.

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, εκτός από εκείνο της μόλυνσης του περιβάλλοντος εξαιτίας της υψηλής εκπομπής ρύπων, είναι η

εξάντληση των κοιτασμάτων. Για να δημιουργηθεί ένα κοιτάσμα κάρβουνου με υψηλό ενεργειακό επίπεδο χρειάζονται μερικές χιλιάδες χρόνια. 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 κάρβουνου 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 : Παγκόσμια αποθέματα κάρβουνου το έτος 2009

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 του φυσικού αερίου (που κατά μία έννοια είναι και αυτό ορυκτό καύσιμο) αλλά και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η διάρκεια ζωής των κοιτασμάτων κάρβουνου 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 2 : Παγκόσμια κατανάλωση κάρβουνου ανά χώρα (σε εκατομμύρια τόνων)

Από τον παραπάνω πίνακα επιβεβαιώνεται ότι μόνο η Ευρώπη έχει αντιληφθεί το πρόβλημα και προσπαθεί να το μειώσει μειώνοντας τη χρήση κάρβουνου 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.

1.2 Ορυκτά καύσιμα και Ελληνική πραγματικότητα

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 65 χρόνια. Ήδη τα μεγαλύτερα των κοιτασμάτων τα εκμεταλλεύεται η Δ.Ε.Η 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 που έχει εκδώσει το 2009 και σχετίζεται με την ενέργεια στην Ελλάδα.

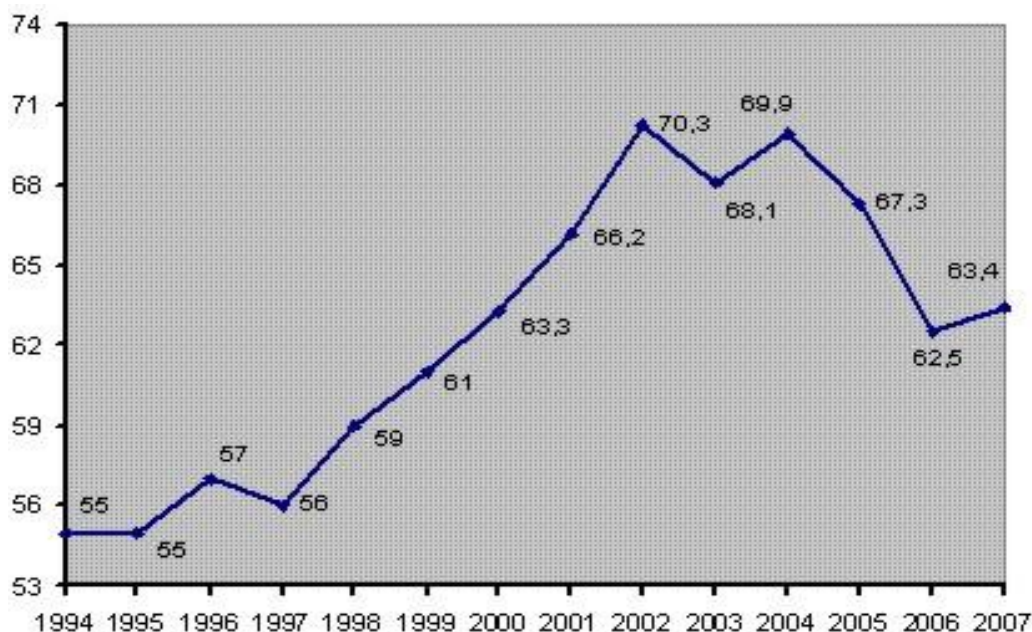
Περιοχή κοιτάσματος	Τοποθεσία	Εναπομείναν διαθέσιμο δυναμικό(Mt)
Πτολεμαΐδα	Δυτική Μακεδονία	1220
Αμύνταιο	Δυτική Μακεδονία	130
Μεγαλόπολη	Πελοπόννησος	210
Φλώρινα	Δυτική Μακεδονία	140
Δράμα	Δυτική Μακεδονία	900
Κομνηνά	Δυτική Μακεδονία	95
Ελασσόνα	Κεντρική Ελλάδα	155
Ιδιωτικά κοιτάσματα	Δυτική Μακεδονία	170
Σύνολο		3020

Εικόνα 3 : Κοιτάσματα λιγνίτη στην Ελληνική επικράτεια για το 2009

Από τα 8 μεγάλα γνωστά κοιτάσματα τα 7 ήδη τα αξιοποιεί η Δ.Ε.Η 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 είναι σημαντικό και πρέπει να βρεθούν λύσεις για να μην βρεθούμε σε ένα μεγάλο αδιέξοδο στα επόμενα χρόνια. Έτσι η Δ.Ε.Η προσπαθεί να μειώσει την εξόρυξη λιγνίτη αλλάζοντας το ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας. Στον παρακάτω

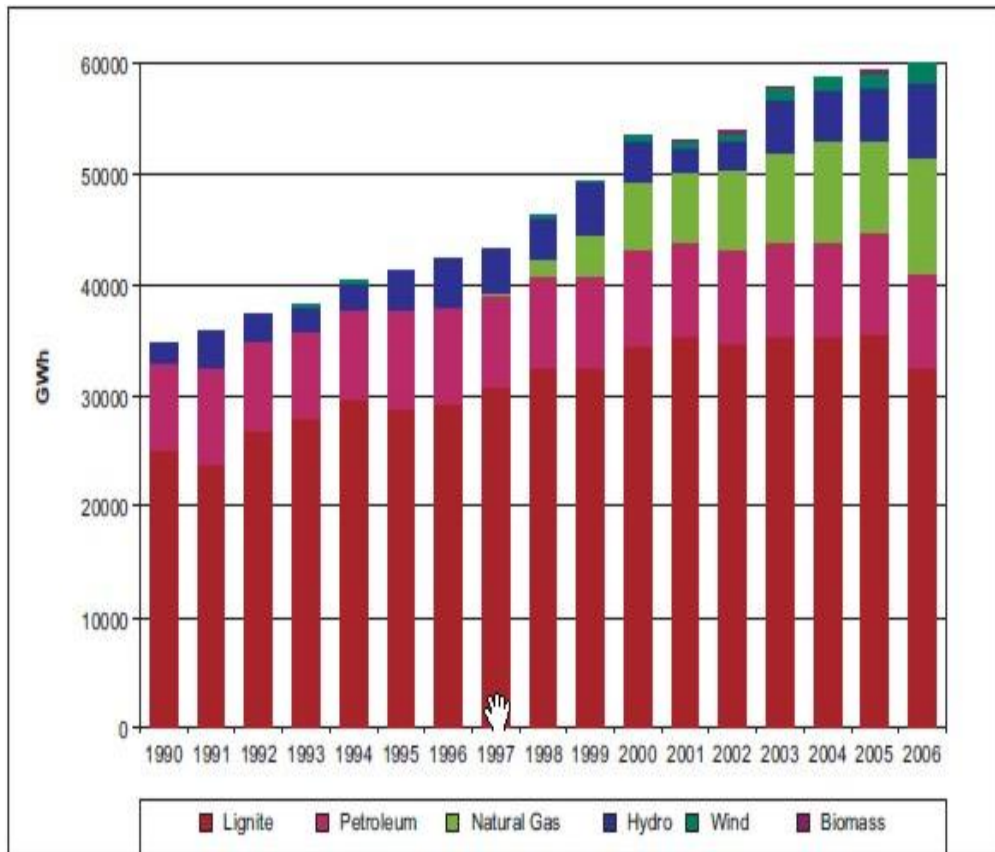
πίνακα φαίνεται η εξόρυξη λιγνίτη τα τελευταία 15 έτη. Παρατηρούμε την πτωτική πορεία που ακολουθεί το διάγραμμα μας από το 2001 και εντεύθεν.

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 Δ.Ε.Η πήρε το μήνυμα και προσπαθεί να λύσει το ενεργειακό πρόβλημα της Ελλάδας.



Εικόνα 4 : Εξόρυξη λιγνίτη (σε εκατομμύρια τόνους) για ηλεκτροπαραγωγή

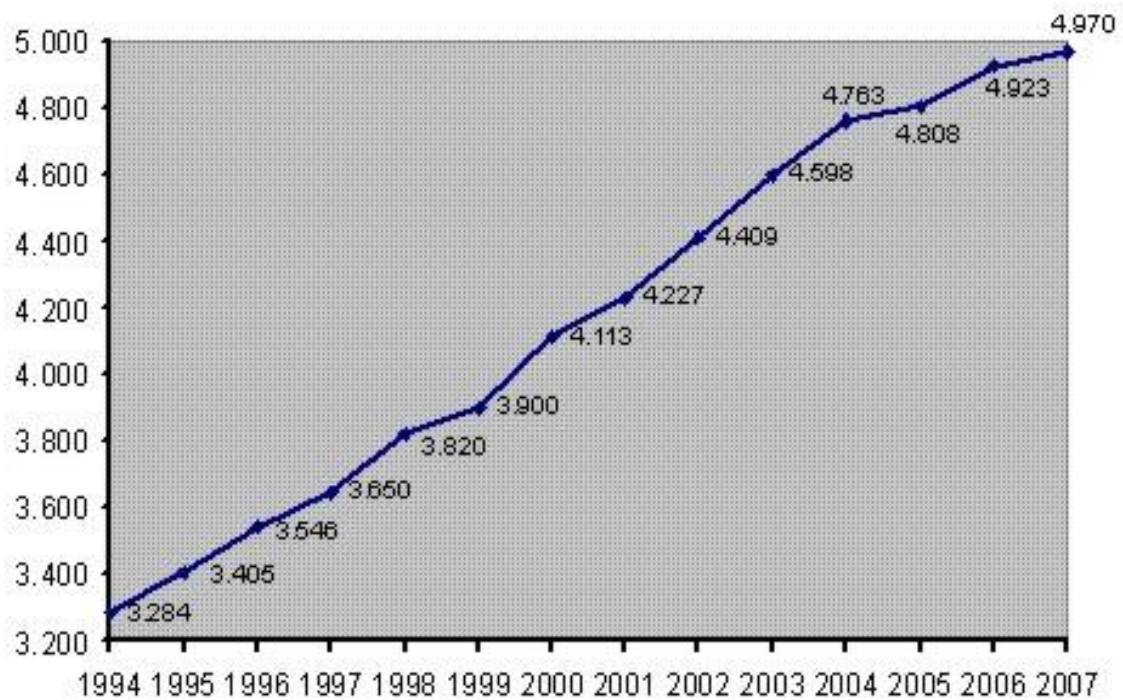
Παρά το θετικό μήνυμα που δίνει το προηγούμενο διάγραμμα, έρχεται το επόμενο γράφημα να μας διαψεύσει. Το διάγραμμα αυτό δείχνει την συνολική παραγωγή ηλεκτρισμού στην Ελλάδα μετά το 1990. Σε αυτό φαίνεται ότι η μείωση που έγινε στην χρήση του λιγνίτη δεν οφείλεται στην αύξηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας 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 5 : Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα

Στο προηγούμενο διάγραμμα, εκτός 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 0,48% με βάση την Euro stat) αλλά στην αύξηση της ενέργειας που απαιτεί κάθε άτομο για προσωπική του χρήση.

Η αύξηση αυτή αποτυπώνεται και στα επίσημα στοιχεία που δημοσιεύει η Δ.Ε.Η και παρουσιάζονται στο γράφημα που ακολουθεί.



Εικόνα 6 : Ετήσια κατά κεφαλή κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος στην Ελλάδα

Η αύξηση της απαίτησης των ελλήνων για ηλεκτρικό ρεύμα αναγκάζει την Δ.Ε.Η να αυξάνει συνεχώς την παραγωγή της. Το ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας όμως εξαρτάται από πηγές που εξαντλούνται, 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 γίνει πραγματικότητα μόνο από την αύξηση της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

1.3 Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σαν λύση στο ενεργειακό πρόβλημα

Όπως προαναφέραμε, η πιο αποδοτική λύση στο ενεργειακό πρόβλημα του πλανήτη αλλά και ειδικότερα στο ενεργειακό πρόβλημα της χώρας μας φαίνεται να είναι η αύξηση της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε). Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι οι μορφές ενέργειας οι οποίες δεν εξαντλούνται, είναι μορφές ενέργειας που προέρχονται από διάφορες φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν συνεχώς στο περιβάλλον.

Χαρακτηριστικότερες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι αδιαμφισβήτητα τόσο η ηλιακή όσο και η αιολική ενέργεια. Αυτές είναι δύο από τις σημαντικότερες Α.Π.Ε, αυτές γύρω από τις οποίες γίνεται πολύ μεγάλη συζήτηση γιατί μπορούν να καλύψουν μεγάλες ανάγκες λόγω του τεράστιου ηλιακού και αιολικού δυναμικού του πλανήτη. Μια τρίτη, εξ' ίσου σημαντική Α.Π.Ε είναι η ενέργεια των υδατοπτώσεων. Η ενέργεια αυτή που την εκμεταλλευόμαστε μέσω υδροηλεκτρικών σταθμών είναι η περισσότερο εκμεταλλεύσιμη από όλες τις Α.Π.Ε σήμερα. Μια άλλη Α.Π.Ε είναι η βιομάζα η οποία ελάχιστα χρησιμοποιείται για ηλεκτροπαραγωγή αλλά χρησιμοποιείται πολύ για λοιπές χρήσεις όπως τη θέρμανση. Άλλες Α.Π.Ε, μικρότερης προς το παρόν σημασίας, είναι η γεωθερμία (αν και ο όρος Α.Π.Ε δεν ανταποκρίνεται απόλυτα στη γεωθερμία καθώς χρειάζονται μερικές χιλιάδες χρόνια για να ανανεωθεί το γεωθερμικό δυναμικό), η ενέργεια των κυμάτων και των παλιρροιών και η ενέργεια που παρέχει η θερμοκρασιακή διαφορά στο βάθος και στην επιφάνεια των ωκεανών.

Όλες οι Α.Π.Ε οφείλονται άμεσα ή έμμεσα στην ηλιακή ακτινοβολία, εκτός της γεωθερμίας η οποία οφείλεται στην υψηλή θερμοκρασία που επικρατεί στο εσωτερικό της γης.

Οι Α.Π.Ε παρουσιάζουν πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας αλλά και κάποια σοβαρά μειονεκτήματα τα οποία δεν τους επιτρέπουν να εξαπλωθούν σε μεγάλη κλίμακα και να επικρατήσουν στα ενεργειακά ισοζύγια των χωρών. Το προφανές πλεονέκτημα τους είναι ότι δεν εξαντλούνται. Το δεύτερο μεγαλύτερο πλεονέκτημα τους είναι ότι υπάρχουν παντού έτσι μπορούν οι χώρες να ανεξαρτητοποιηθούν ενεργειακά. Το τρίτο πλεονέκτημα

τους είναι ότι ο εξοπλισμός για την εκμετάλλευση 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 το ότι έχουν πολύ μικρή ενεργειακή πυκνότητα, δηλαδή χρειάζονται μεγάλη επιφάνεια γης για να παραχθεί 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 ακόμη τις κάνει μη συμφέρουσες για την κάλυψη μεγάλων αστικών κέντρων. Άλλα επιμέρους προβλήματα όπως είναι η κακή αισθητική άποψη που προκαλούν κυρίως οι ανεμογεννήτριες, θεωρούνται μικρότερης σημασίας και αναμένεται να καμφθούν εύκολα, όταν ο κόσμος καταλάβει ότι είναι πλέον απαραίτητες.

Τα μειονεκτήματα λοιπόν που παρουσιάζουν οι ανανεώσιμες πηγές είναι πολύ σοβαρά, αλλά με την πάροδο του χρόνου και την τεχνολογική πρόοδο αρχίζουν να εξουδετερώνονται .

Αντίθετα τα πλεονεκτήματα τους είναι μεγάλα, έτσι οι ευρωπαϊκές κυρίως χώρες οδηγούνται κυρίως σε αυτές. Ήδη η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει ως στόχο το 2020 ο ηλεκτρισμός να παράγεται κατά 20% από τις Α.Π.Ε. Κάποιες χώρες, έχουν ήδη αντιληφθεί τα κέρδη τους και έχουν αναπτύξει σε πολύ μεγάλο βαθμό τις Α.Π.Ε, χαρακτηριστικό παράδειγμα η Ισπανία η οποία έχει εγκατεστημένο το 10% της παγκόσμιας ισχύος σε Α.Π.Ε.

Η χώρα μας έχει την τύχη λόγω της γεωγραφικής της θέσης, 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 14 – 16 % της παραγωγής ηλεκτρισμού για την Ελλάδα οφείλεται στις Α.Π.Ε (όπως μπορεί να δει κανείς εύκολα στο έντυπο του λογαριασμού της Δ.Ε.Η μαζί και με τις άλλες κατανομές, λιγνίτη 46-47%, αερίου 23-25%, πετρελαίου 8-10%). Αν όμως αφαιρέσουμε τα υδροηλεκτρικά φράγματα τότε το ποσοστό αυτό πέφτει στο 7%, ελάχιστο για το ηλιακό και αιολικό δυναμικό της χώρας μας.

Ειδικά η ηλιακή ενέργεια έχει πολύ μικρή συμμετοχή στην ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα. Αυτό είναι απαράδεκτο για την χώρα μας, γιατί 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	253,0	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	106,8	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 7 : Εγκατεστημένη ισχύς (σε MW – πάνω πίνακας) και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας(σε GWh – κάτω πίνακας) στην Ελλάδα

Στους δύο παραπάνω πίνακες μπορούμε να παρακολουθήσουμε την πορεία των Α.Π.Ε στην χώρα μας τα τελευταία μεταξύ 1990 και 2006. Βλέπουμε όπως ήδη έχει αναφερθεί, το μεγάλο ποσοστό των υδροηλεκτρικών σταθμών στις Α.Π.Ε 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 Α.Π.Ε 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. Ήδη όμως με στοιχεία της Ελληνικής Ρ.Α.Ε (ρυθμιστικής αρχής ενέργειας) για το 2010 η εγκαταστημένη ισχύς ανεμογεννητριών έφθασε στα 960 MW.

Στόχος της χώρας μας είναι να φτάσει στο 20% της ηλεκτροπαραγωγής από Α.Π.Ε έως το 2020 και εγκατεστημένη ισχύ έως το 2014 τα 4000 MW. Έτσι θα μειώσει 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, ότι 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 Α.Π.Ε, με την αιολική ενέργεια και την εκμετάλλευσή της μέσω ενός τυπικού αιολικού πάρκου στην χώρα μας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ο άνεμος σαν πηγή ενέργειας

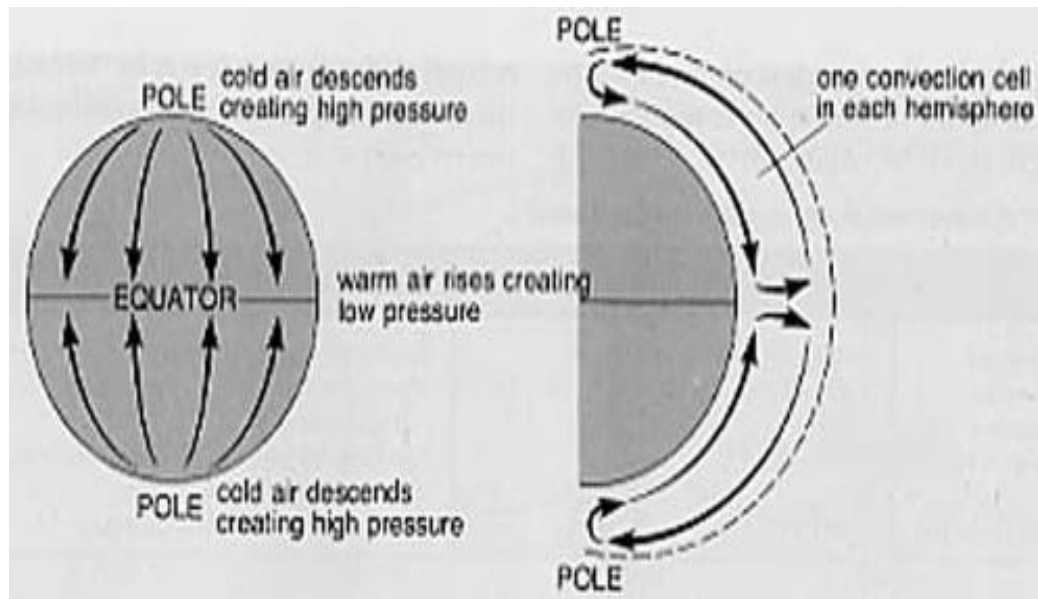
2.1 Δημιουργία ανέμου

Σε αυτό το 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 και κατά συνέπεια η αιολική ενέργεια;

Η αιολική ενέργεια είναι η κινητική ενέργεια διάφορων αέριων μαζών στην ατμόσφαιρα του πλανήτη μας. Η κίνηση αέριων μαζών σε ολόκληρο τον πλανήτη προκαλείται από δύο αιτίες, την ηλιακή ακτινοβολία και την περιστροφή του πλανήτη. Άρα έμμεσα 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;

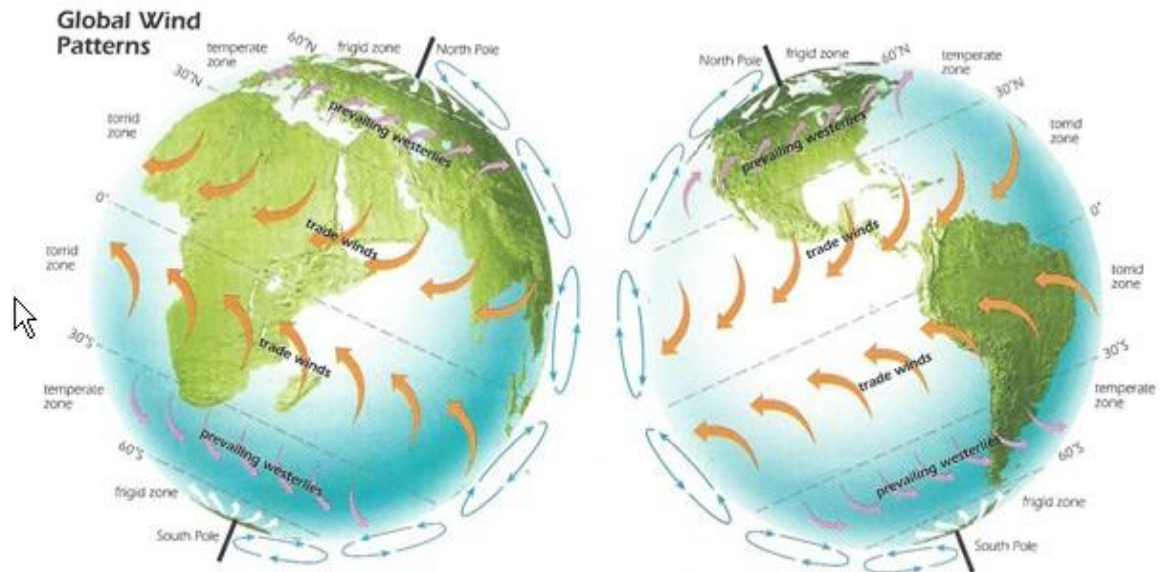
Η ηλιακή ακτινοβολία έχει την ικανότητα να αυξάνει την θερμοκρασία εκεί όπου έχει μεγάλη ένταση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η γη να είναι πιο ζεστή στον ισημερινό και πιο κρύα στους δύο πόλους. Έτσι ο θερμός αέρας στον ισημερινό ανεβαίνει σαν αραιότερος σε ψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας και κινείται προς τους πόλους, ενώ ο ψυχρότερος αέρας των πόλων κινείται προς τον ισημερινό όπου υπάρχει μια ζώνη χαμηλότερης πίεσης.

Η κίνηση αυτή φαίνεται σχηματικά στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 8 : Κίνηση των αέριων μαζών λόγω της διαφοράς της θερμοκρασίας μεταξύ ισημερινού και πόλων

Η κίνηση της γης επηρεάζει και αυτή τα ρεύματα ανέμου, μέσω του γνωστού από την φυσική επιστήμη φαινομένου Coriolis. Η αδράνεια των αέριων μαζών τείνει να 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 και 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 εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 9 : Κίνηση των αερίων μαζών στην γήινη ατμόσφαιρα, επηρεασμένων από το φαινόμενο Coriolis




Όπως μπορεί να γίνει αντιληπτό η κίνηση των αερίων μαζών είναι ένα πολύπλοκο αντικείμενο . Στις μεγάλες μετεωρολογικές υπηρεσίες χωρών, υπολογιστές εργάζονται συνέχεια, για να μπορέσουν να προβλέψουν αυτές τις κινήσεις. Επίσης η κίνηση των αερίων μαζών εξαρτάται από την εποχή (τον χειμώνα έχουμε υψηλότερες ταχύτητες), και από την ώρα της ημέρας (αν είναι παραθαλάσσια περιοχή υπάρχει η θάλασσα 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.



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 10 : Ισχύς των ανέμων στον ευρωπαϊκό χώρο

2.2 Αιολικό Δυναμικό

Από τον προηγούμενο χάρτη βλέπουμε, ότι η χώρα μας είναι αρκετά ευνοημένη γιατί 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 μία 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:

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

Όπου:

- S : Μια νοητή επιφάνεια, εάν μιλούμε για μια ανεμογεννήτρια, τότε αυτή θα είναι η επιφάνεια της πτερωτής της.
- t : Χρονική κλίμακα, 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 είναι, ότι για τον προσδιορισμό της ισχύος του ανέμου, από την οποία θα υπολογίσουμε το τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό και θα 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 δίνονται από τις επόμενες σχέσεις της στατιστικής:

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

$$\sigma_V^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2 \quad (3)$$

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 σωστή αυτή η προσέγγιση πρέπει τα ανεμολογικά στοιχεία να περιλαμβάνουν τρεις τουλάχιστον μετρήσεις την ημέρα για μια περίοδο τουλάχιστον 5 ετών.

Σε κάποιες άλλες περιοχές δεν υπάρχουν όμως καθόλου ανεμολογικά στοιχεία, άρα χρειάζεται να εκτιμήσουμε εμείς 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.

Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull:

$$p(V) = \left[\frac{c}{A} \right] \cdot \left[\frac{V}{A} \right]^{c-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{V}{A} \right)^c \right] \quad (4)$$

Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Rayleigh:

$$p(V) = \left[\frac{\pi \cdot V}{2 \cdot \bar{V}^2} \right] \cdot \exp \left[- \left(\frac{\pi \cdot V^2}{4 \cdot \bar{V}^2} \right) \right] \quad (5)$$

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 αν 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 (παρουσία εμποδίων) του περιβάλλοντος. 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:

Αθροιστική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull:

$$P(V \leq V_s) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{V_s}{A} \right)^C \right] \quad (6)$$

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

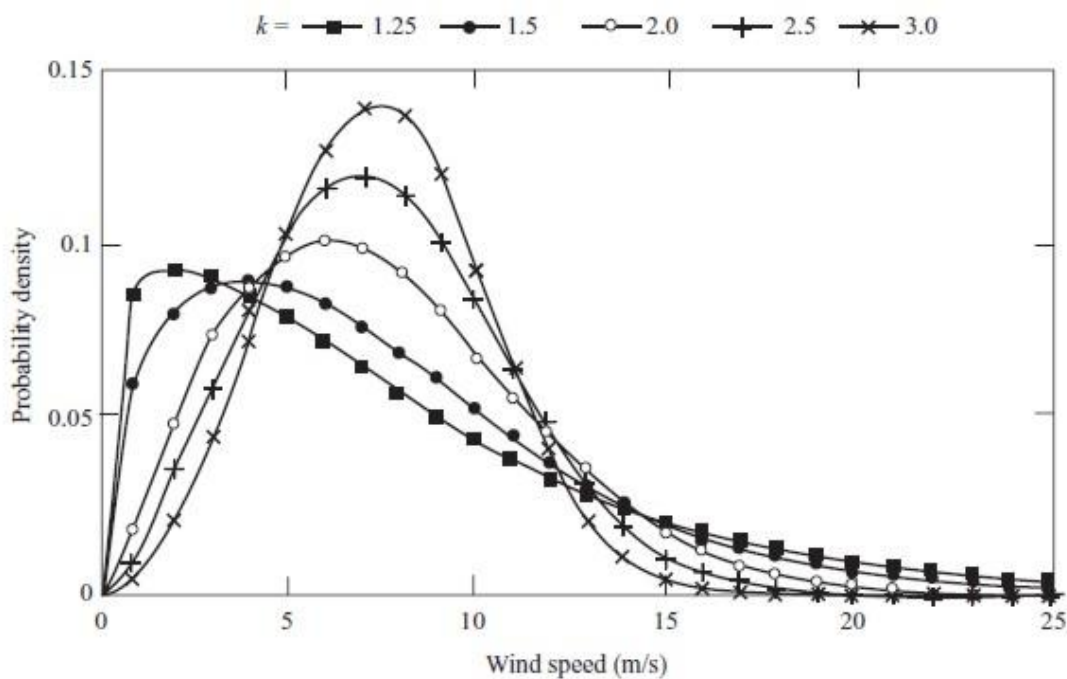
$$\bar{V} = A \cdot \Gamma \cdot \left[1 + \left(\frac{1}{C} \right) \right] \quad (7)$$

$$\sigma_V^2 = A^2 \cdot \left\{ \Gamma \cdot \left[1 + \left(\frac{2}{C} \right) \right] - \Gamma^2 \cdot \left[1 + \frac{1}{C} \right] \right\} \quad (8)$$

Το A μεταβάλλεται σε συνάρτηση με το ύψους και η μεταβολή του δίνεται 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 οι τιμές της κατανομής Γ. Η κατανομή της συνάρτησης Γ δίνεται από την επόμενη εξίσωση και οι τιμές της υπολογίζονται από διάφορους πίνακες σε συνάρτηση με την παράμετρο n.

$$\Gamma = \int_0^{\infty} x^{n-1} e^{-x} dx \quad (9)$$

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



Εικόνα 11: Κατανομή Weibull για διαφορετικές παραμέτρους μορφής C

Με γνωστή τώρα την ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή ενδιαφέροντος, μπορεί να υπολογιστεί το τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό και να κριθεί αν τελικά είναι συμφέρουσα, η τοποθέτηση ανεμογεννήτριας στη περιοχή ενδιαφέροντος μας.

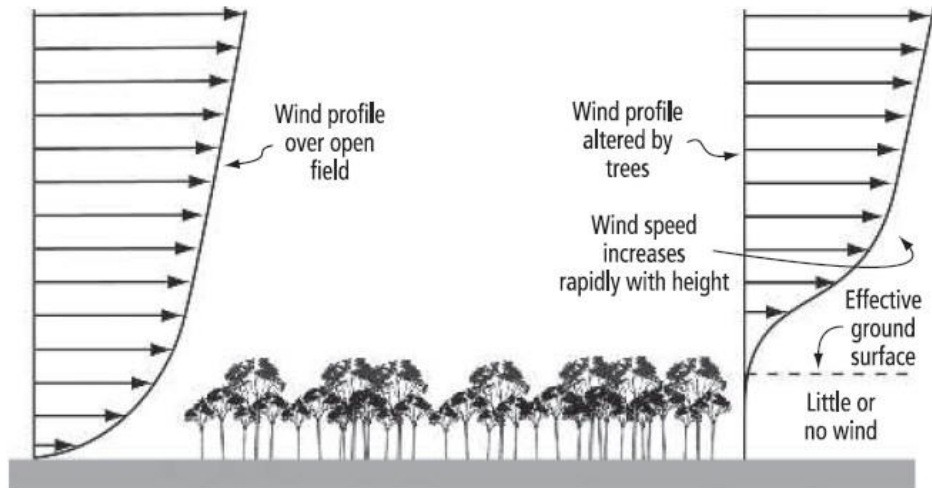
2.3 Μεταβολή του ανέμου λόγω εμποδίων

Στην πρώτη ενότητα του κεφαλαίου 2 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 γης και λόγω του ανάγλυφου. Πριν προχωρήσουμε για 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 τι γίνεται σε τέτοιο ύψος, γιατί οι ανεμογεννήτριες μας δυστυχώς λειτουργούν μέσα στο οριακό στρώμα του ανέμου.

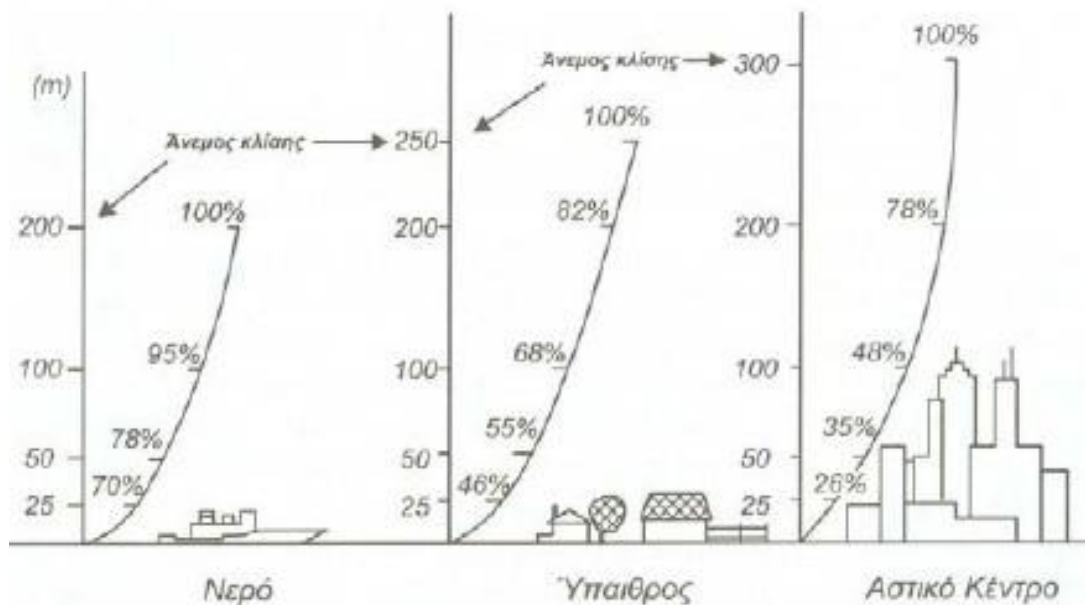
2.3.1 Επίδραση της τραχύτητας του εδάφους

Με τον όρο τραχύτητα εδάφους εννοούμε την 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 ψηλά 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 12 : Μεταβολή του προφίλ του ανέμου μετά το πέρασμα από μια συστοιχία δέντρων



Εικόνα 13 : Μεταβολή του προφίλ του ανέμου αναλόγως της τραχύτητας του εδάφους

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

Η τραχύτητα του εδάφους, συμβολίζεται με z_0 και παίρνει διαφορετικές τιμές ανάλογα με τα εμπόδια. 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 ψηλά 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 14 : Τιμή της τραχύτητας αναλόγως της επιφάνειας

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 θεωρούνται αρκετά αξιόπιστες, η πρώτη ειδικότερα για ύψη από 30 έως 50 μέτρα και η δεύτερη για μεγαλύτερα ύψη. Για μικρά ύψη θεωρούνται εξίσου αξιόπιστες και οι δύο.

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\ln \frac{H}{z_0}}{\ln \frac{H_0}{z_0}} \quad (10)$$

$$\frac{V}{V_0} = \left[\frac{H}{H_0} \right]^n \quad (11)$$

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

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.
- H_0 : 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 .
- V_0 : Η ταχύτητα του ανέμου την οποία γνωρίζουμε μέσω μέτρησης.
- z_0 : Το ύψος της τραχύτητας του εδάφους σε μέτρα.
- n : Παράμετρος σχετική με την τραχύτητα του εδάφους, δίνεται σε πίνακες σαν τον προηγούμενο, ανάλογα με τον τύπο της επιφάνειας του εδάφους ή υπολογίζεται προσεγγιστικά από την τρίτη σχέση (των Warne και Calman) συναρτήσει του z_0 .

2.3.2 Επίδραση του ανάγλυφου της γης

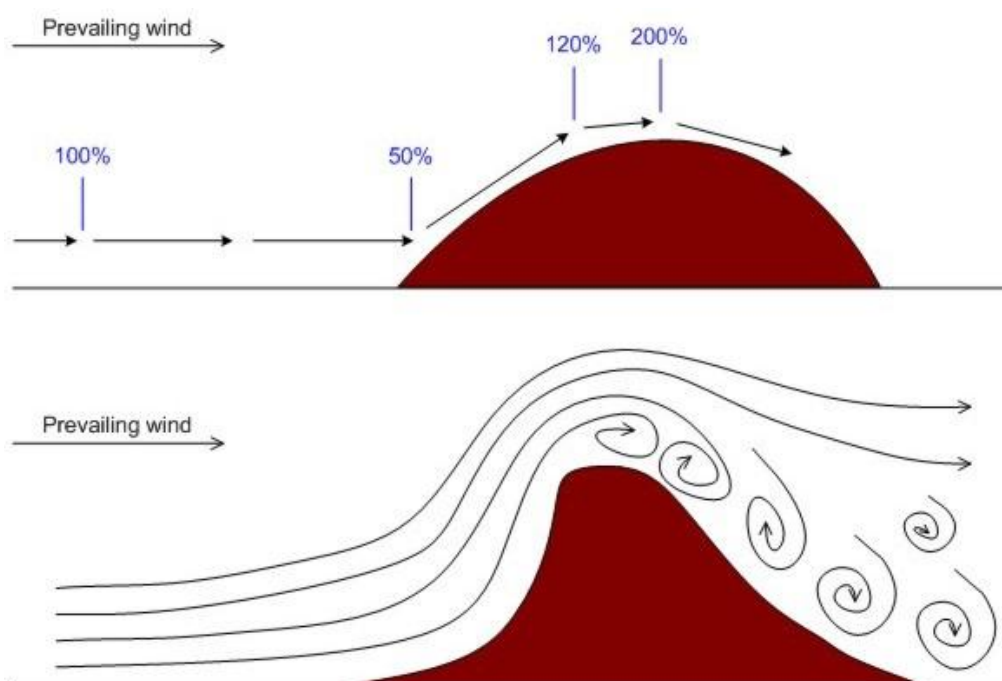
Ο δεύτερος σημαντικός παράγοντας ο οποίος επηρεάζει την ταχύτητα του ανέμου είναι το ανάγλυφο του εδάφους. Με τον όρο ανάγλυφο εννοούμε την μορφολογία, την τοπογραφία του εδάφους δηλαδή την ύπαρξη βουνών, λόφων, κοιλάδων, χαραδρών οι οποίες επηρεάζουν την πορεία του ανέμου. Εάν ο άνεμος πρέπει για παράδειγμα 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 όπως διαπιστώσαμε προηγουμένως, 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 γραμμών ροής. Με βάση την εξίσωση του Bernoulli, η πύκνωση των γραμμών ροής σε ένα πεδίο κίνησης ρευστού συνεπάγεται την αύξηση της ταχύτητας του ρευστού.

Έτσι 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 πεδίου ροής μας, άρα είναι πολύ πιθανόν να υπάρχει αποκόλληση και φουσαλίδα 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 πεδία ροής που σχηματίζονται όταν ο αέρας πρέπει να περάσει πάνω από ένα χαμηλό λόφο και ένα απότομο βουνό.

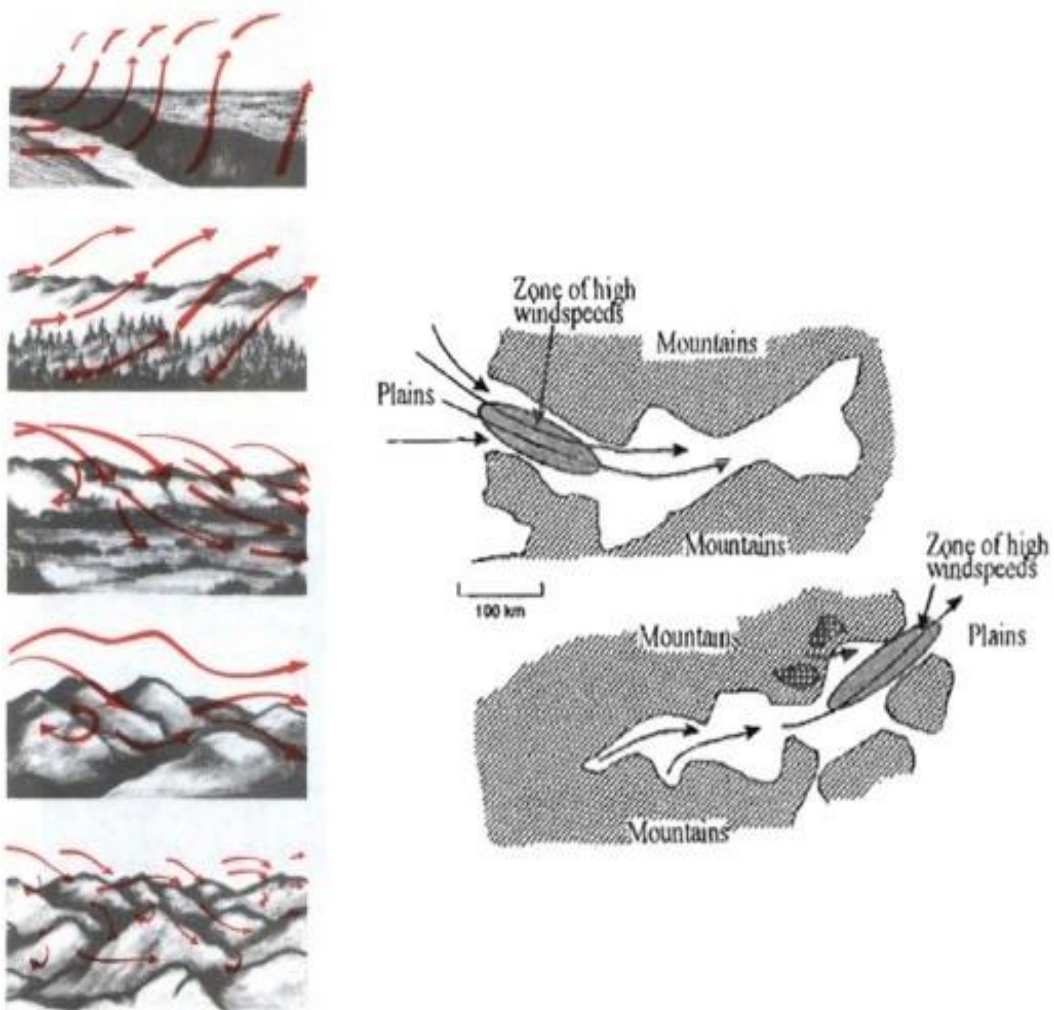


Εικόνα 15 : Μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου κατά το πέρασμα πάνω από χαμηλό λόφο (επάνω) και μεταβολή του πεδίου ροής κατά το πέρασμα από αρκετά απότομο βουνό (κάτω)

Βέβαια εάν το βουνό είναι πολύ απότομο, τότε πιθανόν να δημιουργηθεί μια φουσαλίδα 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 πεδίο ροής καθώς και το που θα είναι η ιδανική θέση για την τοποθέτηση των ανεμογεννητριών μας.

Τέλος γνωρίζουμε, ότι σε χαράδρες έχουμε ροές υψηλών ανέμων και με σταθερές διευθύνσεις, έτσι θεωρούνται ιδανικές τοποθεσίες για τοποθέτηση των ανεμογεννητριών. Περίπλοκες κινήσεις του ανέμου πάνω από διάφορα ανάγλυφα παρουσιάζονται στην τελευταία εικόνα που ακολουθεί σαν επίλογος του κεφαλαίου.



Εικόνα 16 : Κίνηση των αερίων μαζών κατά το πέρασμα τους επάνω από διαφορετικά ανάγλυφα (αριστερά) και μέσα από μια κοιλάδα (δεξιά)

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο

2.4 Ιστορική αναδρομή

Ο άνθρωπος προσπαθεί να εξελίσσεται συνεχώς και να εκμεταλλεύεται οτιδήποτε μπορεί να κάνει την ζωή του 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 (στη θάλασσα μέσω των πανιών χρησιμοποιούσε την δύναμη του ανέμου για να κινεί πλοία, πολύ παλαιότερα) εμφανίζεται στην αρχαία Περσία, στην περιοχή του σημερινού Αφγανιστάν και την Κίνα. Η εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου γινόταν μέσω ανεμόμυλων 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 έρχεται από την Κίνα. Το 200 π.χ. ήταν γνωστοί στην Κίνα ανεμόμυλοι για άλεση δημητριακών αλλά 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 17 : Ανεμόμυλοι της Αρχαίας Περσίας για άλεση δημητριακών (αριστερά) και της Αρχαίας Κίνας για άντληση νερού

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 στη δυτική Ευρώπη.

Στα 1180 τοποθετείται ο πρώτος «ευρωπαϊκός» ανεμόμυλος, στην περιοχή της Νορμανδίας, ένας ανεμόμυλος οριζόντιου άξονα. Εδώ πολλοί επιστήμονες διαφωνούν, αν αυτός ο ανεμόμυλος προήλθε σαν εξέλιξη των ήδη γνωστών στους άραβες ανεμόμυλων ή ανακαλύφθηκε ξεχωριστά. Εν πάση περιπτώσει αυτό έχει μικρή σημασία και 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 ανεμόμυλοι αυτού του τύπου στην Ολλανδία και ο κάθε ένας τους είχε ισχύ έως και 65KW. Τέτοιου τύπου ανεμόμυλοι υπάρχουν και σε πολλά ελληνικά νησιά κυρίως του Αιγαίου λόγω των έντονων ανέμων που επικρατούν εκεί.

Στην επόμενη εικόνα φαίνονται δύο ανεμόμυλοι, ένας τύπου σταθμού και ένας σε πύργο.



Εικόνα 18 : Γερμανικός ανεμόμυλος τύπου φυλακίου (αριστερά) και ολλανδικός ανεμόμυλος τύπου πύργου (δεξιά)

Η ανάπτυξη των ανεμόμυλων 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 ανάγεται στο 1854 από τον μηχανικό και εφευρέτη John Burnham στο Κονέκτικατ. Όπως φαίνεται και στην εικόνα που ακολουθεί είναι ο προπομπός των σύγχρονων ανεμογεννητριών, και ο μοναδικός ανεμόμυλος που τους μοιάζει σαν κατασκευή.

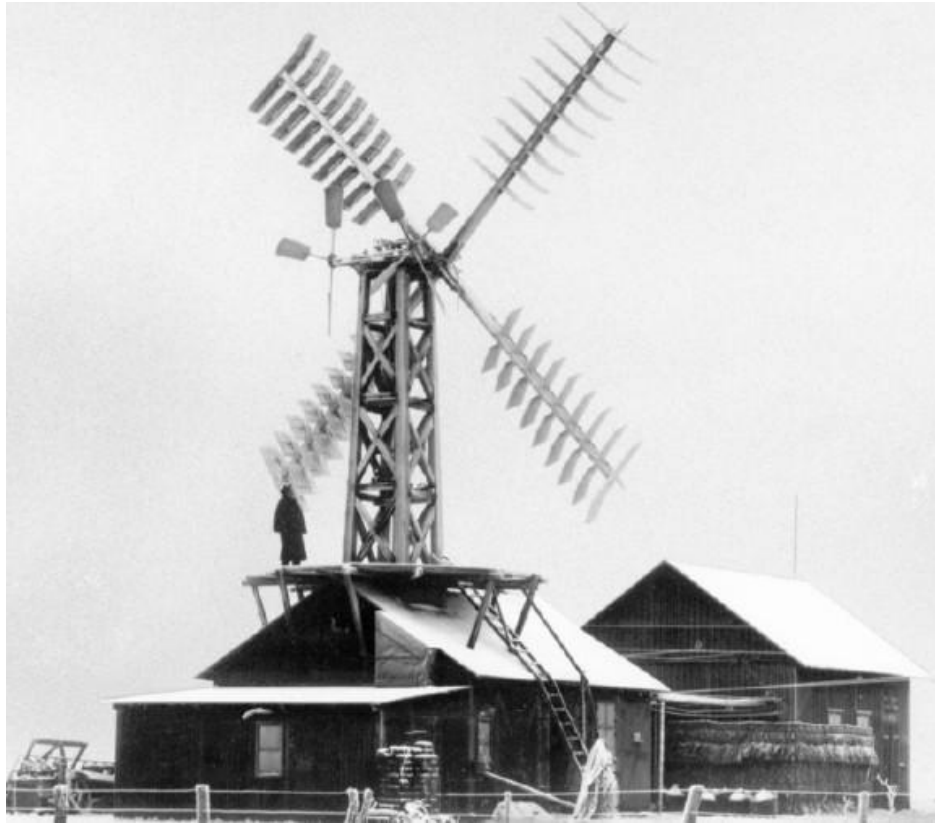


Εικόνα 19 : Ανεμόμυλος αμερικάνικου τύπου για άντληση νερού

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 σαν 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 αλλά 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 χρησιμοποιούνταν 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 αυτή ανεμογεννήτρια παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.



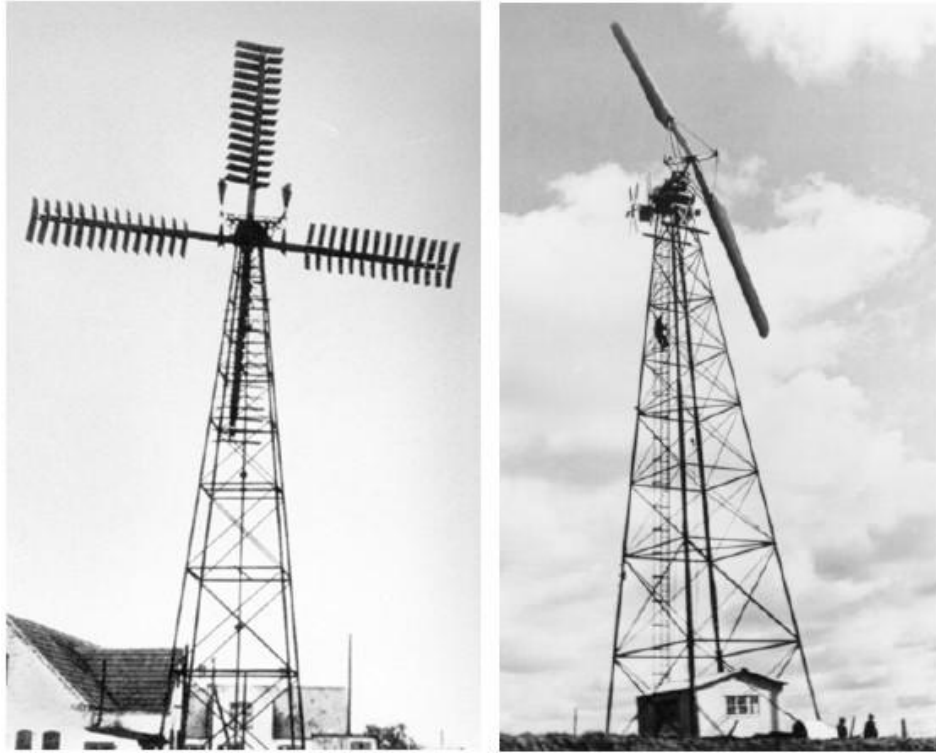
Εικόνα 20 : Η πρώτη ανεμογεννήτρια, κατασκευασμένη από τον La Cour στο Askov της Δανίας το 1891

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, ως το 1908 εγκατάστησε 72 και 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. Smidth company μπαίνει στην αγορά, φέρνοντας καινούρια σχέδια ανεμογεννητριών οι οποίες παρείχαν ισχύ ως και τα 50 kW.

Όπως οι ανεμογεννήτριες του La Cour έτσι και οι ανεμογεννήτριες του Smidht παρήγαγαν συνεχές ρεύμα εκτός από μία. Οι δύο ανεμογεννήτριες ήταν πανομοιότυπες κατασκευαστικά και αυτό φαίνεται και στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 21 : Οι πρώτες ανεμογεννήτριες του La Cour κατασκευής του 1908 (αριστερά) και του Smidht κατασκευής του 1941 (δεξιά)

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

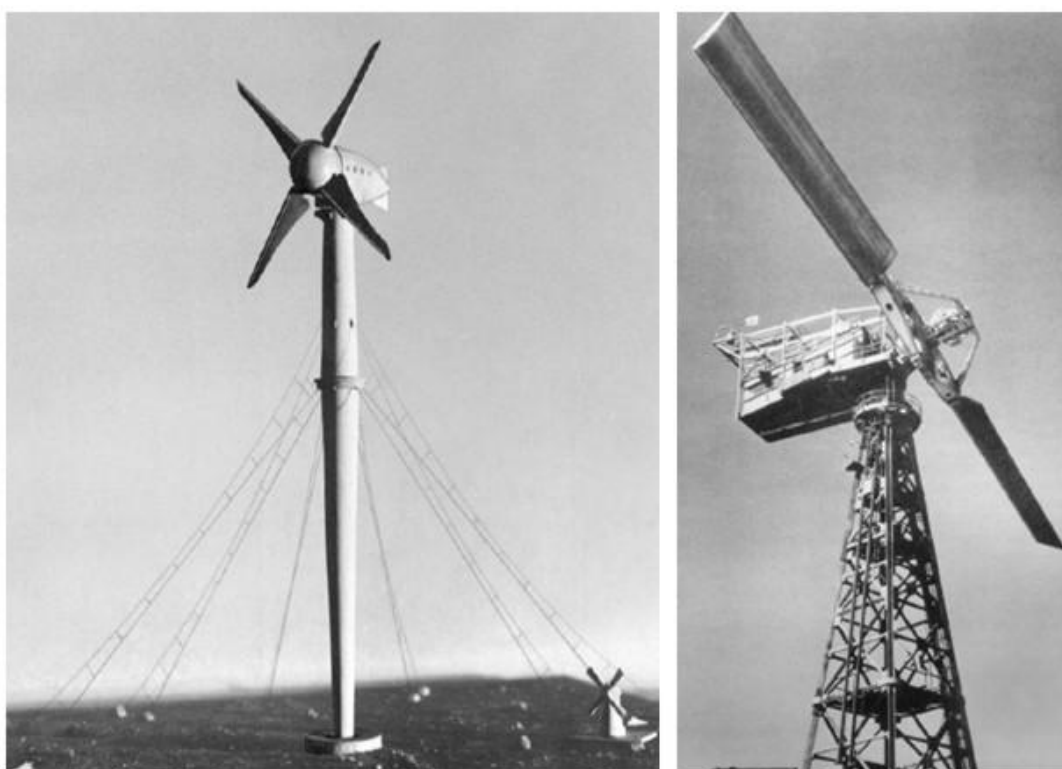
Μετά η Γερμανία αναλαμβάνει την πρωτοκαθεδρία στην παραγωγή ηλεκτρισμού από τον άνεμο. Μέχρι την έναρξη του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου περισσότεροι από δέκα κατασκευαστές ανεμογεννητριών υπάρχουν στην γερμανική επικράτεια και

έχουν ήδη εγκαταστήσει 3600 ανεμογεννήτριες. Διόλου παράξενο δεδομένης της εξάρτησης της χώρας από το πετρέλαιο το οποίο εισήγαγε σε ψηλές τιμές.

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 μεγαλεπήβολο 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 Η.Π.Α.

Οι δύο ανεμογεννήτριες μεγάλης ισχύος, των Kleinhenz – MAN και των Putnam – Smith παρουσιάζονται στις επόμενες εικόνες.



Εικόνα 22 : Ανεμογεννήτρια ισχύος 2 kW των KleinHerz – MAN (αριστερά) και ανεμογεννήτρια ισχύος 1250 kW των Putnam – Smith (δεξιά)

Τα επόμενα χρόνια, 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 στις Η.Π.Α η NASA τα πειράματα σε μεγάλες ανεμογεννήτριες ισχύος γύρω στα 2,5 MW, τις ανεμογεννήτριες οι οποίες πλέον έχουν επικρατήσει και τις γνωρίζουμε όλοι. Το 1979 – 1980 κατασκευάστηκαν τα πρώτα αιολικά πάρκα στις ΗΠΑ. Περιελάμβαναν αρχικά 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 Tehachari το οποίο κατασκευάστηκε το 1986 και χρησιμοποιεί ανεμογεννήτριες MAN – Aero man.



Εικόνα 23 : Αιολικό πάρκο, κατασκευασμένο το 1986 στην Καλιφόρνια

Τελευταία μέχρι στιγμής 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 έχουμε μεγαλύτερη απόδοση. Το πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο κατασκευάστηκε το 1991 στην Δανία και έχει 11 ανεμογεννήτριες ισχύος 450 kW η κάθε μία.



Εικόνα 24 : Πρώτο υπεράκτιο αιολικό πάρκο στην τοποθεσία Vindebjerg της Δανίας

2.5 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, η παράμετρος στιβαρότητας της μηχανής, ο αριθμός των πτερυγίων της και τέλος η τοποθέτηση του άξονα της 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 πιο αναλυτική.

2.5.1 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:

$$50W \leq N_o \leq 50kW$$

- 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:

$$50kW \leq N_o \leq 500kW$$

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

$$500kW \leq N_o \leq 4MW$$

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 ώστε η ύπαρξη ισχυρότερων μηχανών να αυξάνει τα όρια.

2.5.2 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 μεταφράζεται σε παράμετρο περιστροφής. Η τιμή του λ δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V} \quad (12)$$

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. Εκτός 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.

2.5.3 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 ανάλογα με τον τύπο της αιολικής μηχανής από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\sigma = \frac{z \cdot c \cdot R}{\pi \cdot R^2} \text{ για μηχανές οριζόντιου άξονα} \quad (13)$$

$$\sigma = \frac{z \cdot c}{R} \text{ για μηχανές κατακόρυφου άξονα} \quad (14)$$

Όπου:

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

Με βάση τη στιβαρότητα προκύπτουν οι ακόλουθες δύο υποκατηγορίες 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, 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 χαρακτηριστικά, 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 τις καθιστούν κατάλληλες για ηλεκτροπαραγωγή αυτές τις ηλεκτρικές μηχανές.

2.5.4 Κατηγοριοποίηση με βάση τον αριθμό των πτερυγίων

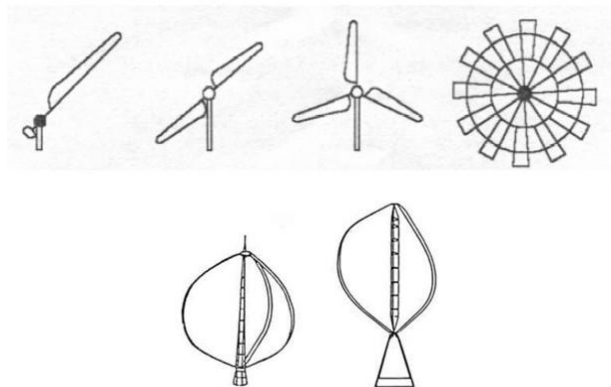
Οι αιολικές μηχανές μπορούν να χωριστούν και με βάση τον αριθμό των πτερυγίων τους σε τέσσερις κατηγορίες οι οποίες είναι οι παρακάτω:

- **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 θεωρούνται ιδανικές για ηλεκτροπαραγωγή.

- Πολυπτέρυγες: Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν όσες αιολικές μηχανές έχουν παραπάνω από τρία πτερυγία. 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 επόμενη εικόνα παρουσιάζονται σχηματικά μηχανές τόσο κατακόρυφου όσο και οριζόντιου άξονα των τεσσάρων παραπάνω κατηγοριών.



Εικόνα 25 : 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)

2.5.5 Κατηγοριοποίηση με βάση την τοποθέτηση του άξονα περιστροφής

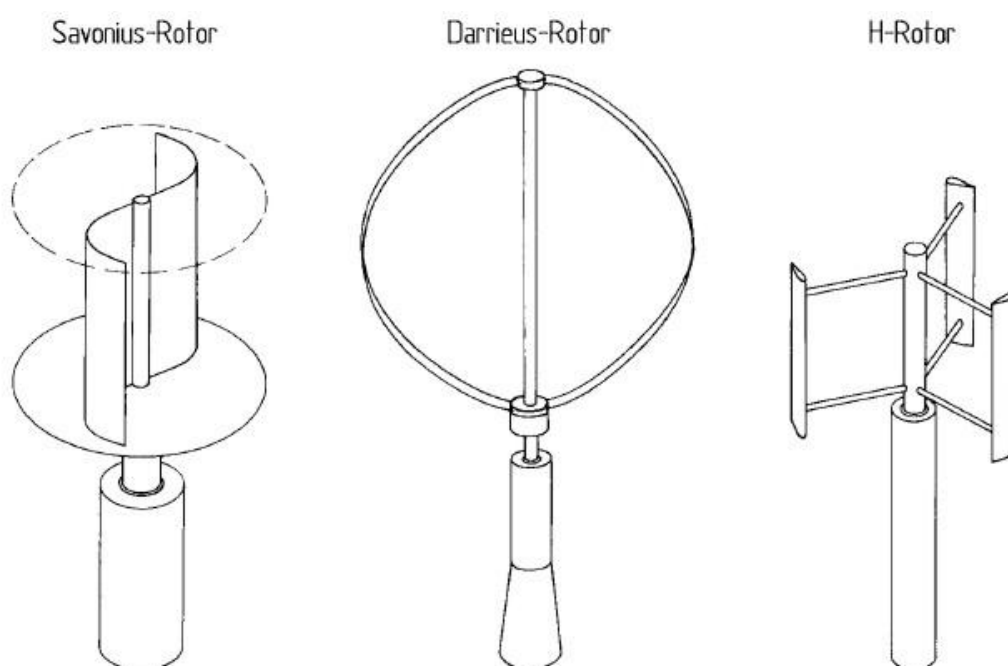
Γενικά έχουν παρουσιαστεί πολλοί τύποι αιολικών μηχανών όμως μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκουν σε δύο κατηγορίες αναλόγως των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών τους. Αυτές τις δύο κατηγορίες ήδη τις έχουμε δει στην ιστορική αναδρομή, είναι οι αιολικές μηχανές οριζόντιου άξονα και οι αιολικές μηχανές κατακόρυφου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

- 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 εμφανίζονται 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, Lebost, 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 26 : Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα τριών τύπων

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα έχουν πάρα πολλά μειονεκτήματα τα οποία θα δούμε σε επόμενη παράγραφο, έτσι δεν έχουν μεγάλο μερίδιο 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 χρησιμοποιούν υποβοηθητικά μια ανεμογεννήτρια τύπου Savonius. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται ο συνδυασμός Darrieus – Savonius.



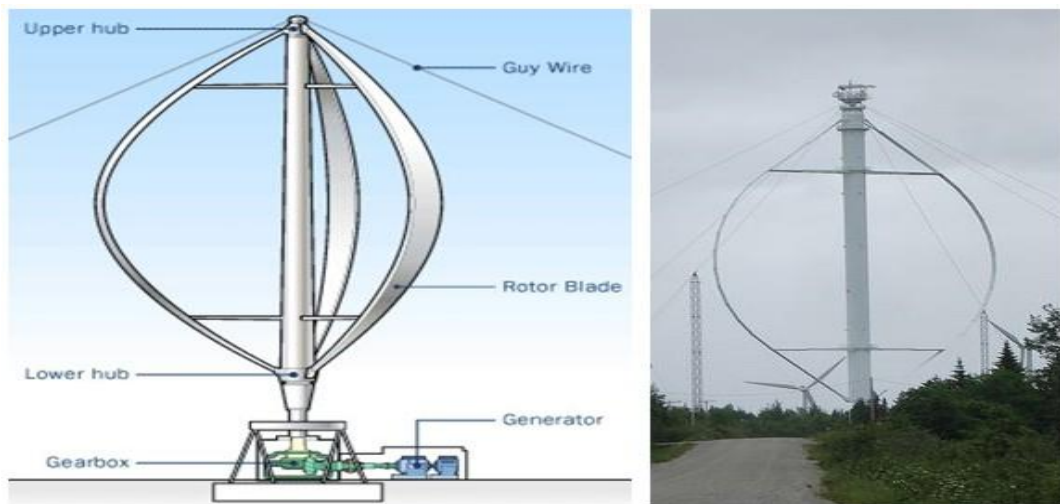
Εικόνα 27 : Ανεμογεννήτρια Darrieus τριών πτερυγίων που χρησιμοποιεί μια ανεμογεννήτρια Savonius δύο πτερυγίων για την εκκίνηση της διαγραμματικά (αριστερά) και σε εφαρμογή στην Taiwan (δεξιά)

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα τα οποία τις καθιστούν ιδανικές για ηλεκτροπαραγωγή. Το βασικότερο των πλεονεκτημάτων τους είναι ότι δεν χρειάζονται προσανατολισμό, 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 σε μεγάλο ύψος τους μηχανισμούς της) αλλά και την συντήρηση της ανεμογεννήτριας.

Ένα ακόμη πλεονέκτημα τους 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 στο πάρκο ή δίνοντας μας την δυνατότητα να τοποθετήσουμε μεγαλύτερο αριθμό ανεμογεννητριών σε αυτό.

Εκτός από τα πλεονεκτήματά 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 οριζοντίου άξονα. Το πρώτο τους μειονέκτημα είναι ο μικρότερος συντελεστής ισχύος. Το δεύτερο αφορά στην

αεροδυναμική σχεδίαση τους, που ακόμη δεν είναι η καλύτερη δυνατή, με αποτέλεσμα την ευαισθησία τους σε περιπτώσεις λειτουργίας εκτός σχεδιασμού, με 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 κατακόρυφου άξονα ακόμη δεν έχουν ερευνηθεί εκτενώς και η τεχνολογία τους δεν είναι στην αιχμή, έχουν όμως πολλά περιθώρια βελτίωσης. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η ανεμογεννήτρια Darrieus.



Εικόνα 28 : Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα, τύπου Darrieus. Αριστερά παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα με τα κύρια μέρη της και δεξιά παρουσιάζεται εγκατεστημένη σε ένα αιολικό πάρκο στο Κεμπέκ του Καναδά

- 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 από τότε αποτελούν την βασική επιλογή για όλες τις χρήσεις.

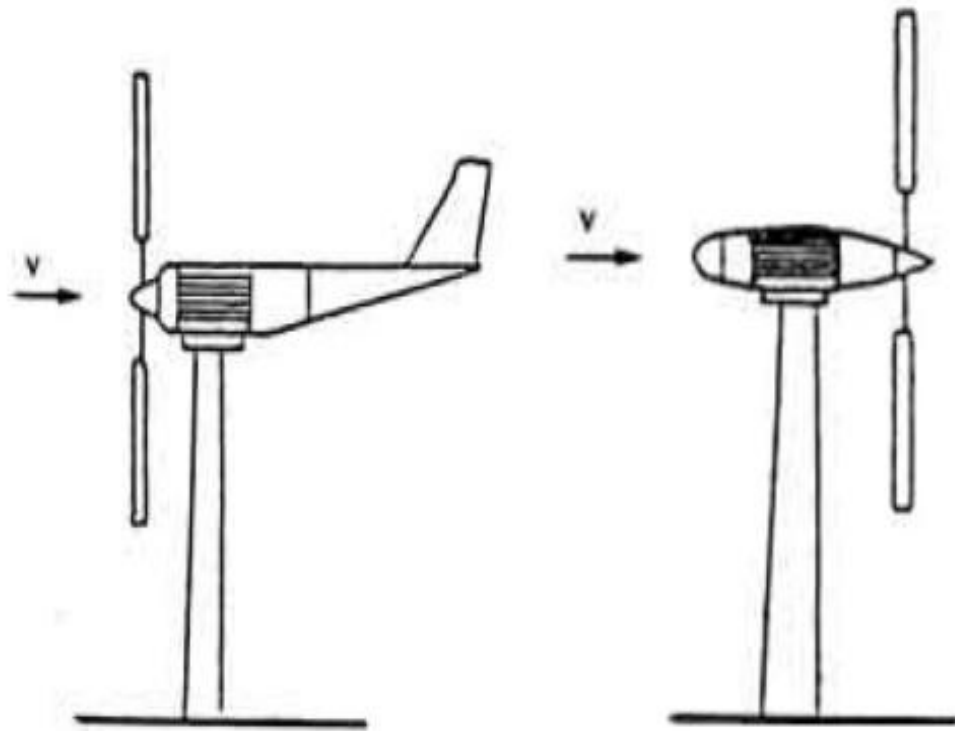
Σε αυτή την κατηγορία μπορούν να υπαχθούν όλοι οι πολυπτερυγοι ανεμόμυλοι, από τους ολλανδικούς των τεσσάρων πτερυγίων έως και τους αμερικάνικους που έχουν γύρω στα δέκα και περισσότερα πτερύγια, και οι γνωστές σε όλους μας ανεμογεννήτριες δύο και τριών πτερυγίων τοποθετημένες πάνω στους τεράστιους πυλώνες.

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 πυλώνα, 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 (κάλυμμα των μηχανισμών) αφού ο δρομέας είναι πίσω από τον πύργο.

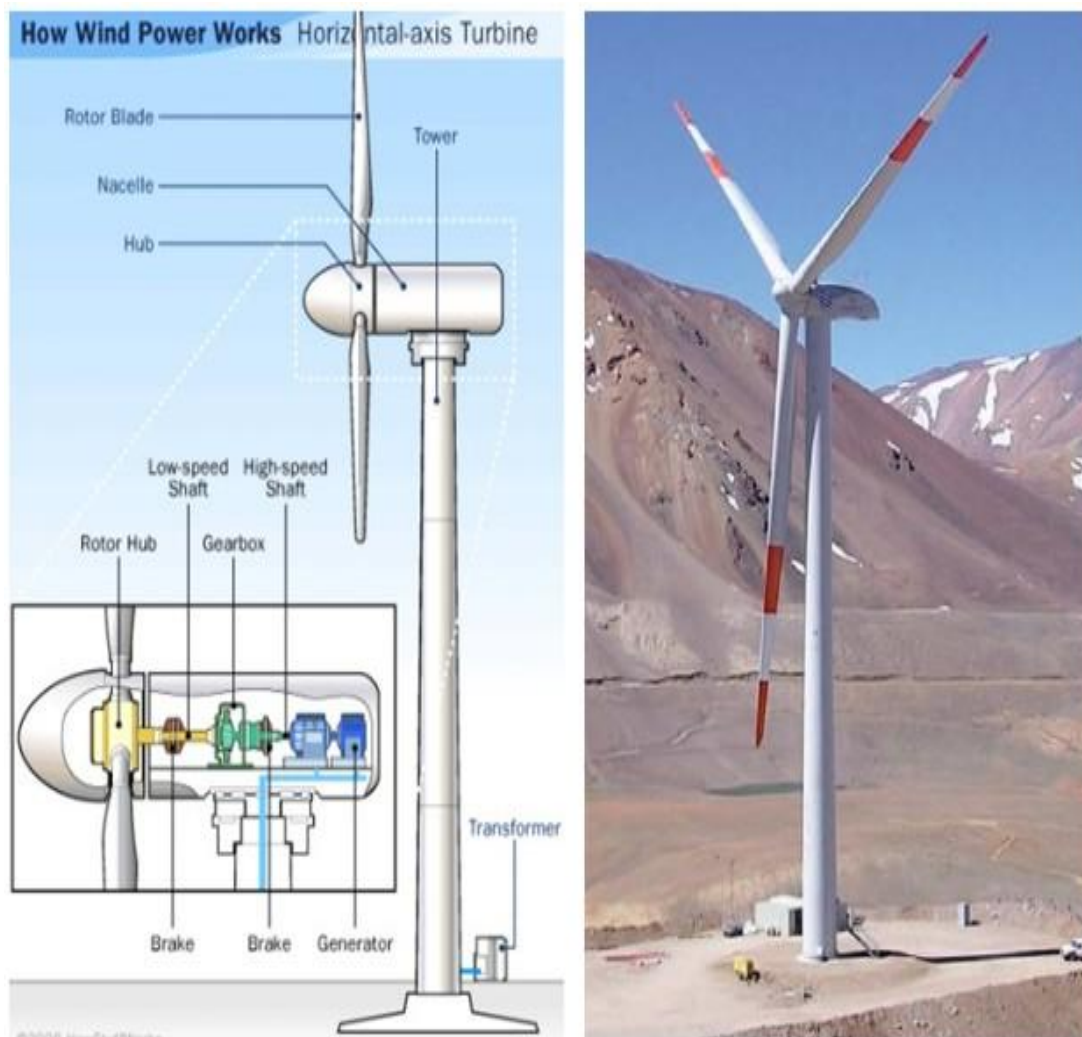
Παρόλο που οι ανάντη ανεμογεννήτριες θεωρούνται καλύτερες γιατί αντιμετωπίζουν τον άνεμο χωρίς να έχει βρεθεί κάτι άλλο μπροστά τους, εντούτοις οι κατάντη έχουν ένα μεγάλο πλεονέκτημα, η νασέλλα έχει τέτοιο σχεδιασμό έτσι ώστε να παίζει και τον ρόλο του πτερυγίου προσανατολισμού και έτσι δεν χρειάζεται επιπλέον πτερύγιο.

Οι δύο αυτοί τύποι φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 29 : Ανάντη (αριστερά) και κατάντη (δεξιά) ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα

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 30 : Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα. Αριστερά παρουσιάζεται ένα σχεδιάγραμμα με τα κύρια μέρη της και δεξιά παρουσιάζεται εγκατεστημένη στην τοποθεσία Veladero της Αργεντινής

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 (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 εσωτερικά υπάρχουν συστήματα πέδησης για να μπορεί να σταματάει η ανεμογεννήτρια, σύστημα ατράκτου πλήμνης για να μεταφέρεται η κίνηση των περυγίων στους 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 που χρησιμοποιείται στο αιολικό πάρκο που θα μελετήσουμε.

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 γωνίας των πτερυγίων μπορεί να ρυθμιστεί η ταχύτητα περιστροφής τους, άρα κατά συνέπεια μπορεί να ρυθμιστεί και η ισχύς που δίνουν. Αυτό έχει σαν 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, που μπορεί να προκαλέσει απότομη αύξηση των στροφών τους. Το δεύτερο τους πλεονέκτημα είναι η πολύ καλή αεροδυναμική συμπεριφορά 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 τεχνολογίας αιχμής που δίνει μια ασφαλή λύση στον αγοραστή και έτσι τις κάνει περισσότερο επιθυμητές στην αγορά αλλά και πιο αξιόπιστες, με λιγότερα μηχανικά προβλήματα. Τα μειονεκτήματα 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 ασχοληθούμε με τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, θα μιλούμε μόνο για ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα καθώς τέτοια είναι και η ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιήθηκε στο πάρκο που θα μελετήσουμε.

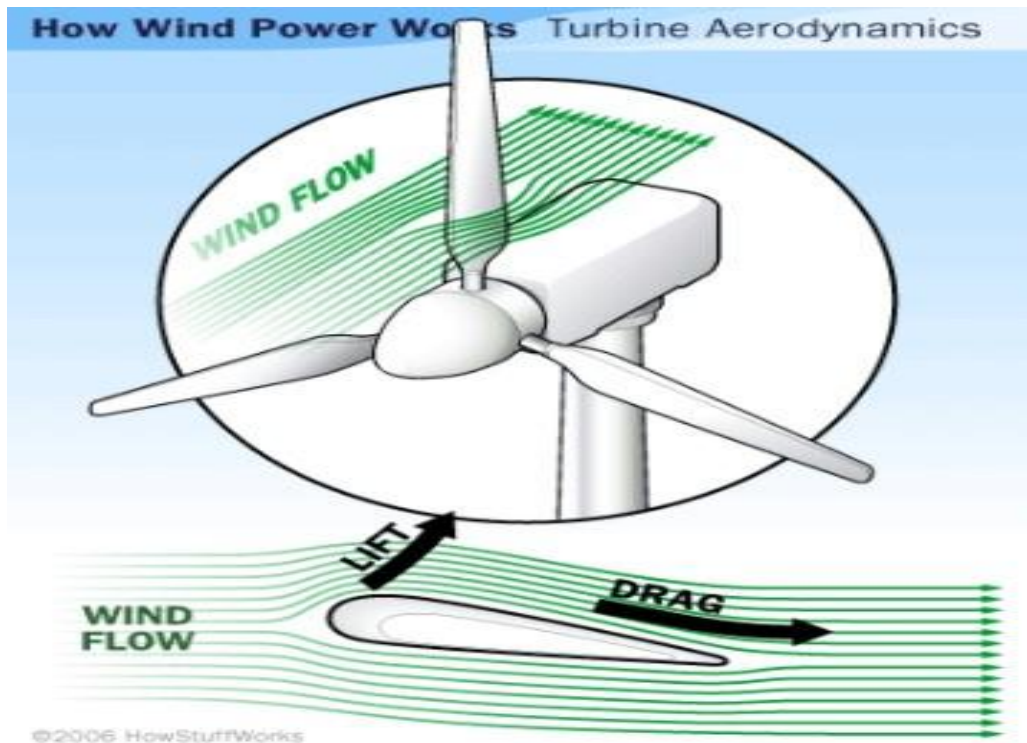
2.6 Λειτουργία ανεμογεννητριών – Παραγωγή ενέργειας

Σε αυτή την ενότητα του παρόντος κεφαλαίου θα ασχοληθούμε με τον τρόπο λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας. Σε πρώτη φάση θα δούμε πως η κίνηση του ανέμου, μετατρέπεται σε περιστροφή της ανεμογεννήτριας. Σε δεύτερη φάση θα δούμε την ανάλυση της ανεμογεννήτριας, σαν ένα κομμάτι του πεδίου ροής 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 και πιο εξειδικευμένη αναφορά θα γίνει στο δεύτερο μέρος, ειδικά για την ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιείται στο αιολικό πάρκο που θα μελετήσουμε.

2.6.1 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 και έτσι αυτά περιστρέφονταν. Στις ανεμογεννήτριες αυτό δεν ισχύει, η κλίση των πτερυγίων είναι πολύ μικρή είναι σχεδόν κάθετα στο πεδίο ροής.



Εικόνα 31 : Κίνηση του ανέμου γύρω από το πτερύγιο μιας ανεμογεννήτριας

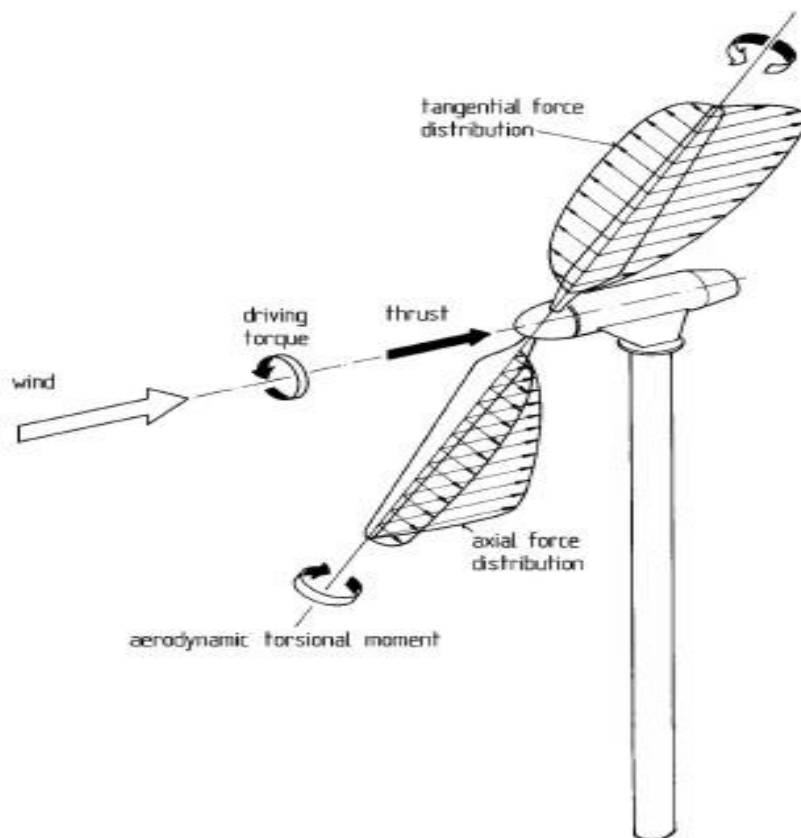
Τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας συμπεριφέρονται όπως οι πτέρυγες ενός αεροσκάφους και υπακούουν στους κανόνες και τις αναλύσεις της αεροναυπηγικής επιστήμης. Ένα πτερύγιο αποτελείται από αεροτομές (μπορεί να είναι ίδιες ή διαφορετικές) στις οποίες προσπίπτει ο αέρας με μια συγκεκριμένη γωνιά προσβολής. Η κίνηση του ανέμου πάνω σε μια αεροτομή προκαλεί δύο δυνάμεις (προηγούμενη εικόνα) . Η πρώτη δύναμη είναι η δύναμη της αντίστασης (drag), προκαλείται από την ύπαρξη του πτερυγίου ως εμποδίου στον δρόμο του αέρα και θέλουμε να είναι όσο το δυνατό μικρότερη.

Η δεύτερη δύναμη είναι η άνωση (lift). Η δύναμη αυτή προέρχεται από την διαφορά πιέσεων στις δύο πλευρές της αεροτομής (Νόμος Bernoulli).

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 ασκούνται από το ρευστό στην αεροτομή να έχουν μια συνιστώσα προς τα πάνω.

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 των πτερυγίων, έτσι ώστε να παράγεται η ίδια δύναμη άνωσης. Η άνωση εξαρτάται από την ταχύτητα του ρευστού άρα μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου προκαλεί μεγαλύτερη ή μικρότερη άνωση. Η άνωση όμως εξαρτάται και από την γωνία προσβολής. Στις περισσότερες 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 άνωση. Έτσι, μεταβολή της γωνίας προσβολής μπορεί να είναι ο ρυθμιστικός παράγοντας της περιστροφικής ταχύτητας του ρότορα μας.



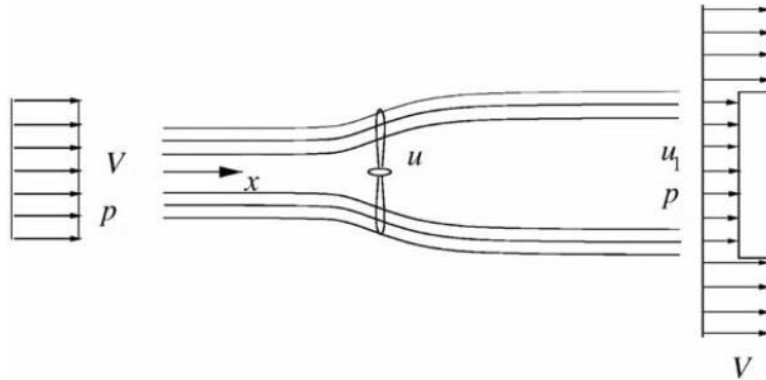
Εικόνα 32 : Κατανομή των δυνάμεων που ασκούνται στα πτερύγια.

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 καλύτερης 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, απώλεια στήριξης του πτερυγίου και διακοπή της ομαλής περιστροφής.

2.6.2 Η ανεμογεννήτρια ως μέρος πεδίου ροής – 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

άνεμου, 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 πεδίο ροής ανέμου όπως αυτό της επόμενης εικόνας.



Εικόνα 33 : Πεδίο ροής γύρω από ανεμογεννήτρια

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 και έτσι δεν υπάρχουν ούτε απώλειες τριβής στην ανεμογεννήτρια, ούτε απώλειες ανάμιξης στον απόροο (έξοδο ροής) 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.

$$P_{W_{in}} = \frac{1}{2} \rho S_1 V^3 \quad [W] \quad (15)$$

$$P_{W_{out}} = \frac{1}{2} \rho S_2 u_1^3 \quad [W] \quad (16)$$

Αφού το πεδίο μας είναι ιδανικό και δεν υπάρχουν καθόλου απώλειες, τότε η διαφορά της ισχύος πριν και μετά την ανεμογεννήτρια, πρέπει να ισούται 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 και έτσι ισχύει η εξίσωση της συνέχειας.

$$\dot{m} = \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \Rightarrow \rho S_1 V = \rho S_2 u_1 \quad [kg/s] \quad (17)$$

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

$$P_m = \frac{1}{2} \dot{m} (V^2 - u_1^2) \quad [W] \quad (18)$$

Από αυτή την εξίσωση παρατηρούμε το εξής παράδοξο. Η μέγιστη μηχανική ισχύς παράγεται όταν μηδενιστεί η ταχύτητα του αέρα στην έξοδο.

Αυτό δημιουργεί ένα πρόβλημα γιατί όταν σταματήσει τον αέρα δεν μπορεί να έρθει να περάσει άλλος, έτσι μηδενίζεται και η ταχύτητα εισόδου. Εάν σταματήσει η ταχύτητα εισόδου του αέρα τότε έχουμε μηδενική παραγωγή ισχύος.

Το παράδοξο οφείλεται 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 εκείνη της δράσης - αντίδρασης. Με βάση την αρχή διατήρησης της ορμής στο πεδίο μας ισχύει η παρακάτω εξίσωση.

$$F = \dot{m}(V - u_1) \quad [N] \quad (19)$$

Από τη 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.

$$P_m = Fu = \dot{m}u(V - u_1) \quad [W] \quad (20)$$

Στην συνέχεια ακολουθούν μια σειρά από πράξεις με σκοπό να καταλήξουμε στον υπολογισμό της μηχανικής ισχύος με μια σωστή εξίσωση. Καταρχήν εξισώνουμε τα δεξιά μέλη των δύο εξισώσεων που εκφράζουν την μηχανική ισχύ και υπολογίζουμε την ταχύτητα u αμέσως μετά την ανεμογεννήτρια. Στην συνέχεια την αντικαθιστούμε στην πιο πάνω έκφραση και παίρνουμε τη 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, αν συναντήσει αέρα μιας συγκεκριμένης ταχύτητας. Από αυτή και το 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 . Δίνεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$C_P = \frac{P_m}{P_w} = \frac{\frac{1}{4}\rho S (V^2 - u_1^2)(V + u_1)}{\frac{1}{2}\rho S V^3} \quad (21)$$

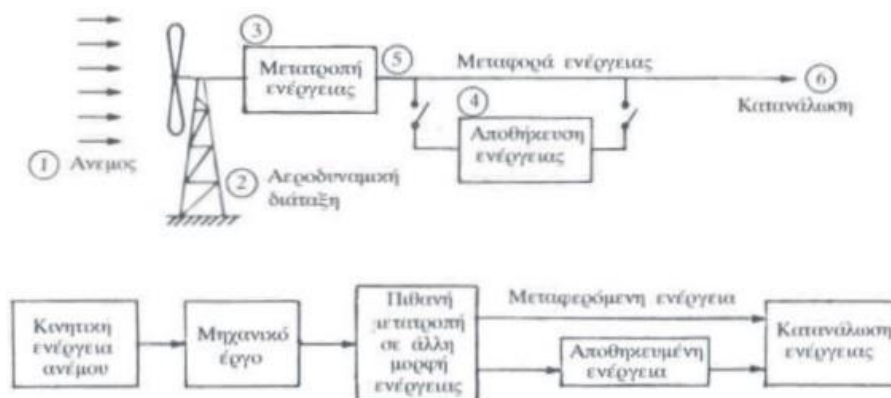
Το μέγεθος αυτό είναι πολύ σημαντικό, χαρακτηρίζει κάθε ανεμογεννήτρια και θα το δούμε αναλυτικότερα σε επόμενη ενότητα αυτού του κεφαλαίου. Ως επίλογο της ενότητας αυτής μπορούμε να αναφέρουμε ότι έχουμε καταφέρει να δούμε πόση μηχανική ισχύ μπορούμε να πάρουμε από τον άνεμο σε κάποια ταχύτητα. Γνωρίζοντας 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.

2.6.3 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 ηλεκτρική ενέργεια. Στην συνέχεια με το ηλεκτρικό ρεύμα η ενέργεια αυτή, είτε μεταφέρεται στο δίκτυο, είτε αποθηκεύεται, έτσι ώστε να δοθεί για κατανάλωση.

Για την μεταφορά της ενέργειας χρειάζεται να ανέβει η τάση του ηλεκτρικού ρεύματος, έτσι χρειαζόμαστε ένα μετασχηματιστή κάτω από την ανεμογεννήτρια ο οποίος να παραλαμβάνει το ρεύμα που δίνει η γεννήτρια και να το ανυψώνει σε μια νέα τάση έτσι ώστε να μεταφερθεί χωρίς μεγάλες απώλειες, όπως γνωρίζουμε από την ηλεκτρολογία. Όλη αυτή η διαδικασία φαίνεται διαγραμματικά στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 34 : Διάταξη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με την χρήση ανεμογεννήτριας

Περισσότερες λεπτομέρειες δεν θα αναλυθούν εδώ. Για τον άνεμο έχει γίνει εκτενής αναφορά στο κεφάλαιο 2 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 αναλυθούν στο 4ο κεφάλαιο για την

ανεμογεννήτρια τύπου Vestas που χρησιμοποιούμε στο αιολικό πάρκο που θα μελετήσουμε.

2.7 Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών

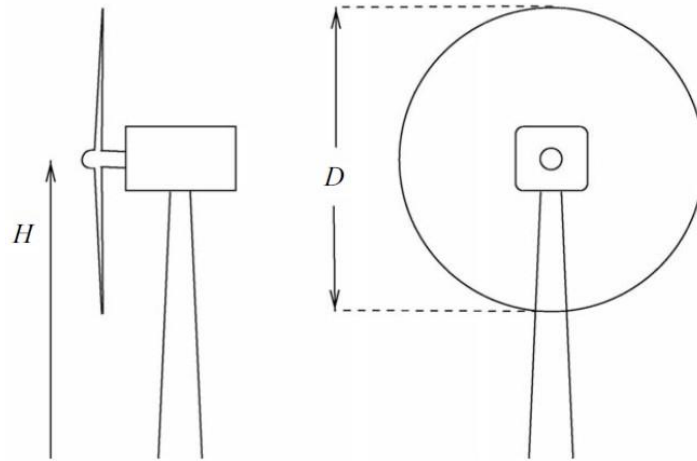
Μετά από την λειτουργία των ανεμογεννητριών, θα δούμε τα βασικά χαρακτηριστικά τους. Στην ενότητα αυτή θα αναφερθούμε σε αυτά και θα δούμε πως επηρεάζουν την ικανότητα παραγωγής ισχύος της ανεμογεννήτριας.

Όπως είδαμε στο δεύτερο κεφάλαιο ένα σημαντικό μέρος του αιολικού δυναμικού μπορεί να αξιοποιηθεί για ηλεκτροπαραγωγή. Για να αξιοποιηθεί αυτό το δυναμικό κατά βέλτιστο τρόπο, απαιτείται η σωστή επιλογή ανεμογεννήτριας. Στην αγορά υπάρχουν πολλοί τύποι ανεμογεννητριών για να επιλεγθεί κάποια κατάλληλη να τοποθετηθεί σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία. Η επιλογή αυτή θα γίνει με κριτήριο το μέγιστο οικονομικό κέρδος. Για να βρούμε την καλύτερη 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 τελικά και την απόδοση της.

2.7.1 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 πτερυγίων της ανεμογεννήτριας. Για καλύτερη κατανόηση προσέξτε την παρακάτω εικόνα.

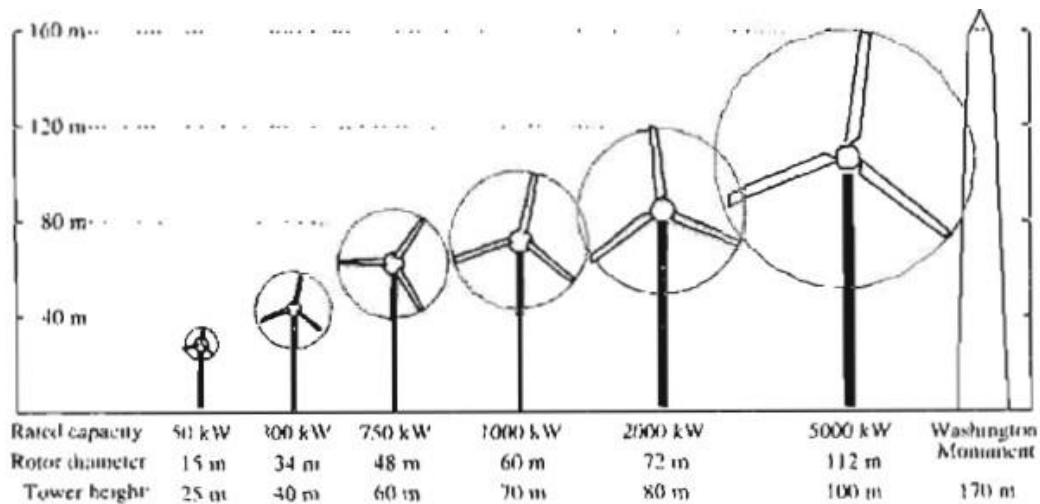


Εικόνα 35 : Σχεδιάγραμμα το οποίο απεικονίζει το ύψος της ανεμογεννήτριας (αριστερά) και την διάμετρο του ρότορα της (δεξιά)

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, 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. Αυτό είναι το κυριότερο κέρδος που έχουμε από τις ψηλές ανεμογεννήτριες. Υπάρχει όμως ακόμη ένας άλλος παράγοντας, ο οποίος αυξάνει και άλλο το κέρδος.

Όσο πιο ψηλά τοποθετημένη είναι μια ανεμογεννήτρια τότε υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης περωτών μεγαλύτερων διαμέτρων. 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 παρουσιάζονται ταλαντώσεις. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η διαφορά στην ισχύ που παράγει κάθε ανεμογεννήτρια αναλόγως του ύψους της.



Εικόνα 36 : Μεταβολή της ισχύος της ανεμογεννήτριας αναλόγως του ύψους και της διαμέτρου του ρότορα

Όπως φαίνεται και από την παραπάνω εικόνα η ισχύς αυξάνεται 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 εξαρτάται 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.

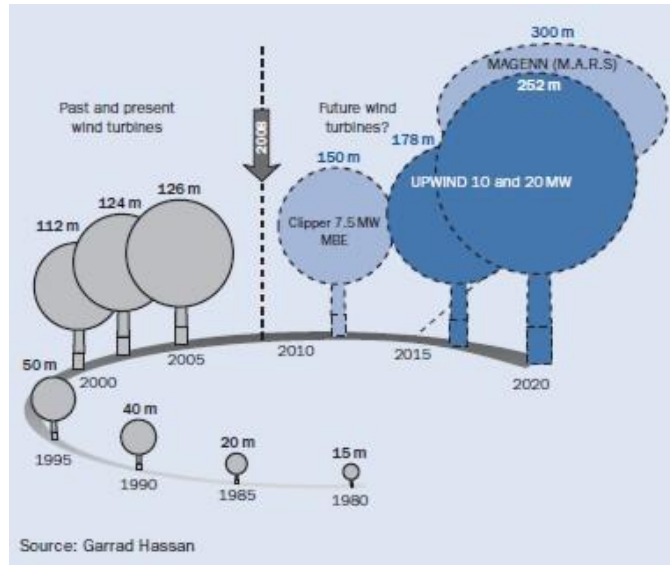
Table I.3.1: Design choices of leading manufacturers

		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 37 : Μεταβολή της ισχύος αναλόγως της διαμέτρου αλλά και άλλων σχεδιαστικών επιλογών για 10 ανεμογεννήτριες από κορυφαίους σχεδιαστές

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι όσο μεγαλύτερο ύψος και διάμετρο έχει μια ανεμογεννήτρια τόσο πιο σύγχρονη είναι και 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 38 : Μεταβολή της διαμέτρου των ανεμογεννητριών διαχρονικά

2.7.2 Συντελεστής ισχύος C_P

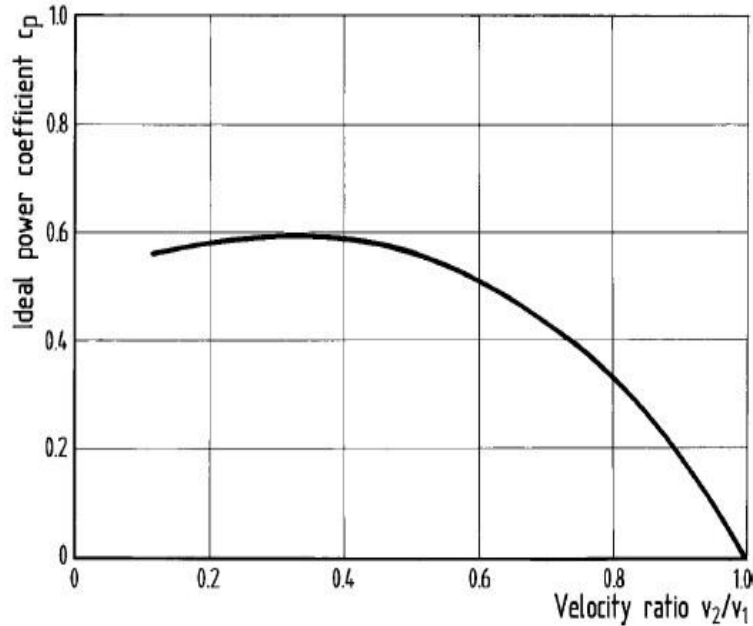
Ο συντελεστής ισχύος είναι το δεύτερο βασικό χαρακτηριστικό των ανεμογεννητριών, μετά από τις διαστάσεις τους. Εκφράζει το ποσοστό της ενέργειας του ανέμου που μπορούν να μετατρέψουν σε μηχανικό έργο. Σε προηγούμενη ενότητα έχουμε βρει την σχέση με την οποία υπολογίζεται ο συντελεστής ισχύος και είναι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

$$C_P = \frac{P_m}{P_w} = \frac{\frac{1}{4}\rho S(v^2 - u_1^2)(v + u_1)}{\frac{1}{2}\rho S v^3} \quad (22)$$

Στη συνέχεια θα μετατρέψουμε τη σχέση σε μια άλλη μορφή και θα την παραγωγίσουμε, για να μπορέσουμε να δούμε αν υπάρχουν τοπικά μέγιστα ή ελάχιστα.

$$C_P = \frac{P_m}{P_w} = \frac{1}{2} \left| 1 - \left(\frac{u_1}{v} \right)^2 \right| \left| 1 + \frac{u_1}{v} \right| \quad (23)$$

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



Εικόνα 39 : Σχηματική απεικόνιση της συνάρτησης υπολογισμού του συντελεστή ισχύος

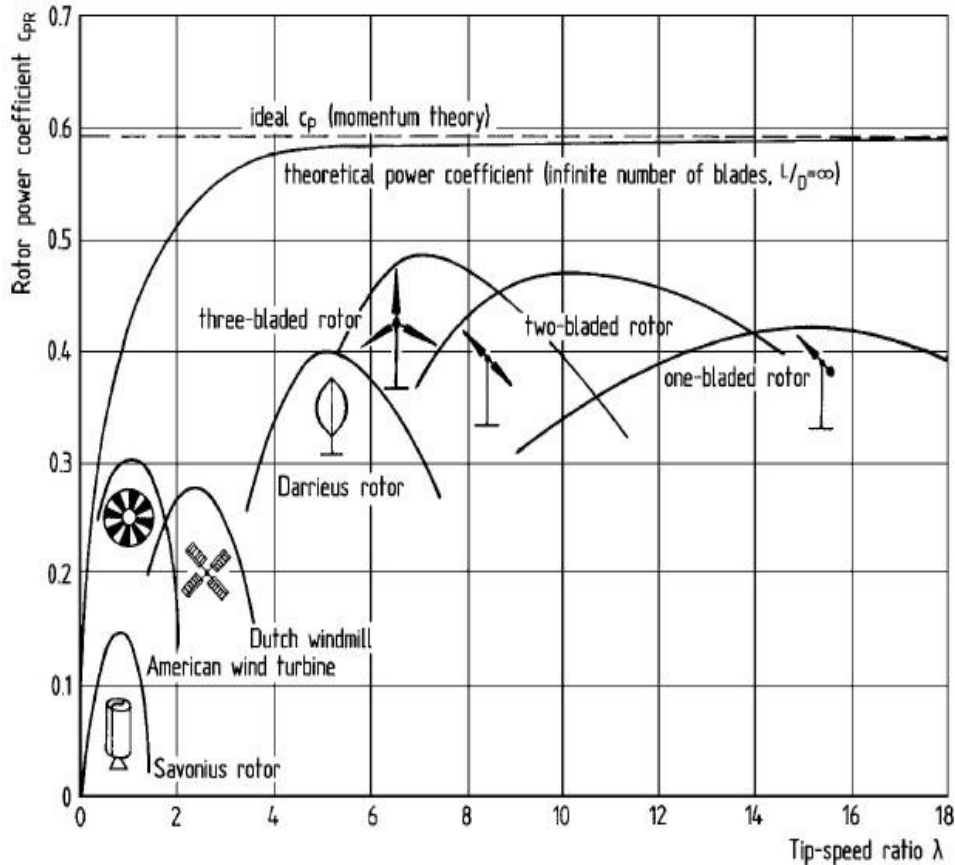
$$\frac{u_1}{V} = \frac{1}{3} \Rightarrow C_P = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (24)$$

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 πεδίου ροής γύρω από την ανεμογεννήτρια.

Στην πραγματικότητα απώλειες όπως οι τριβές και οι στροβιλισμοί του αέρα μειώνουν και άλλο τον συντελεστή ισχύος και 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 σε προηγούμενο μέρος αυτού του κεφαλαίου).

Η παράμετρος περιστροφής έχει άμεση σχέση με τον σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας καθώς εξαρτάται από την ακτίνα των πτερυγίων. Αυτή η εξάρτηση έχει παρασταθεί σε ένα πολύ χρήσιμο διάγραμμα που παρουσιάζει ο Hau. Το διάγραμμα παρουσιάζεται παρακάτω.

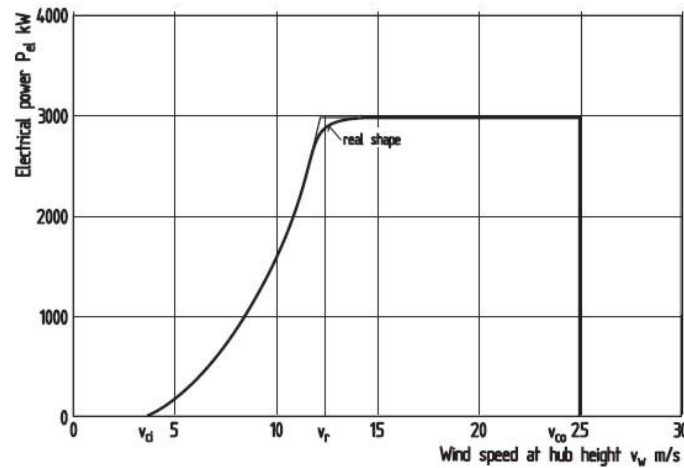


Εικόνα 40 : Μεταβολή του συντελεστή ισχύος αναλόγως του τύπου της ανεμογεννήτριας

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

2.7.3 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 ισχύ που αποδίδει η ανεμογεννήτρια, ανάλογα με την ταχύτητα 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 41 : Καμπύλη ισχύος μιας πειραματικής ανεμογεννήτριας Growian

Αυτή η καμπύλη είναι πολύ σημαντική για τον αγοραστή που θέλει να επενδύσει σε ανεμογεννήτριες και να αποκομίσει το μέγιστο κέρδος γιατί του δίνει τρεις χαρακτηριστικές ταχύτητες του ανέμου. Η πρώτη είναι η V_d ή V_{min} , 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 , 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} , 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. Ένας επενδυτής γνωρίζοντας τα χαρακτηριστικά του ανέμου στην περιοχή που θα τοποθετήσει τις ανεμογεννήτριες, πρέπει να επιλέξει την ανεμογεννήτρια, η οποία θα λειτουργεί τον περισσότερο καιρό στην ονομαστική της ισχύ. Με αυτό τον τρόπο θα πετύχει τον βέλτιστο συντελεστή εκμετάλλευσης f (είναι ο λόγος της ηλεκτρικής ισχύος που παίρνουμε από την ανεμογεννήτρια μας προς την ονομαστική της ισχύ) και έτσι θα έχει μία επιτυχημένη επένδυση.

Κεφάλαιο 3

Αιολικό πάρκο «Τρίκορφο» Πύργου

Δήμου Δωρίδας

Νομού Φωκίδας

Εισαγωγή

Το αιολικό πάρκο της πτυχιακής εργασίας μας μελέτησε και πήρε άδεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η εταιρεία « ΑΙΟΛΙΚΗ ΚΑΡΥΣΤΟΥ Α.Ε » το 2008 . Η άδεια προέβλεπε μέγιστη ισχύ 24 MW και χώρο επαρκή για 10 ανεμογεννήτριες. Πριν την εκτέλεση του έργου (2010) τα δικαιώματα του πάρκου μαζί με την ανανεωμένη άδεια πέρασαν στην κατοχή της εταιρείας « ΑΙΟΛΙΚΗ ΛΑΥΚΟΥ Α.Ε », χωρίς να αλλάξουν τα επί μέρους στοιχεία. Οι ανεμογεννήτριες κατασκευάστηκαν από την εταιρία VESTAS και ήταν του τύπου V90-3MW.

Η ανεμογεννήτρια Vestas V90 – 3MW

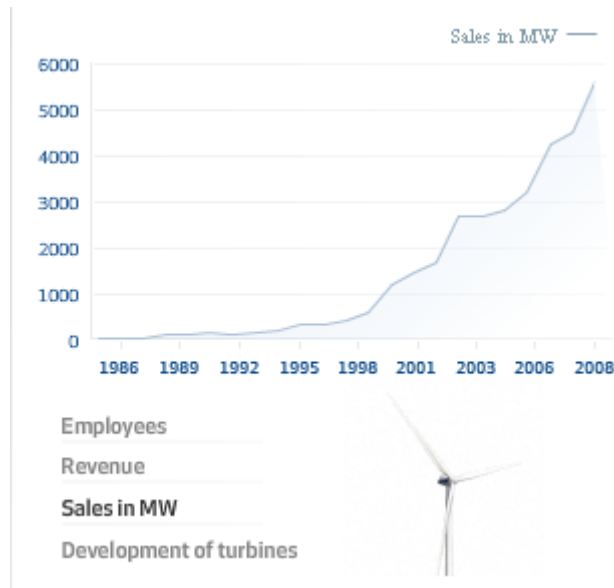
3.1 Η εταιρία Vestas

Η εταιρία Vestas εδρεύει στην πόλη Randers της Δανίας ενώ έχει επεκταθεί και στην βόρειο Αμερική. Τέλος του 2010 έφθασε να απασχολεί περισσότερους από 25000 εργαζόμενους και έχει εργοστάσια παραγωγής σε 12 χώρες.



Εικόνα 42: Το λογότυπο της εταιρίας

Έχει περισσότερες από 40000 ανεμογεννήτριες, εγκατεστημένες σε πάνω από 68 χώρες σε όλο τον κόσμο. Μέχρι σήμερα έχει παρουσιάσει 19 μοντέλα ανεμογεννητριών 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 παραγωγής αιολικής ενέργειας τα τελευταία χρόνια. Στις επόμενες εικόνες φαίνεται η εξέλιξη της εταιρείας και των μοντέλων της .



Εικόνα 43: Πορεία πωλήσεων (σε αντίστοιχα MW ισχύος) ανεμογεννητριών της εταιρίας Vestas

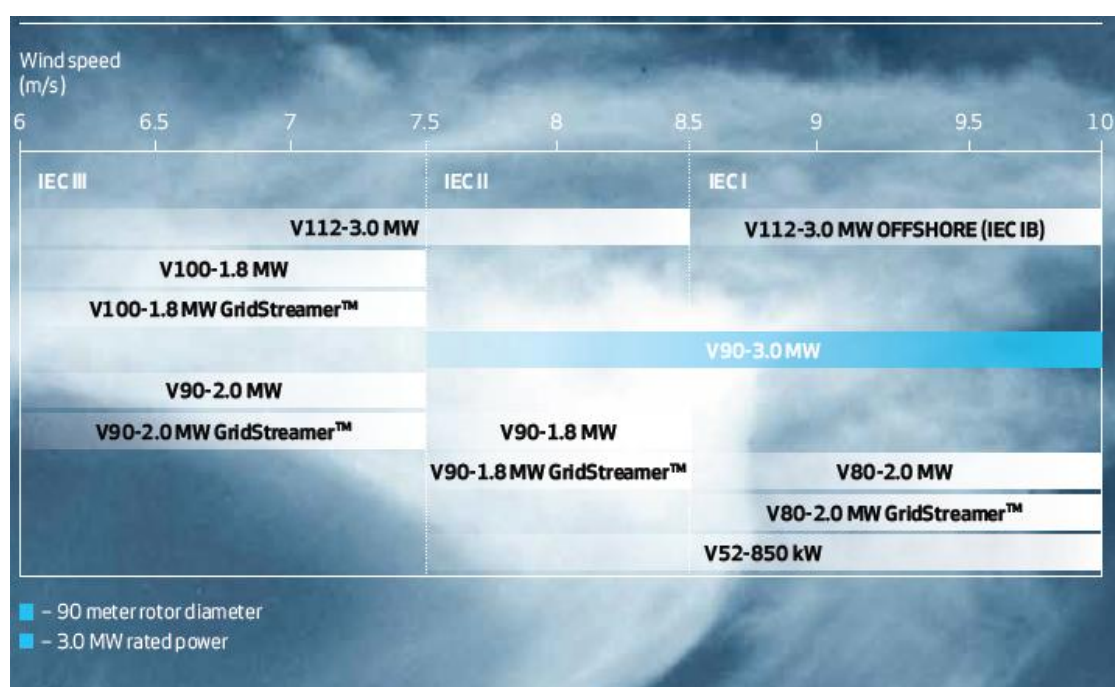


Εικόνα 44: Διαχρονική εξέλιξη ανεμογεννητριών της εταιρίας Vestas

Η Vestas έχει παρουσία στην Ελλάδα από το 1985, ενώ ως Vestas Hellas S.A. δραστηριοποιείται από το 2000 και απασχολεί 105 εργαζομένους.

Κατέχοντας ηγετική θέση στην Ελληνική αγορά με μερίδιο που διαμορφώνεται σε 56%, σύνολο εγκατεστημένης ισχύος 503,89MW από 463 ανεμογεννήτριες (έως τον Ιούνιο του 2008) και με πελάτες μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται οι μεγαλύτεροι επενδυτές στον κλάδο της ενέργειας, διεκδικεί τα μεγαλύτερα και σημαντικότερα

έργα. 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 του τύπου V90. Το μοντέλο αυτό είναι όπως φαίνεται και από την παρακάτω εικόνα, ιδανικό για να αξιοποιεί την ενέργεια των ανέμων που γενικά πνέουν στην Ελληνική επικράτεια.

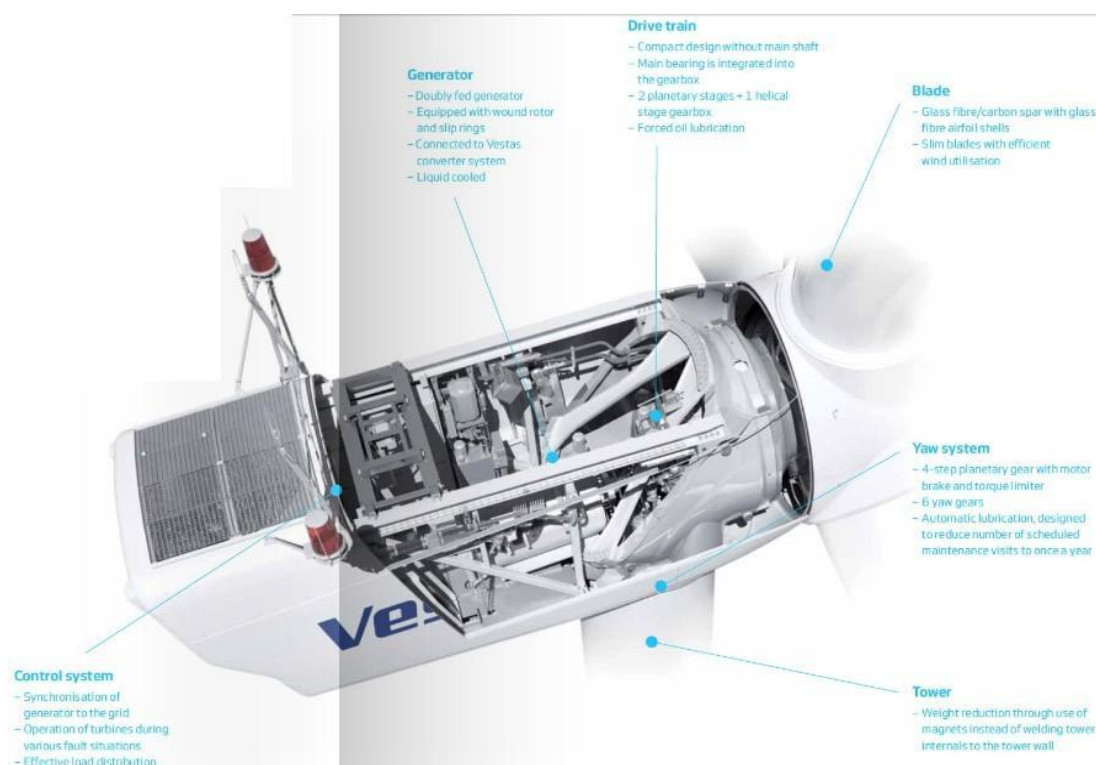


Εικόνα 45: Σχέση μοντέλων ανεμογεννητριών της εταιρίας Vestas με τον υπό αξιοποίηση άνεμο.

3.2 Τεχνικά δεδομένα & Κατασκευαστικά στοιχεία

Η ανεμογεννήτρια μπορεί να θεωρηθεί ότι χωρίζεται σε τρία κυρίως τμήματα, τον πυλώνα, τον ρότορα και το σώμα παρελκόμενων που στο εξής θα αναφέρουμε σαν « νασέλλα » ενώ ένα τέταρτο ξεχωριστό τμήμα είναι η μονάδα ελέγχου. Κάθε τμήμα

εξυπηρετεί και μία λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Πριν περάσουμε στην ανάλυση των επιμέρους τμημάτων, βλέπουμε στην επόμενη εικόνα τη νασέλλα και το εσωτερικό της, το σύνδεσμο με τον ρότορα (έλικα ή φτερωτή) και την έναρξη του πυλώνα.



Εικόνα 46: Τομή της ανεμογεννήτριας Vestas V90 – 3MW

3.2.1 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 – ΙΙΑ),βλέπε και εικόνα Β5. Στο αιολικό πάρκο «Τρίκορφο» χρησιμοποιήθηκε ανεμογεννήτρια με πυλώνα ύψους 80 μέτρων παρότι όπως θα δούμε στο κεφάλαιο Β2 οι άνεμοι που πνέουν στο πάρκο είναι γενικά μέτριοι αλλά με

ισχυρές κατά διαστήματα ριπές. Ο πυλώνας μας είναι κούφιος, σωληνοειδής και έχει σχήμα κωνοειδές. Η διάμετρος στην βάση είναι ίση με 4 μέτρα ενώ στην κορυφή μειώνεται στα 2,3 μέτρα. Είναι κατασκευασμένος από χάλυβα S355 και με ειδική επικάλυψη για την προστασία του από φαινόμενα διάβρωσης. Η εταιρία προμηθεύει επίσης ανεμογεννήτριες, με ανελκυστήρα στο εσωτερικό του πυλώνα, για μετάβαση των συντηρητών στην νασέλλα. Για να ανέβει ο συντηρητής στην νασέλλα χωρίς να χρησιμοποιήσει των ανελκυστήρα πρέπει να πάρει όλα τα απαραίτητα μέτρα ασφαλείας προκειμένου να μην υπάρξει 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 τεχνικός, ο οποίος ανεβαίνει μέσα στον πυλώνα μιας ανεμογεννήτριας τύπου V90.



Εικόνα 47: Μηχανικός συντήρησης κατά την άνοδο του στον πύργο μιας ανεμογεννήτριας V90

3.2.2 Η νασέλλα

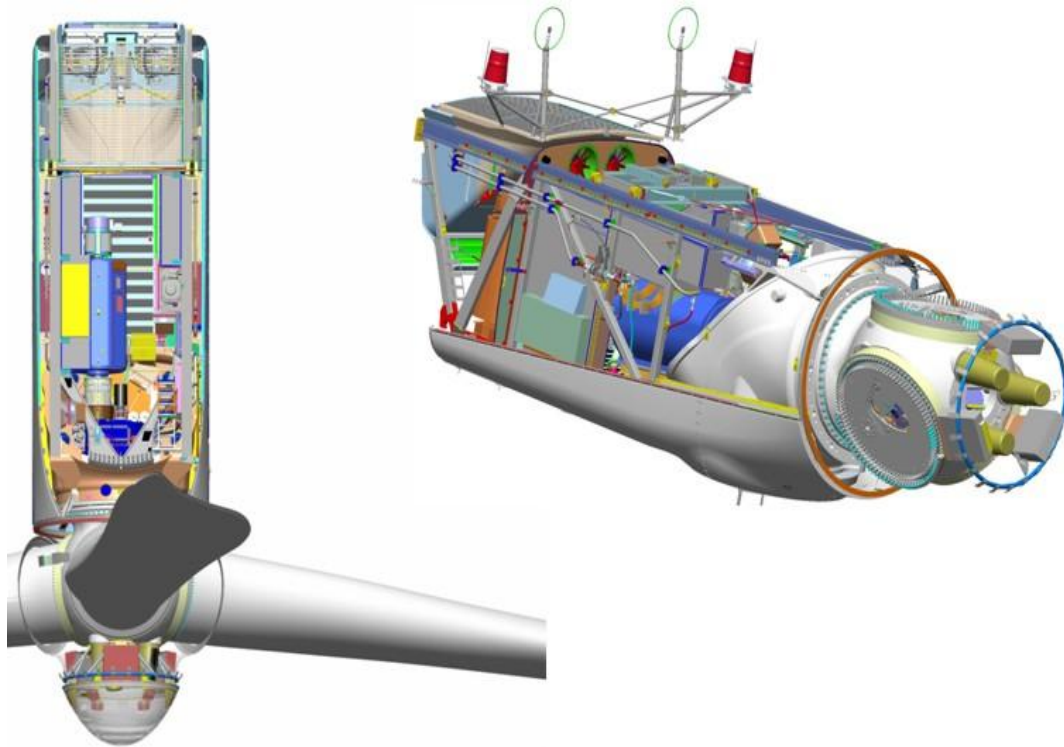
Η νασέλλα είναι το τμήμα μέσα στο οποίο βρίσκονται όλοι οι μηχανισμοί της ανεμογεννήτριας. Το περίβλημα της είναι κατασκευασμένο από πλαστικό (fiberglass) και αεροδυναμικά σχεδιασμένο, έτσι ώστε να μειώνονται οι δυνάμεις που ασκούνται από τον άνεμο σε αυτή. Στο κάτω μέρος της υπάρχει άνοιγμα που τη συνδέει με το εσωτερικό του πυλώνα. Στην οροφή της υπάρχουν ανοίγματα εξόδου ώστε να υπάρχει πρόσβαση στους αισθητήρες του ανέμου που βρίσκονται στο έξω και προς τα πίσω μέρος της.

Στην ίδια θέση υπάρχουν και κόκκινα φώτα που αναβοσβήνουν ρυθμικά και έτσι προειδοποιούν αεροσκάφη για την ύπαρξή της.

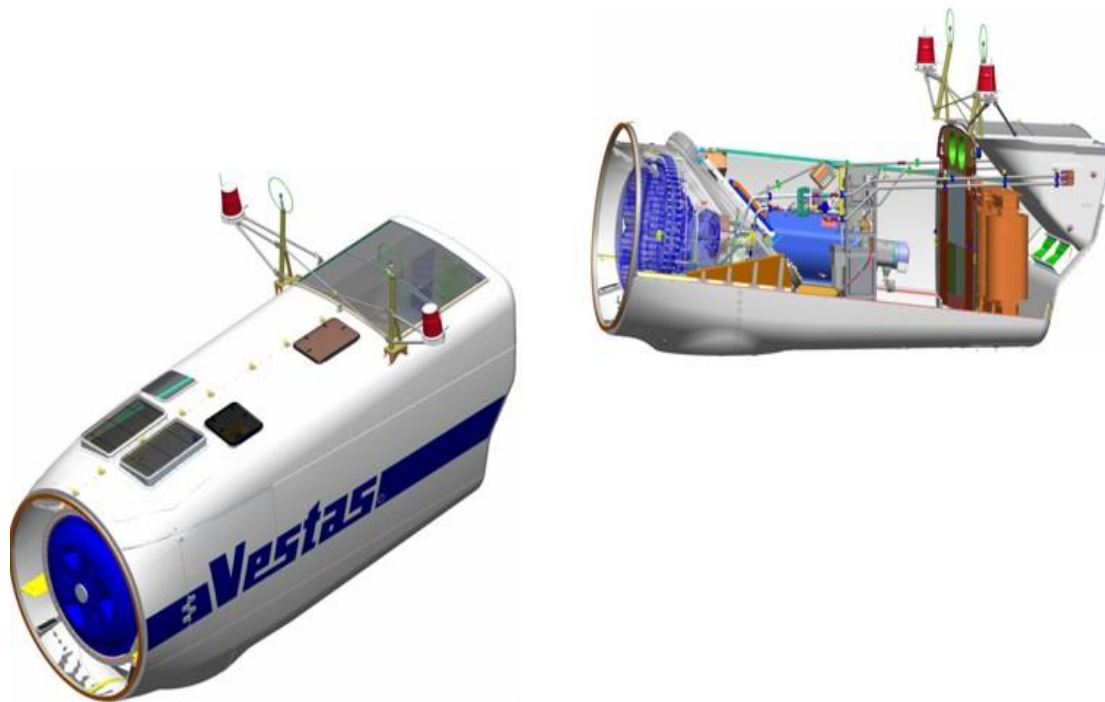
Η νασέλλα έχει μήκος 13,25 μέτρα εάν συμπεριλάβουμε μέσα το σύνδεσμο με τον ρότορα (hub) και τον κώνο που υπάρχει μπροστά και 9,65 μέτρα χωρίς αυτά. Έχει πλάτος 3,6 μέτρα και ύψος 4,05 μέτρα. Έχει βάρος 91 τόνων με μια διακύμανση ± 3 τόνους εάν συνυπολογιστεί το βάρος του συνδέσμου και του κώνου και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

Μέσα στην νασέλλα όπως είπαμε πριν 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 φαίνονται στις δύο εικόνες της επόμενης σελίδας. Αυτές και όλες οι επόμενες εικόνες προέρχονται από το επίσημο βιβλίο συντήρησης της εταιρίας Vestas, για τον συγκεκριμένο τύπο ανεμογεννήτριας που εξετάζουμε. 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 φαίνονται πολύ καθαρά οι έξοδοι που υπάρχουν στην κορυφή. Στο εμπρόσθιο μέρος παρατηρούμε μια ισχυρότερη κατασκευή διότι αυτό το κομμάτι είναι υπεύθυνο για την μεταφορά των φορτίων που ασκούνται από τον ρότορα και τη νασέλλα στον πυλώνα της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 48: Σχεδιασμός νασέλλας μαζί με τον σύνδεσμο και τον κώνο

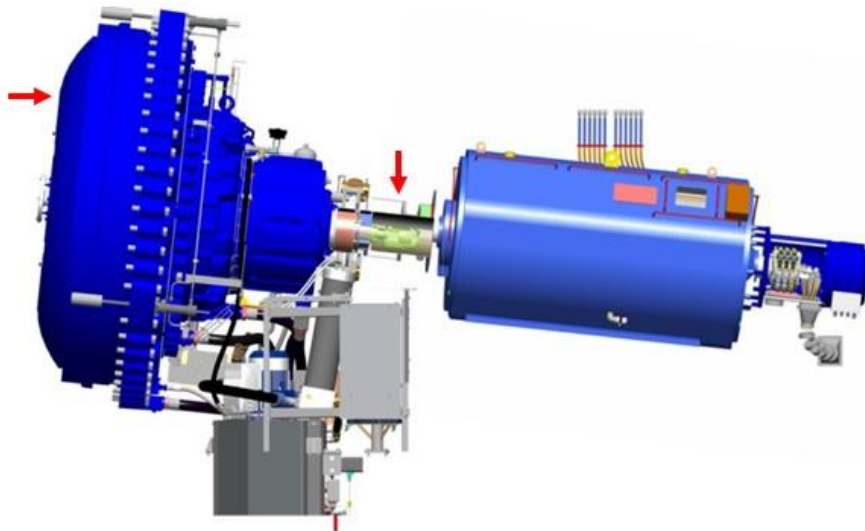


Εικόνα 49: Σχεδιασμός νασέλλας χωρίς τον σύνδεσμο και τον κώνο

3.2.2.1 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» άτρακτο. 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 μοιάζει με άτρακτο γιατί εφαρμόζει κατευθείαν στο κιβώτιο ταχυτήτων, αποτελώντας ένα κομμάτι του ενός από τα δύο πλανητικών συστήματα που περιέχει. Το μεγάλο μέγεθος της δεν αποτελεί πρόβλημα, διότι λόγω της αργής ταχύτητας περιστροφής δεν υπάρχουν μεγάλες απώλειες ενέργειας εξαιτίας της μεγάλης ροπής αδράνειας. Η γρήγορη άτρακτος στηρίζεται σε δύο κυλινδρικά

ρουλεμάν. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η αργή άτρακτος, με το μπλε χρώμα (οριζόντιο κόκκινο βέλος), αμέσως πριν το κιβώτιο ταχυτήτων επίσης με μπλε χρώμα (γύρω γύρω μοιάζει με γρανάξι) 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 50: Παρουσίαση της διπλής ατράκτου μετάδοσης της ισχύος συνδεδεμένης με το κιβώτιο ταχυτήτων και την γεννήτρια

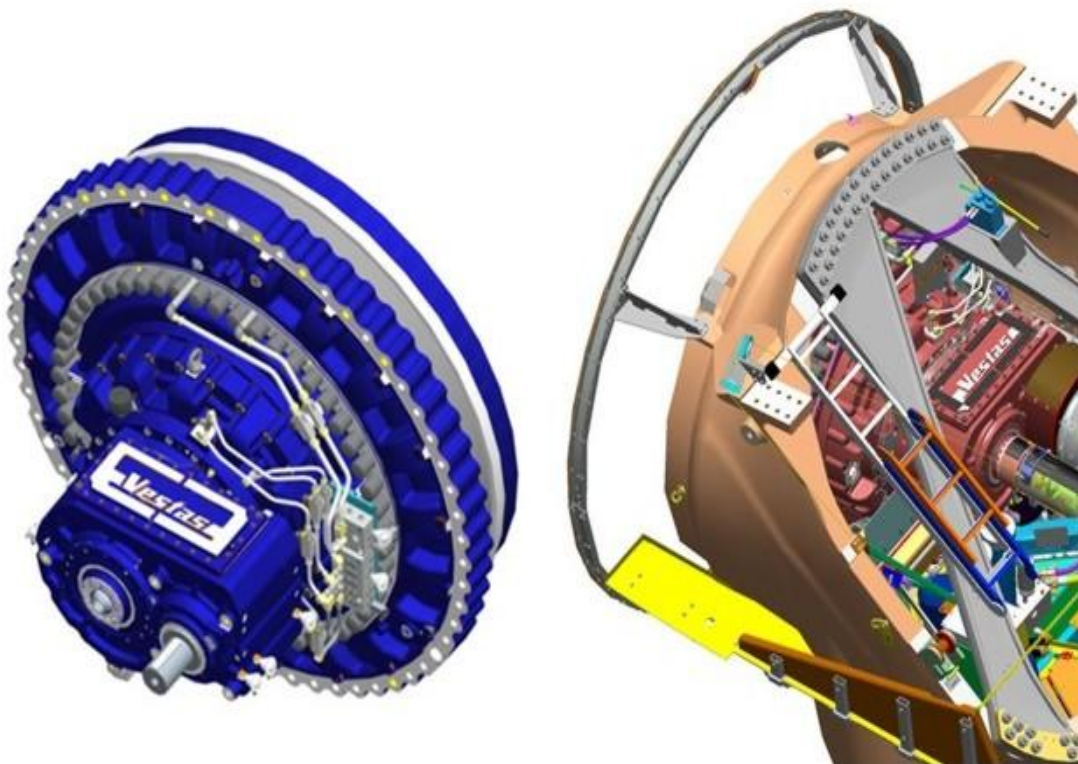
3.2.2.2 Κιβώτιο ταχυτήτων

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 ενέργειας 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

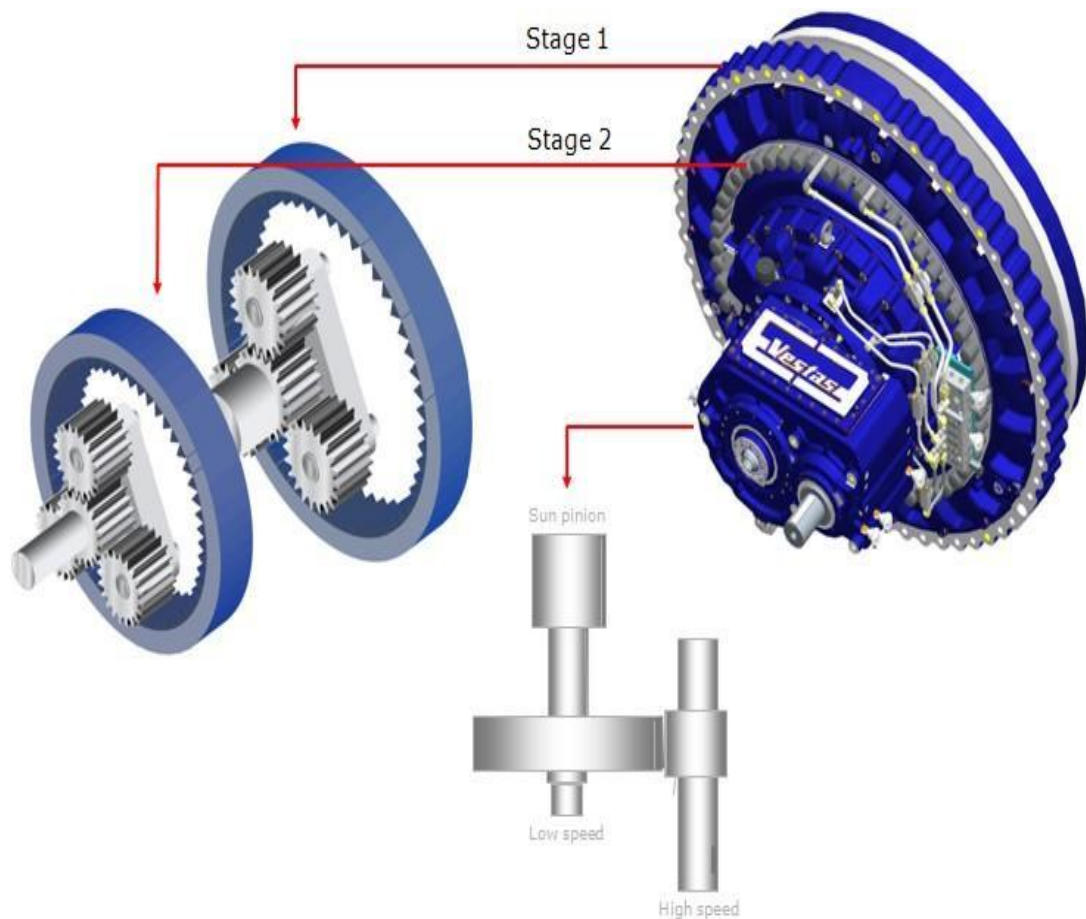
50 Hz. Η μεταβολή στις στροφές γίνεται μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων το οποίο έχει λόγο μετάδοσης 1:104,5.

Η κατασκευή του κιβωτίου ταχυτήτων γίνεται από την εταιρία Divers. Αυτό 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 ακολουθούν φαίνεται η κατασκευή και η τοποθέτηση του κιβωτίου ταχυτήτων αλλά και ο τρόπος με τον οποίο είναι διαμορφωμένα τα πλανητικά και το ελικοειδές σύστημα του.



Εικόνα 51: Εξωτερική διαμόρφωση κιβωτίου ταχυτήτων (αριστερά) και τοποθέτηση του στην νασέλλα (δεξιά – με το καφέ χρώμα το κιβώτιο)



Εικόνα 52: Σχηματική παράσταση των τριών στάσεων του κιβωτίου ταχυτήτων

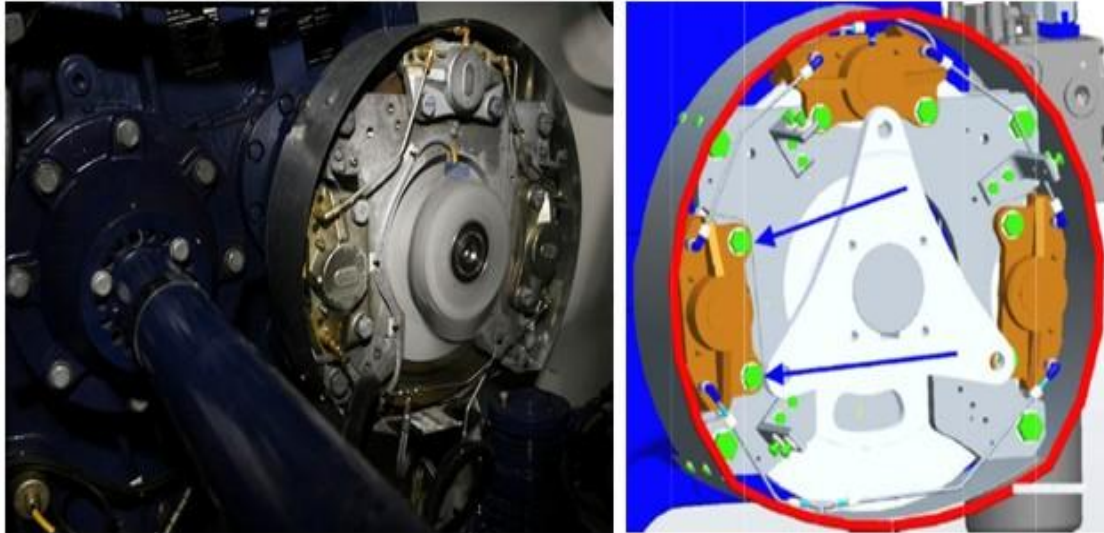
Η απόσταση μεταξύ των δύο γκριζών αξόνων, που καθορίζουν την τελική σχέση μετάδοσης είναι 461 mm. Το κιβώτιο ταχυτήτων έχει συνολικό μήκος 2100 mm, διάμετρο 2600 mm και συνολικό βάρος 23 τόνων. Το κιβώτιο ταχυτήτων έχει και κάποια περιφερειακά συστήματα χρήσιμα για την σωστή λειτουργία του. Έχει σύστημα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



Εικόνα 53: Κιβώτιο ταχυτήτων (μπλε χρώμα) στο οποίο φαίνεται η άτρακτος υψηλής ταχύτητας και το σύστημα φρένων (γκρι χρώμα δεξιά)

3.2.2.3. 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. Εκτός από αυτά 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 αυτοκίνητο. Παρακάτω ακολουθούν μια φωτογραφία και ένα διάγραμμα αυτού του φρένου.



Εικόνα 54: Υδραυλικό φρένο της ανεμογεννήτριας σε πραγματική εφαρμογή πάνω στο κιβώτιο ταχυτήτων (αριστερά) και σε σχηματική αναπαράσταση (δεξιά)

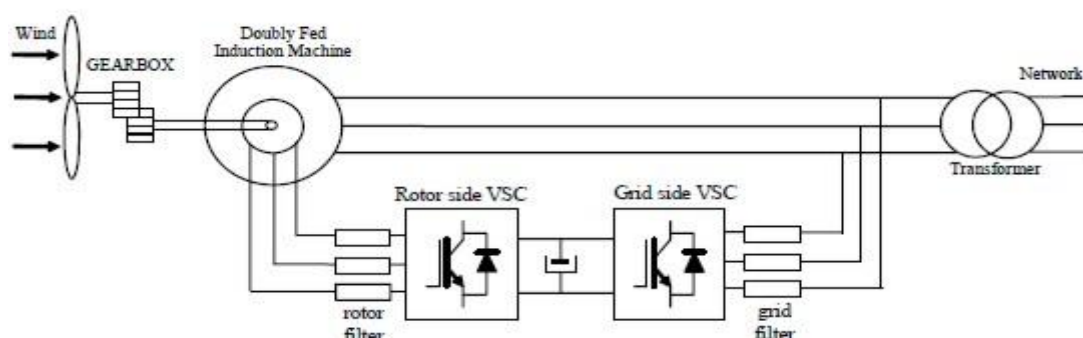
3.2.2.4. Γεννήτρια

Η ανεμογεννήτρια V90 – 3MW χρησιμοποιεί ασύγχρονη γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος τεχνολογίας DFIM (Double Fed Induction Machine) τεσσάρων πόλων με διέγερση από τον ρότορα μέσω του συστήματος VCRS. Η γεννήτρια αυτή έχει την ικανότητα να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα με ισχύ ως 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 γεννήτρια παίρνει κίνηση από την άτρακτο υψηλής ταχύτητας και αποδίδει την ηλεκτρική ενέργεια που παράγει κατευθείαν στο δίκτυο του αιολικού πάρκου, με την παρεμβολή μόνο ενός μετασχηματιστή.

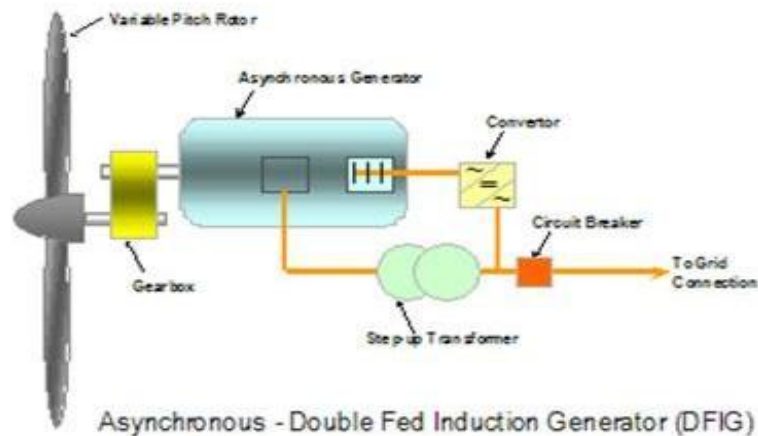
Στη χώρα μας το ηλεκτρικό ρεύμα είναι εναλλασσόμενο συχνότητας 50 Hz έτσι καθορίζονται οι στροφές της γεννήτριας στις 1680 ως ονομαστική ταχύτητα για να υπάρχει παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος συχνότητας 50 Hz.

Η σύνδεση της γεννήτριας με την άτρακτο υψηλής ταχύτητας φαίνεται στην εικόνα B.9 (άκρη δεξιά με μπλε χρώμα) στην ενότητα που περιγράφουμε την άτρακτο.

Η τεχνολογία όμως DFIM στην γεννήτρια μας προσφέρει και τη δυνατότητα μεταβλητών στροφών. Έχει περιελίξεις τόσο στον ρότορα όσο και στον στάτορα. Στα τυλίγματα του ρότορα παρέχεται ρεύμα με την βοήθεια ψηκτρών 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 μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής της γεννήτριας της τάξεως του $\pm 30\%$ της ονομαστικής ταχύτητας περιστροφής. Η ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας μεταβάλλεται και με αλλαγή του pitch, της γωνίας προσβολής των πτερυγίων της έλικας της ανεμογεννήτριας. 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 περύγια. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται δύο διατάξεις σύνδεσης της γεννήτριας τεχνολογίας DFIM με τον μετατροπέα (converter) και το δίκτυο.



Εικόνα 55: Διάγραμμα γεννήτριας DFIM στο οποίο φαίνεται η σύνδεση του converter στον ρότορα και το δίκτυο



Εικόνα 56: Σχηματική απεικόνιση γεννήτριας τεχνολογίας DFIM

3.2.2.5 Μετασχηματιστής

Το τελευταίο εξάρτημα που χρησιμοποιείται πριν την διασύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο είναι ένας μετασχηματιστής (transformer). Ο μετασχηματιστής 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 τόνους.

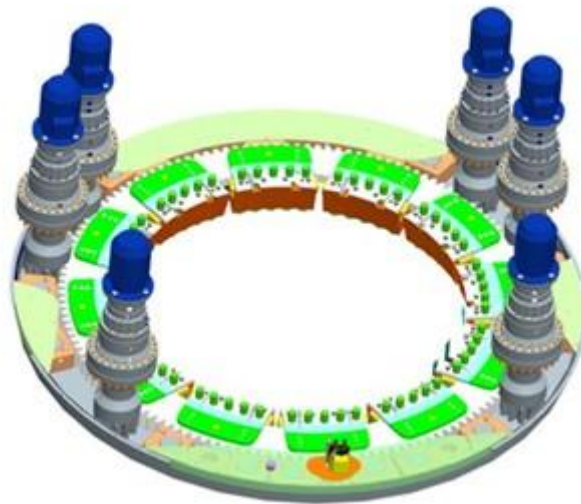
Η διασύνδεση με το τοπικό ηλεκτρικό δίκτυο γίνεται μετά τον μετασχηματιστή και μετά τον διακόπτη ισχύος αν υπάρχει. Η τάση εξόδου του μετασχηματιστή πρέπει να συμπίπτει με την τάση του δικτύου με μια διαφορά το πολύ $\pm 5\%$ στις υψηλές τάσεις. Η διακύμανση στην συχνότητα πρέπει να είναι το πολύ ± 2 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..

3.2.2.6 Σύστημα προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας

Το σύστημα προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας έχει ως στόχο να περιστρέφει την νασέλλα της ανεμογεννήτριας έτσι ώστε πάντα να δέχεται τον άνεμο κατά μέτωπο, 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 δέχονται 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.

Εκτός από τον προσανατολισμό 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.

Το σύστημα αυτό αποτελείται από ένα δακτυλίδι το οποίο στην ουσία είναι ένα ρουλεμάν ολίσθησης από 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 57: Δακτυλίδι του συστήματος προσανατολισμού

3.2.2.7 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 φυσικά δεν θα χρησιμοποιείται για την λίπανση των εξαρτημάτων.

Το υδραυλικό δίκτυο για την ρύθμιση της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου στα περύγια της ανεμογεννήτριας έχει πίεση 250 bar και είναι τοποθετημένο εξολοκλήρου μέσα στην νασέλλα. Μόνο ένας σωλήνας βγαίνει έξω από τον σύνδεσμο σύνδεσης νασέλλας-ρότορα και τροφοδοτεί τα περύγια.

Το υδραυλικό σύστημα έχει μια αντλία χαμηλής πίεσης 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 δίνει πίεση 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.

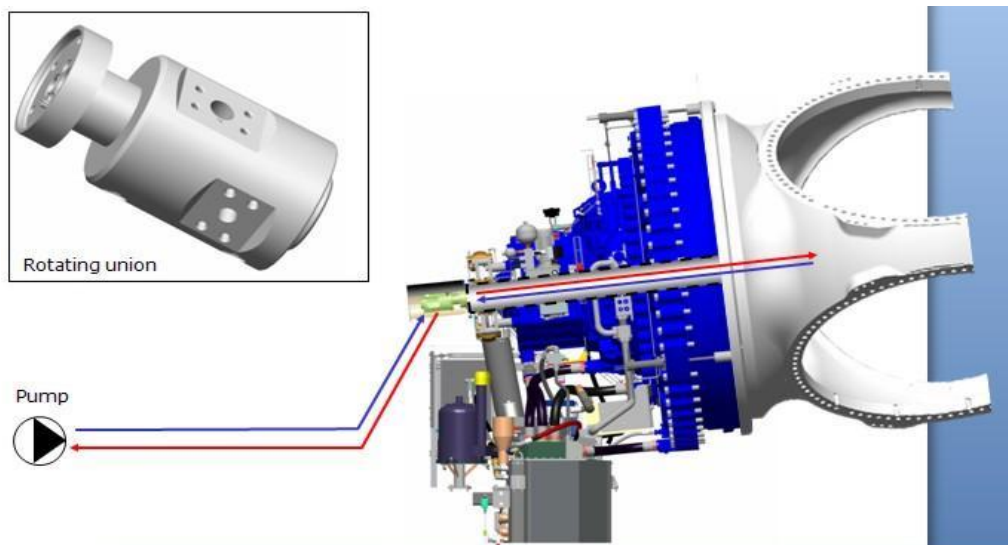
Η αντλία υψηλής πίεσης λειτουργεί με την βοήθεια ηλεκτροκινητήρα ισχύος 4kW. Στην διπλή εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το σύστημα αντλιών.



Εικόνα 58: Αντλία χαμηλής πίεσης για θέρμανση του λαδιού (αριστερά πάνω), αντλία υψηλής πίεσης (αριστερά κάτω καλυμμένη) και αντλία φρένων (δεξιά)

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 ενώ στην άλλη μένει σταθερό. Το περιστρεφόμενο μέρος του συνδέεται με το περιστρεφόμενο κομμάτι του κιβωτίου ταχυτήτων, μέσω του άξονα υψηλών στροφών ενώ το σταθερό μέρος του συνδέεται με το δίκτυο μεταφοράς του λαδιού. Στον σύνδεσμο με τον ρότορα καταλήγουν οι

τρεις αγωγοί από τα πτερύγια και μέσω ενός διανομέα μοιράζεται το λάδι σε αυτά. Ένας υδραυλικός κύλινδρος υπάρχει σε κάθε πτερύγιο και είναι υπεύθυνος για την ρύθμιση του pitch έτσι ώστε ανάλογα με την πίεση που δέχεται από το υδραυλικό σύστημα να ορίζει αντίστοιχη γωνία πρόσπτωσης του αέρα στα πτερύγια. Τρία θυλάκια, ένα για κάθε πτερύγιο λειτουργούν ως συσσωρευτές έτσι το σύστημα διατηρεί υψηλή πίεση πάνω από 80 bar ακόμη 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.

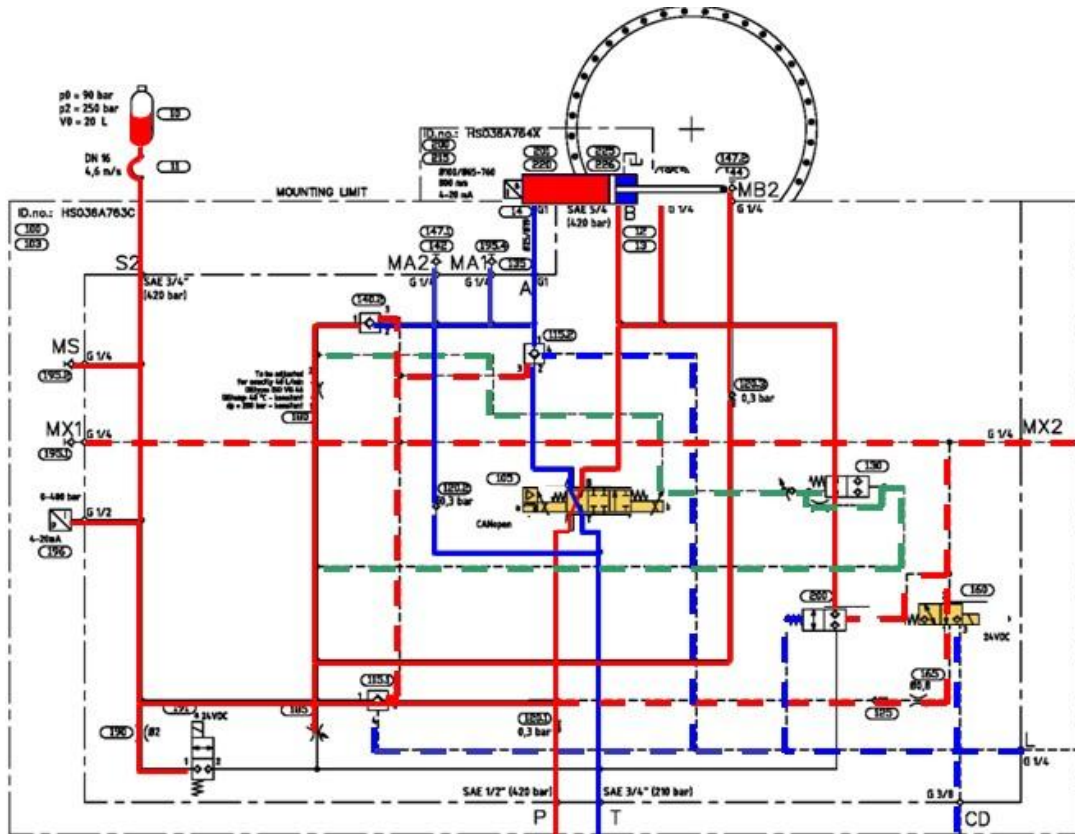


Εικόνα 59: Διαδρομή λαδιού υψηλής πίεσης μέσα από το κιβώτιο ταχυτήτων έως τον σύνδεσμο με τον ρότορα. Επάνω αριστερά φαίνεται το περιστρεφόμενο εξάρτημα με το οποίο γίνεται η παροχή στα πτερύγια

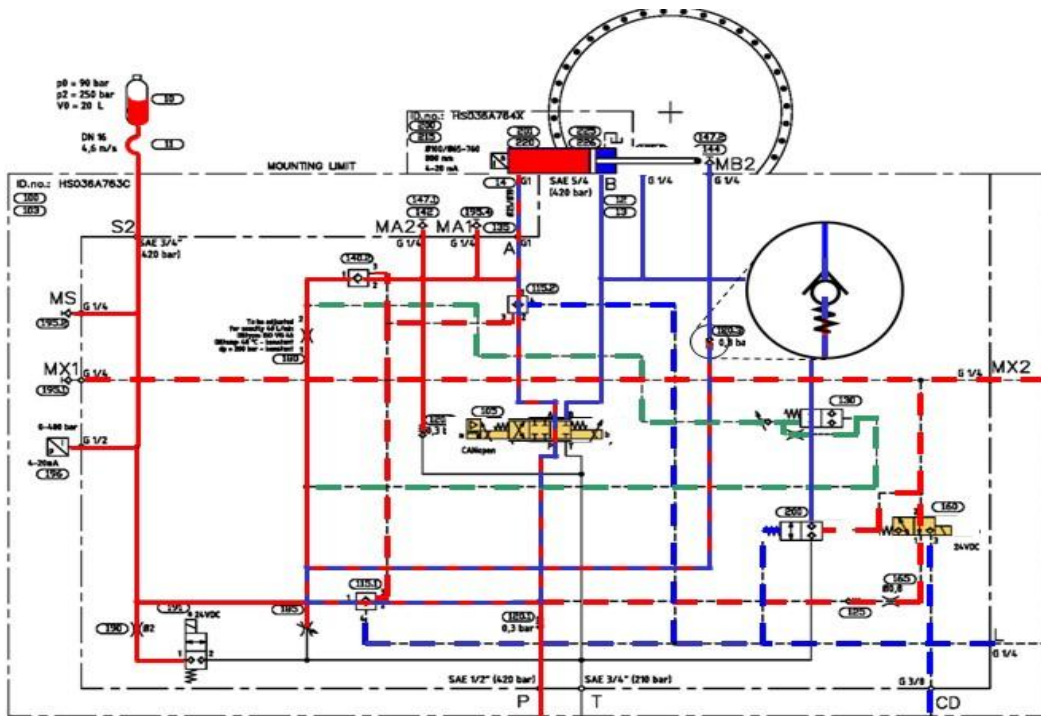
Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το εξάρτημα του υδραυλικού κυλίνδρου που υπάρχει σε κάθε πτερύγιο. Με την μεταβολή της πίεσης στον κύλινδρο περιστρέφεται ο άξονας ο οποίος αλλάζει και την γωνία του πτερυγίου. Στην συνέχεια παρουσιάζεται το δίκτυο κατά την λειτουργία του. Στο τέλος παρουσιάζεται μια συνολική εικόνα του δικτύου μαζί με τον διανομέα που βρίσκεται στον σύνδεσμο.



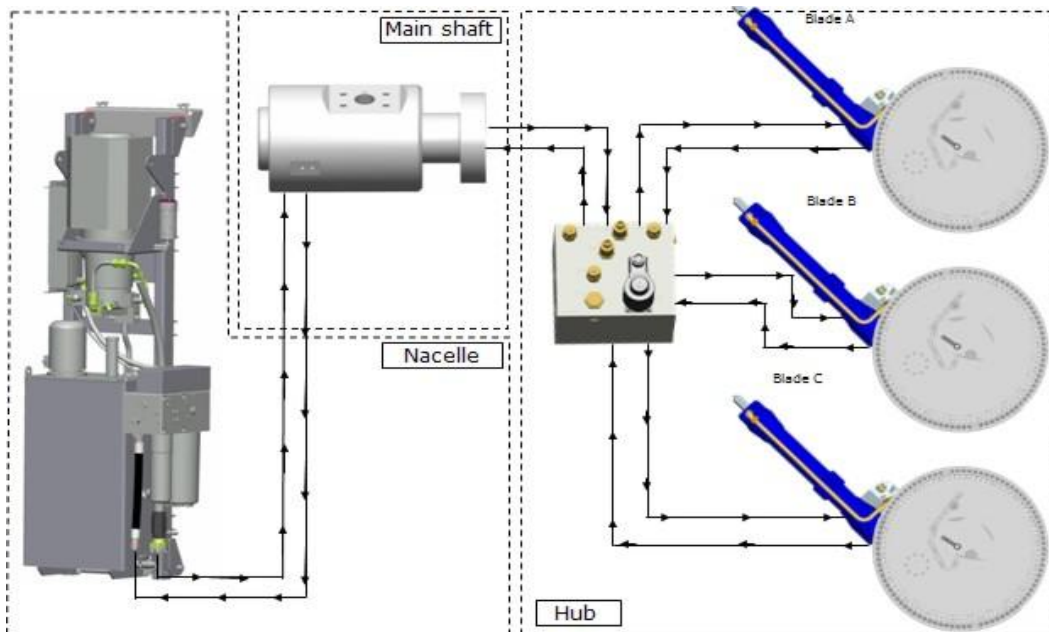
Εικόνα 60: Υδραυλικός κύλινδρος για την αλλαγή του pitch ενός πτερυγίου



Εικόνα 61: Πίεση δικτύου όταν το πτερύγιο βρίσκεται σε γωνία pitch 90° (ουσιαστικά είναι ανενεργό, λειτουργεί ως αερόφρενο)



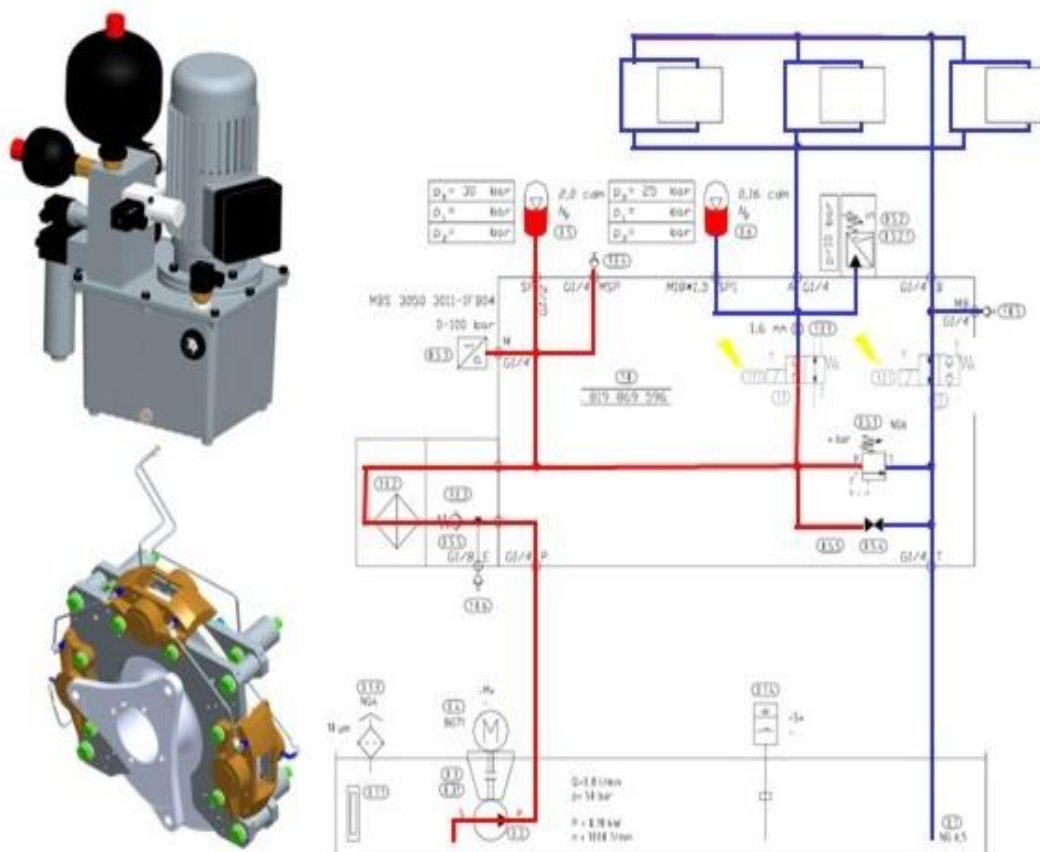
Εικόνα 62: Πίεση δικτύου όταν το περσέγιο βρίσκεται σε γωνία pitch 0° (είναι ενεργό)



Εικόνα 63: Συνολικό υδραυλικό δίκτυο μεταβολής του pitch των περσέγιων

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 αεροθυλάκιο λειτουργεί ως συσσωρευτής για να υπάρχει πάντα υψηλή πίεση στο σύστημα.



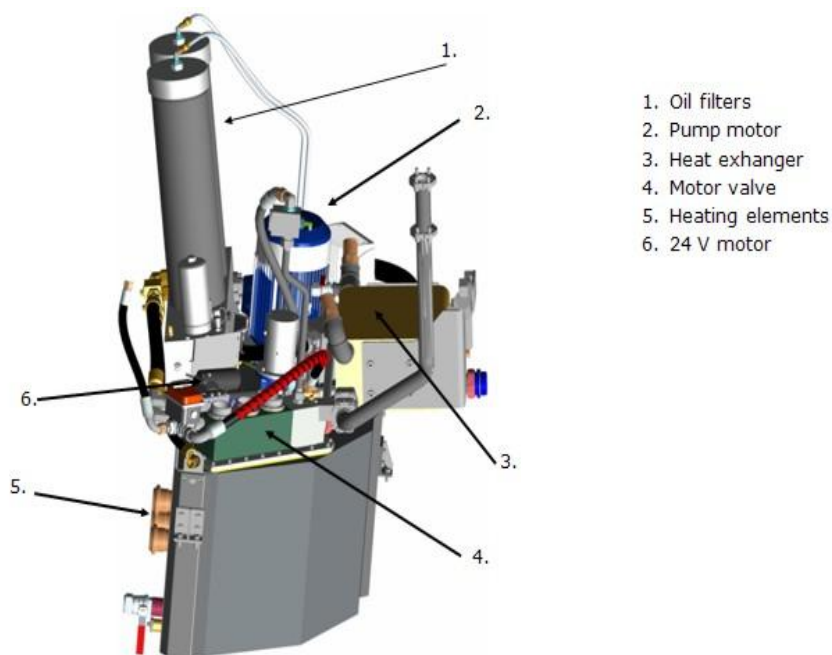
Εικόνα 64: Επάνω αριστερά φαίνεται η αντλία παροχής πίεσης στο υδραυλικό σύστημα των φρένων. Κάτω αριστερά φαίνεται το φρένο μαζί με τα σωληνάκια (γκρι χρώμα) τα οποία μεταφέρουν και απάγουν το λάδι στις τρεις δαγκάνες. Δεξιά φαίνεται η δράση του συστήματος κατά την διάρκεια του φρεναρίσματος

3.2.2.8 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 κίνηση άρα και τριβή. Παρακάτω βλέπουμε την λίπανση ξεχωριστά για το κάθε σύστημα.

Το κιβώτιο ταχυτήτων λιπαίνεται με την βοήθεια ενός συστήματος κυκλοφορίας λαδιού. Με την χρήση αντλίας στέλνεται 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 μέσα στην οποία βρίσκεται το λάδι και ένα εναλλακτικό δίκτυο λίπανσης σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης. Η παρακάτω εικόνα δείχνει τα κυριότερα μέρη του συστήματος λίπανσης του κιβωτίου ταχυτήτων.



Εικόνα 65: Σύστημα λίπανσης κιβωτίου ταχυτήτων

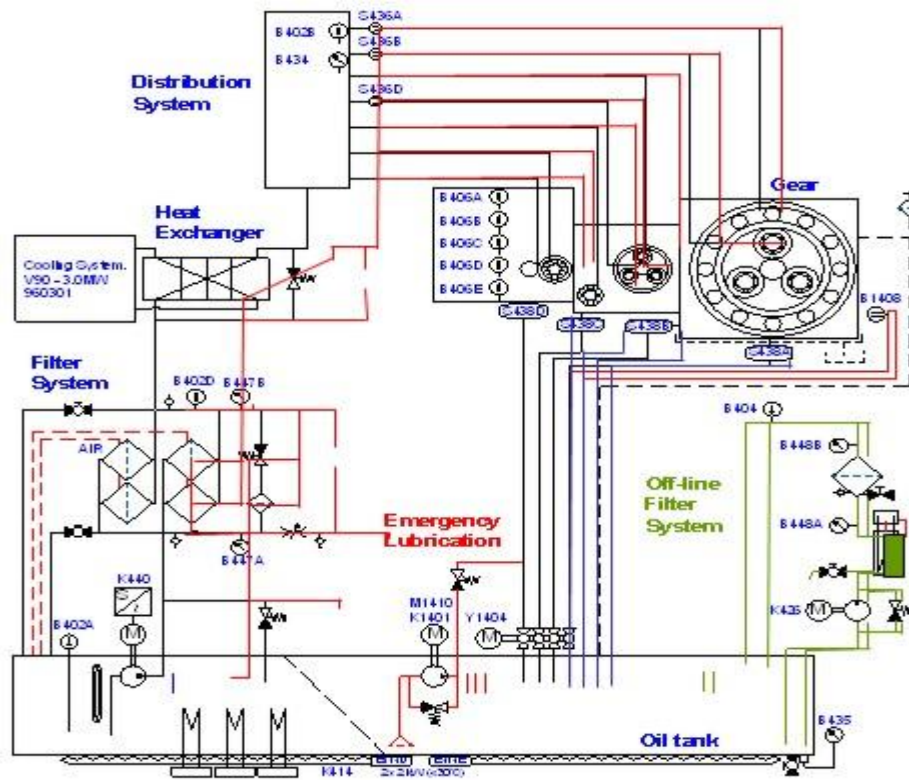
Ο κυκλοφορητής κινεί το λάδι που βρίσκεται μέσα στο δίκτυο. Το λάδι περνάει από τα θερμαντικά στοιχεία έτσι ώστε να αποκτήσει την σωστή θερμοκρασία εισόδου. Εάν η μέση θερμοκρασία του λαδιού στις ταχύτητες πέσει κάτω από 30°C

τότε τα θερμαντικά σώματα ανάβουν ώστε να ζεσταθεί το λάδι. Αν ανέβει πάνω από τους 35°C τότε σβήνουν.

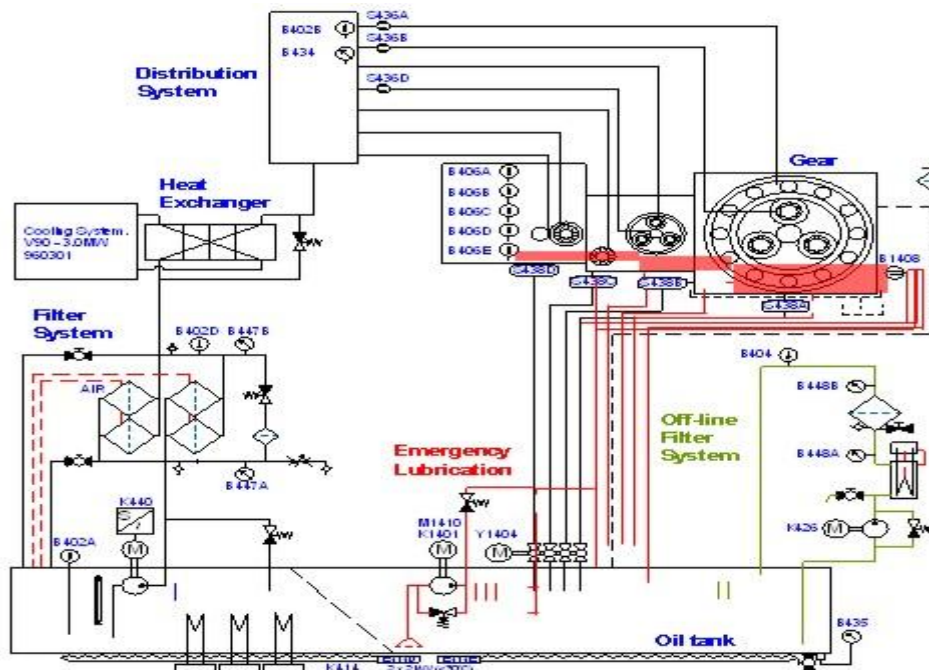
Στην συνέχεια το λάδι περνάει από το φίλτρο και καταλήγει στα σημεία τα οποία πρέπει να λιπάνει. Κάνει την δουλειά του και μετά απάγεται μέσω ενός δεύτερου δικτύου.

Κατά την πορεία του προς την δεξαμενή ηρεμίας (κάρτερ) περνάει από τον εναλλάκτη θερμότητας και ψύχεται.

Αυτός είναι ο κύκλος λίπανσης κατά την απλή και 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 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 έκτακτης ανάγκης Emergency.

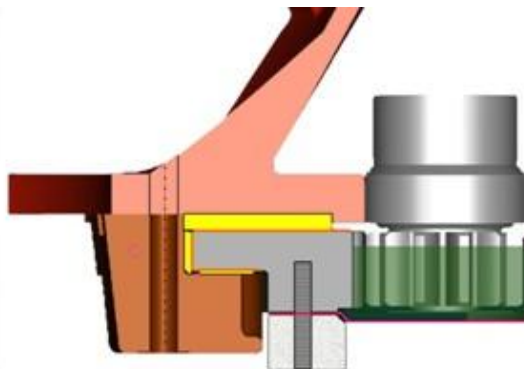


Εικόνα 66: Διάγραμμα λίπανσης κιβωτίου ταχυτήτων στην κατάσταση λειτουργίας Run



Εικόνα 67: Διάγραμμα λίπανσης κιβωτίου ταχυτήτων στην κατάσταση λειτουργίας Emergency

Εκτός 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. Χρησιμοποιούνται 55 λίτρα λαδιού για να γεμίσει ο χώρος αυτός και τα εξαρτήματα λιπαίνονται με λουτρό ελαίου. Το λάδι αυτό πρέπει να αλλάζει κάθε χρόνο. 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 68: Λίπανση μηχανισμού προσανατολισμού ανεμογεννήτριας με λουτρό ελαίου

3.2.2.9 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 μόνο 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.

Εκτός από τη νασέλλα ψύξη θέλουν και τα υπόλοιπα εξαρτήματα, έτσι ώστε να μην υπάρχουν φθορές 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 με ένα σύστημα που απλά κυκλοφορεί νερό στα θερμά μέρη της γεννήτριας. 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 ψύξη 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 δευτέρου ανεμιστήρα, ανεξάρτητου από τον πρώτο ο οποίος φέρνει αέρα από το εξωτερικό μέρος της νασέλλας και τον διοχετεύει στις περιελίξεις του κάτω μέρους του μετασχηματιστή.

3.2.2.10 Αισθητήρες

Μέσα στην νασέλλα και σε πολλά σημεία της είναι τοποθετημένοι αισθητήρες με διαφορετικές σκοπιμότητες.

Για διευκρίνιση εδώ δεν μιλάμε για μετρητές πίεσης, θερμοκρασίας ή τάσης που υπάρχουν αναγκαστικά 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 στέλνεται στο κέντρο ελέγχου. Στα άκρα των πτερυγίων υπάρχουν αισθητήρες οι οποίοι μπορούν να εντοπίσουν υψηλές τάσεις άρα προειδοποιούν για κεραυνούς. Οι αισθητήρες αυτοί είναι οπτικοί αναλογικοί. Στο μετασχηματιστή υπάρχει αισθητήρας ο οποίος μπορεί να προβλέψει την δημιουργία ηλεκτρικού τόξου και έτσι να στείλει ένα σήμα ώστε να ανοίξει το κύκλωμα και να μην καταστραφεί ο μετασχηματιστής.

Ο σημαντικότερος όμως από τους αισθητήρες είναι ο αισθητήρας μέτρησης της ταχύτητας και διεύθυνσης του ανέμου. Στην οροφή της νασέλλας και 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 μεμβρανών 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 69: Αισθητήρες ανέμου τοποθετημένοι στο πίσω μέρος της νασέλλας

3.2.3 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^ο και περιστρέφονται κατά τη φορά του ωρολογίου.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται φωτογραφία του ρότορα της ανεμογεννήτριας V90 κατά την διάρκεια της συναρμολόγησης της.

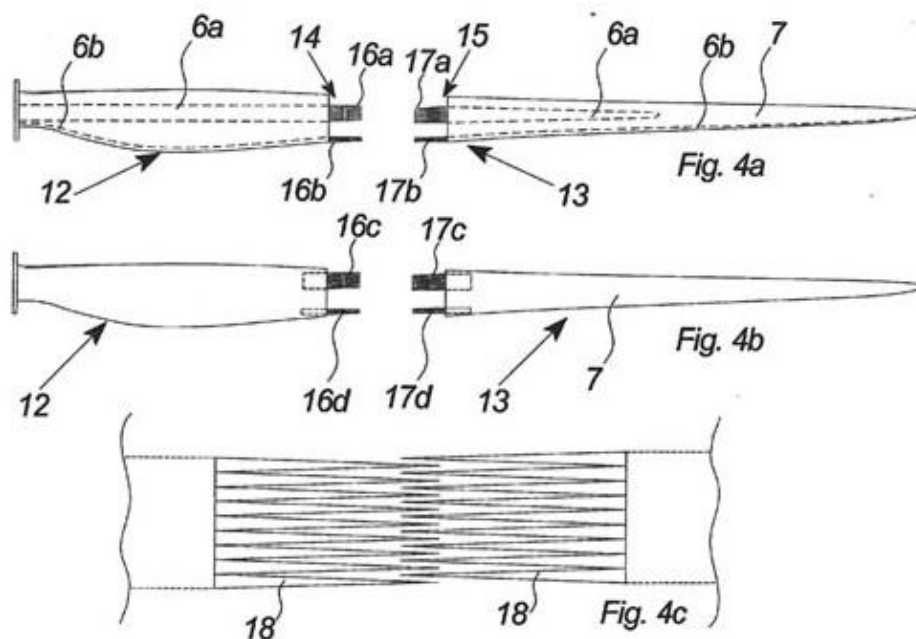


Εικόνα 70: Ρότορας ανεμογεννήτριας V90 κατά τη διάρκεια συναρμολόγησης

3.2.3.1 Πτερύγια

Η V90 έχει τρία πτερύγια τοποθετημένα συμμετρικά στον ρότορα με μια κωνικότητα ίση με 4^ο. 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.



Εικόνα71: Ευρεσιτεχνία της Vestas, κατασκευή του πτερυγίου σε δύο κομμάτια και σύνδεση του με εποξική ρητίνη

Στερεώνονται στον σύνδεσμο με την είσοδο της ρίζας τους μέσα σε αυτόν. Στο άκρο της ρίζας τους έχουν ένα ρουλεμάν το οποίο συναρμολογείται στην πλήμνη του πτερού 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 απόδοσή τους, ενώ ταυτόχρονα να παράγεται ο μικρότερος δυνατός θόρυβος και να μεταφέρονται όσο το δυνατό μικρότερα φορτία δυνάμεων 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 σε μεταφορά φαίνεται στην επόμενη εικόνα.

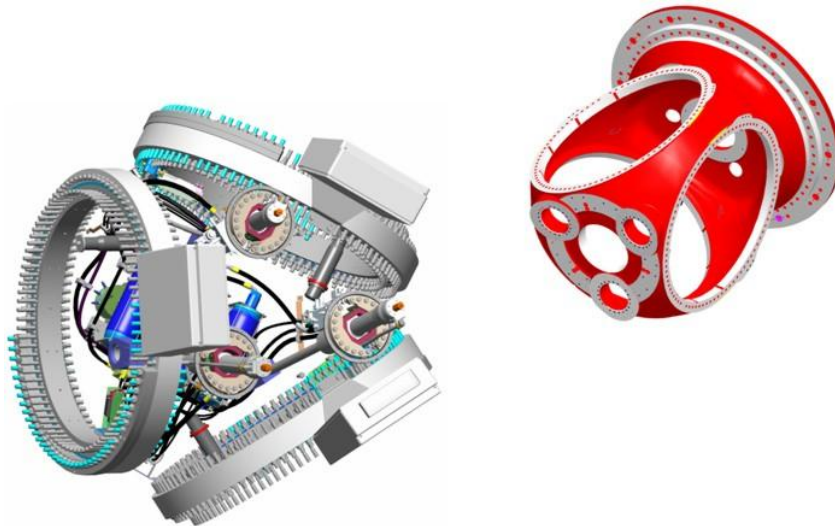


Εικόνα 72: Πτερύγιο ανεμογεννήτριας V90

3.2.3.2 Κόμβος (hub) σύνδεσης πτερυγίων – νασέλλας

Τα πτερύγια συνδέονται, μέσω ενός συνδέσμου 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 το συμβατικό σχήμα της ατράκτου. Μπροστά από τον σύνδεσμο είναι τοποθετημένος ένας κώνος μύτης, έτσι ώστε να κάνει αεροδυναμικό το σχήμα της ανεμογεννήτριας, μειώνοντας ταυτόχρονα 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 73: Κατασκευαστική διαμόρφωση του συνδέσμου hub

3.2.4 Τα 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, ο διακόπτης ισχύος, η γείωση και η αντικεραυνική προστασία. Στις τρεις επόμενες ενότητες θα αναφερθούμε με λεπτομέρεια σε αυτά.

3.2.4.1 Διακόπτης ισχύος

Ο διακόπτης ισχύος είναι μια διάταξη ασφαλείας, η οποία προστατεύει την ανεμογεννήτρια από σφάλματα στο δίκτυο όπως για παράδειγμα οι υψηλές εντάσεις ηλεκτρικού ρεύματος. 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 σε 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 προτείνονται δύο εναλλακτικές λύσεις διακοπών ισχύος, αναλόγως των επιθυμιών του πελάτη. Τα χαρακτηριστικά του φαίνονται 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 74: Χαρακτηριστικά μεγέθη διακοπών ισχύος

3.2.4.2 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 αγωγό ως καλώδιο γείωσης, είτε με ένα ξεχωριστό γυμνό χάλκινο αγωγό διαμέτρου 50 mm². Σε περίπτωση υψηλών τάσεων τότε ρεύμα 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 σύστημα της γείωσης περιλαμβάνει και την περιμετρική γείωση, της οποίας οι απαιτήσεις καθορίζονται ανάλογα με τον τύπο 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 αντίθετες πλευρές της ανεμογεννήτριας. Αν η αγωγιμότητα του εδάφους δεν είναι αρκετά καλή (δεν έχει πολύ χαμηλή αντίσταση), τότε πρέπει είτε να τοποθετηθούν ακόμα δύο ράβδοι, είτε να αυξηθεί η απόσταση έως και τα 10 μέτρα, είτε να γίνουν και τα δύο προηγούμενα.

3.2.4.3 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 στη μονάδα ελέγχου να ξέρει ακριβώς την στιγμή που χτυπάει ο κεραυνός πιο πετύγιο κτυπήθηκε και πόσο ισχυρός ήταν ο κεραυνός.

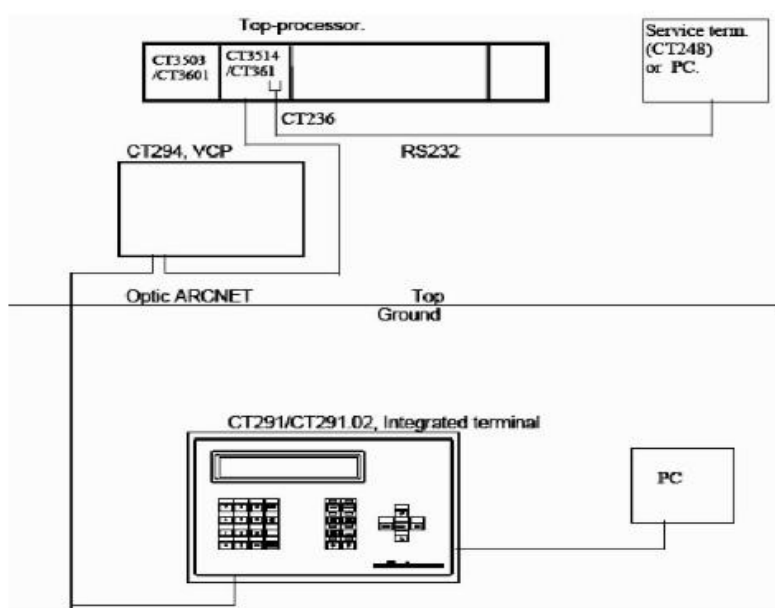
Το σύστημα αντικεραυνικής προστασίας σχεδιάστηκε με βάση τον κανονισμό IEC 61024, πήρε το όνομα Vestas Lighting Protection και χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλα τα σύγχρονα μοντέλα ανεμογεννητριών της Vestas.

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.

3.2.5 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 κυρίως μέσα στην νασέλλα (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). Παίρνει 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).

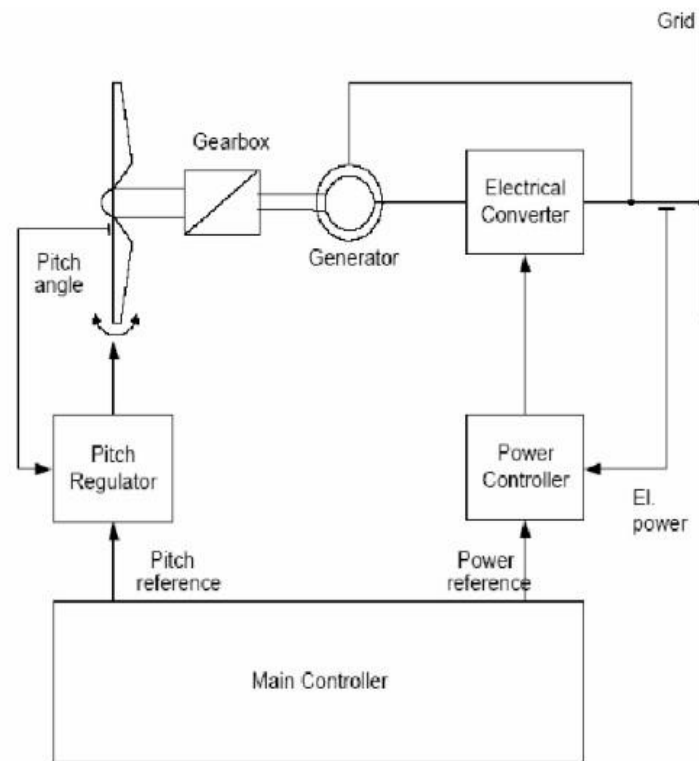


Εικόνα 75: Επικοινωνία με οπτικές ίνες δύο τμημάτων της μονάδας ελέγχου

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 με έλεγχο της ανατροφοδοτούμενης ισχύος 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.



Εικόνα 76: Κεντρικό σύστημα ελέγχου ανεμογεννήτριας

3.3 Λειτουργία

Στην ενότητα 3.2 παρουσιάστηκαν όλα τα τεχνικά και κατασκευαστικά 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 θορύβου 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°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 δηλαδή 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%.

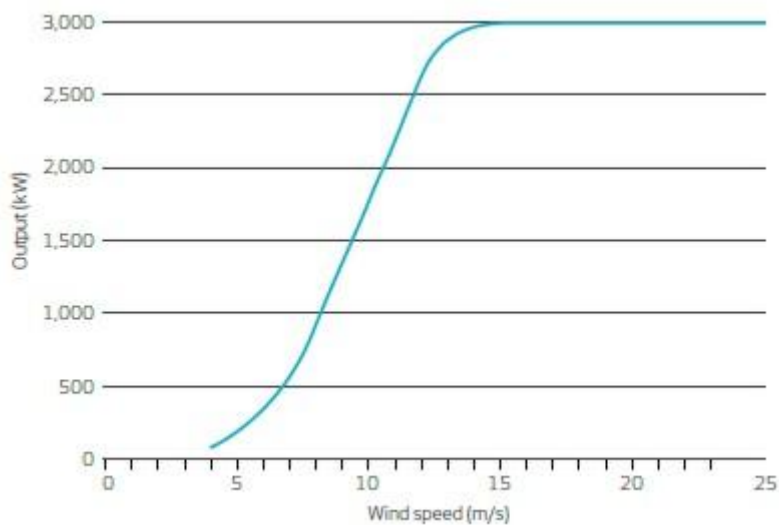
Η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια με τον πυλώνα των 80 μέτρων είναι όπως έχουμε πει, σχεδιασμένη να λειτουργεί και για ισχυρούς ανέμους που ανήκουν στην κατηγορία IEC IA. Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει ανέμους που περιγράφονται από την κατανομή Weibull (βλέπε Α μέρος, κεφάλαιο 2), μέσης ταχύτητας 10 m/s και 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 Vestas V90 πιστοποιήθηκε με βάσει τους διεθνείς κανονισμούς IEC WT01, DS 472, NVN 11400 – 0, DIBt Richtlinie für Windkraftanlagen και SITAC.

3.3.1 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 77: Χαρακτηριστική ισχύος ανεμογεννήτριας V90 – 3MW

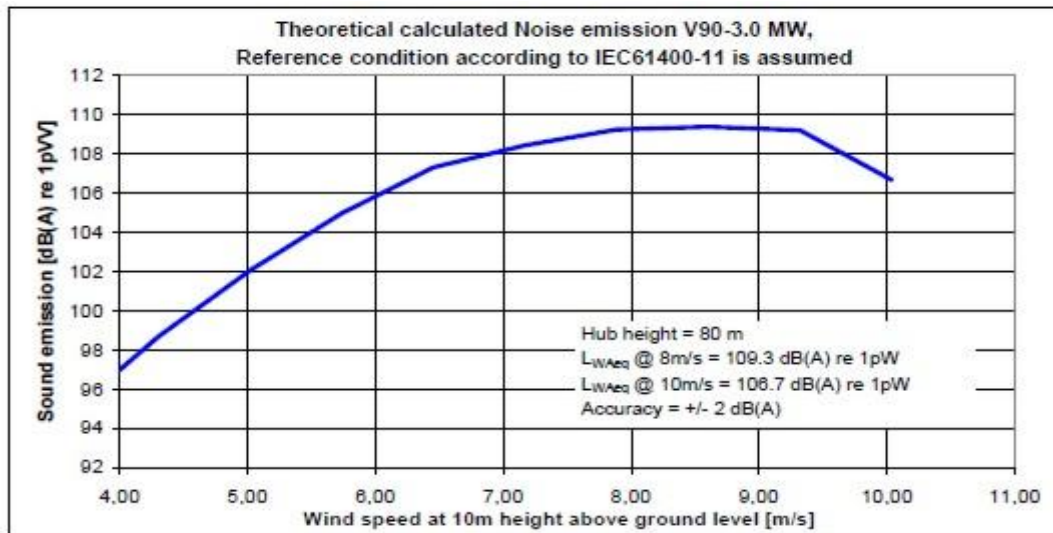
Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο πρώτο μέρος της εργασίας μας υπάρχουν τρεις πολύ σημαντικές ταχύτητες ανέμου που καθορίζουν την ισχύ που παράγει η ανεμογεννήτρια μας. Η ταχύτητα έναρξης λειτουργίας της ανεμογεννήτριας μας (cut – in) είναι ίση με 4 m/s.

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.

3.3.2 Καμπύλη θορύβου

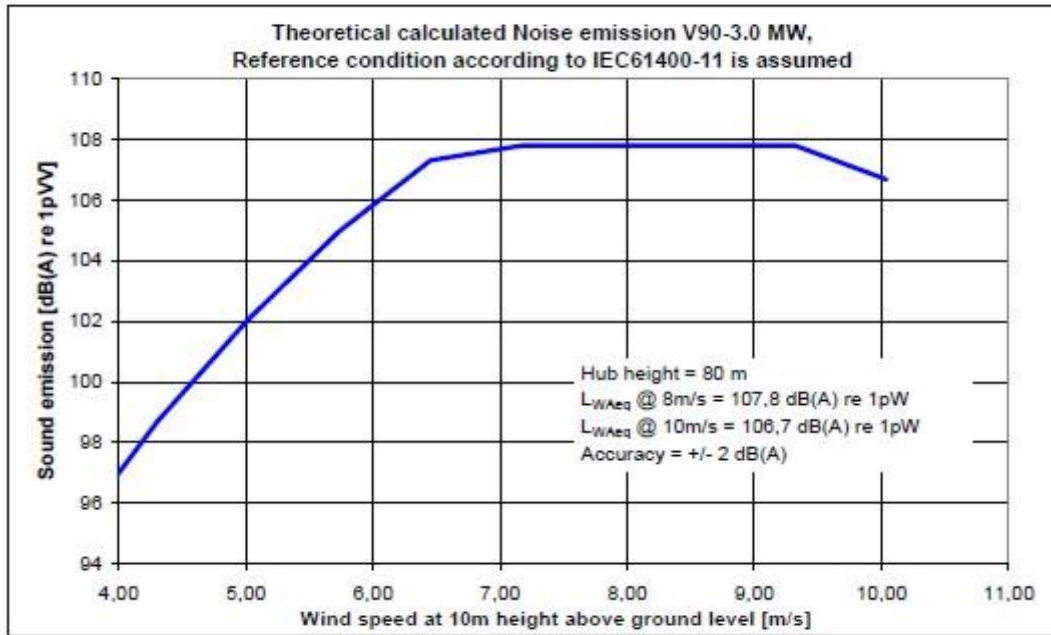
Η ανεμογεννήτρια κατά την λειτουργία της παράγει θόρυβο. Επειδή δεν είναι τοποθετημένες σε κατοικημένες περιοχές ανεχόμαστε παραγωγή υψηλών θορύβων της τάξεως των 100 decibel. Στην κανονική της λειτουργία έχει μετρηθεί ότι θόρυβος ξεπερνάει τα 109 db. Η μεταβολή του θορύβου συναρτήσει της ταχύτητας του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



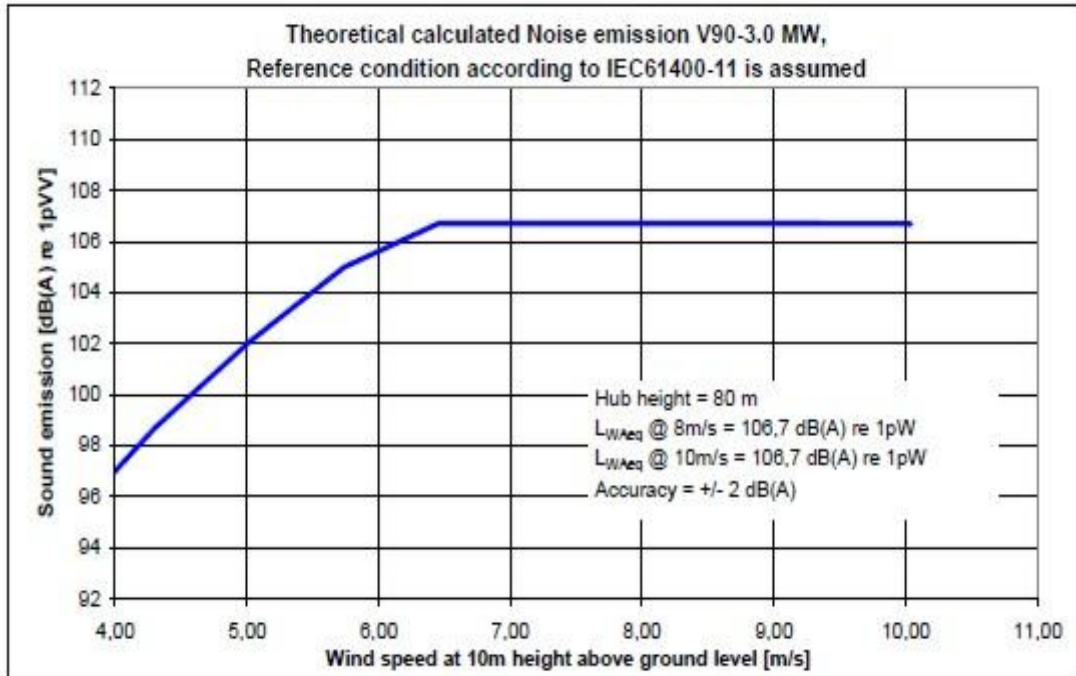
Εικόνα 78: Καμπύλη παραγωγής θορύβου για την κανονική λειτουργία της ανεμογεννήτριας

Η καμπύλη αυτή έχει υπολογιστεί για ανεμογεννήτρια με πυλώνα 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.



Εικόνα 79: Καμπύλη παραγωγής θορύβου για την λειτουργία mode 1 της ανεμογεννήτριας



Εικόνα 80: Καμπύλη παραγωγής θορύβου για την λειτουργία mode 2 της ανεμογεννήτριας

3.4 Συντήρηση

Η ανεμογεννήτρια, για να έχει πάντα όσο το δυνατό καλύτερη απόδοση, χρειάζεται συντήρηση. Η συντήρηση πρέπει να γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό και να τηρούνται 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 τις εργασίες συντήρησης της τρίμηνης και της ετήσιας συντήρησης.

3.5 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 συναρμολόγησής της, της πλήρους ρύθμισης της και της παρακολούθησής της, τιμολογείται διαφορετικά από

κάθε εταιρία αναλόγως των σχέσεων της με τον συγκεκριμένο πελάτη. Για παράδειγμα η κατασκευάστρια εταιρία EDF του αιολικού πάρκου «Τρίκορφο» 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 διείσδυσης 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 εγκαθίστανται για να τον εξυπηρετήσουν. Πέραν του κόστους συντήρησης των υποσταθμών υποχρεούται 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 υπολογίζονται ούτε στο ισοζύγιο εσόδων – εξόδων.

Τα έσοδα που έχουν οι επενδυτές είναι από μειωμένες τιμές από τις εταιρίες κατασκευής των ανεμογεννητριών σε περίπτωση μεγάλων και συχνών παραγγελιών και αγορών συντήρησης και από την επιδότηση της παραγόμενης κιλοβατώρας και της εγγυημένης τιμής της για κάποια έτη που τους παρέχει η ελληνική κυβέρνηση.

Αυτή την στιγμή η μεγαβατώρα 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. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που είναι συμφέρουσα αυτή η επένδυση.

Κεφάλαιο 4

Η τοποθεσία και το αιολικό πάρκο

4.1 Η τοποθεσία

Η τοποθεσία του αιολικού πάρκου είναι πολύ σημαντική αφενός για να γίνεται η καλύτερη δυνατή αξιοποίηση των χαρακτηριστικών της ανεμογεννήτριας που επιλέξαμε και αφετέρου για να έχουμε τη μεγαλύτερη δυνατή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά θα γνωρίσουμε την τοποθεσία του χωριού Πύργος Δωρίδας, έτσι ώστε να μπορέσουμε να αντιληφθούμε τα πλεονεκτήματα που μας προσφέρει και επιλέχθηκε για να εγκατασταθεί από την εταιρεία «ΛΑΥΚΟΣ ΑΙΟΛΙΚΗ Α.Ε» το αιολικό πάρκο που μελετούμε. Θα εξετάσουμε αρχικά στοιχεία σχετικά με τη μορφολογία της περιοχής και στην συνέχεια θα δούμε το αιολικό δυναμικό της περιοχής.

4.1.1 Η κοινότητα του Πύργου

Η παλαιά κοινότητα Πύργου Φωκίδας βρίσκεται στον ομώνυμο κεντρικό Νομό της Στερεάς Ελλάδας και συγκεκριμένα στον ‘Καλλικρατικό’ Δήμο Δωρίδας (με έδρα το Ευπάλιο) που έχει έκταση περίπου 206 τετραγωνικά χιλιόμετρα και σύμφωνα με το Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) και το υπουργείο περιβάλλοντος και ενέργειας μπορεί να δεχθεί μέχρι 49 ανεμογεννήτριες. Το ανάγλυφο της περιοχής χαρακτηρίζεται από ομαλές αλλά διαδοχικές κορυφές βουνών μικρού και μεσαίου ύψους, όχι ιδιαίτερα δασωμένων και με χορτολιβαδικές εκτάσεις, χαμηλής βλάστησης (πυρνάρια) ενδιάμεσα. Η περιοχή διαθέτει πυκνό δίκτυο δημοτικών και δασικών δρόμων σε σχετικά καλή κατάσταση, ευρύ νότιο θαλάσσιο μέτωπο (Κορινθιακός κόλπος) και δεν είναι ιδιαίτερα ανεπτυγμένη οικιστικά και

οικονομικά. Σημαντικό προσόν όμως είναι ότι διασχίζεται παραλιακά από την Εθνική οδό Αντιρρίου – Ιτέας – Άμφισσας, παράλληλα στον άξονα της οποίας «τρέχει» δίκτυο υπέρ-υψηλής τάσης της Δ.Ε.Η.



Εικόνα 81: Νομός Φωκίδας

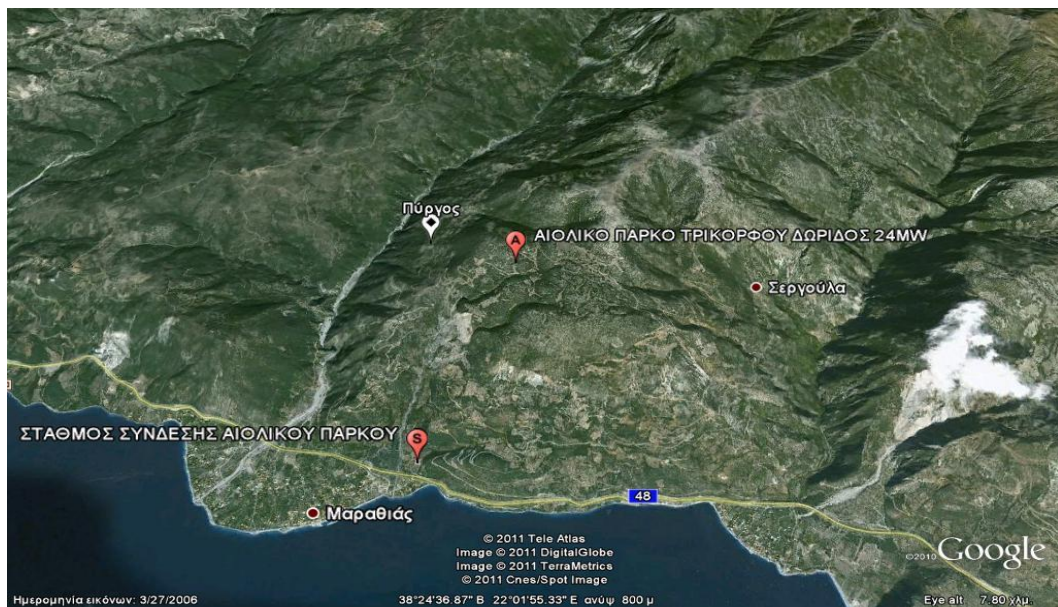


Εικόνα 82: Νομός Φωκίδας (λεπτομέρειες)



Εικόνα 83: «Καλλικρατικοί» Δήμοι Ν.Φωκίδας

(1) Δελφών & (2) Δωρίδας.

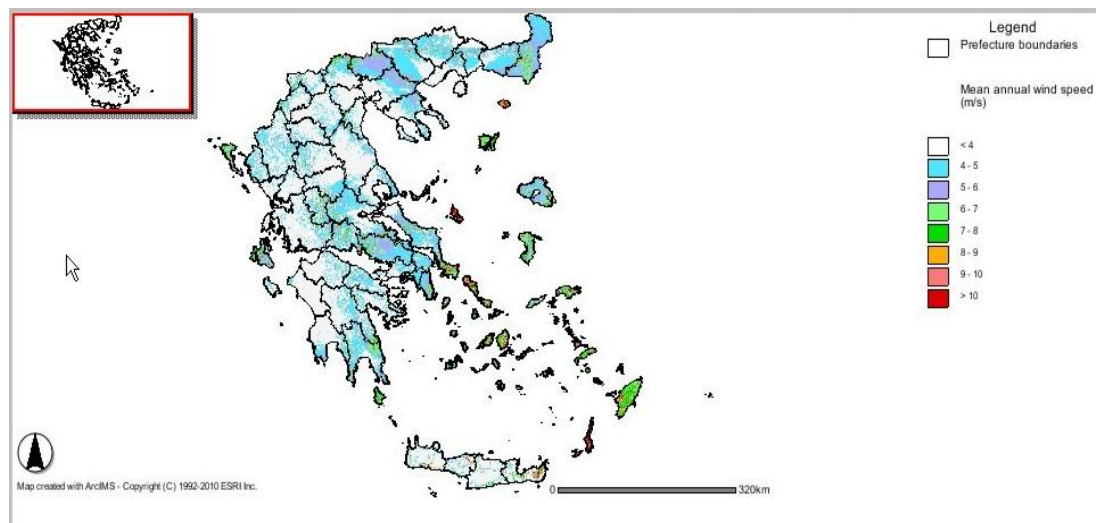


Εικόνα 84: Χωριό Πύργος και αιολικό πάρκο στο βουνό επάνω

4.1.2 Το αιολικό δυναμικό της περιοχής

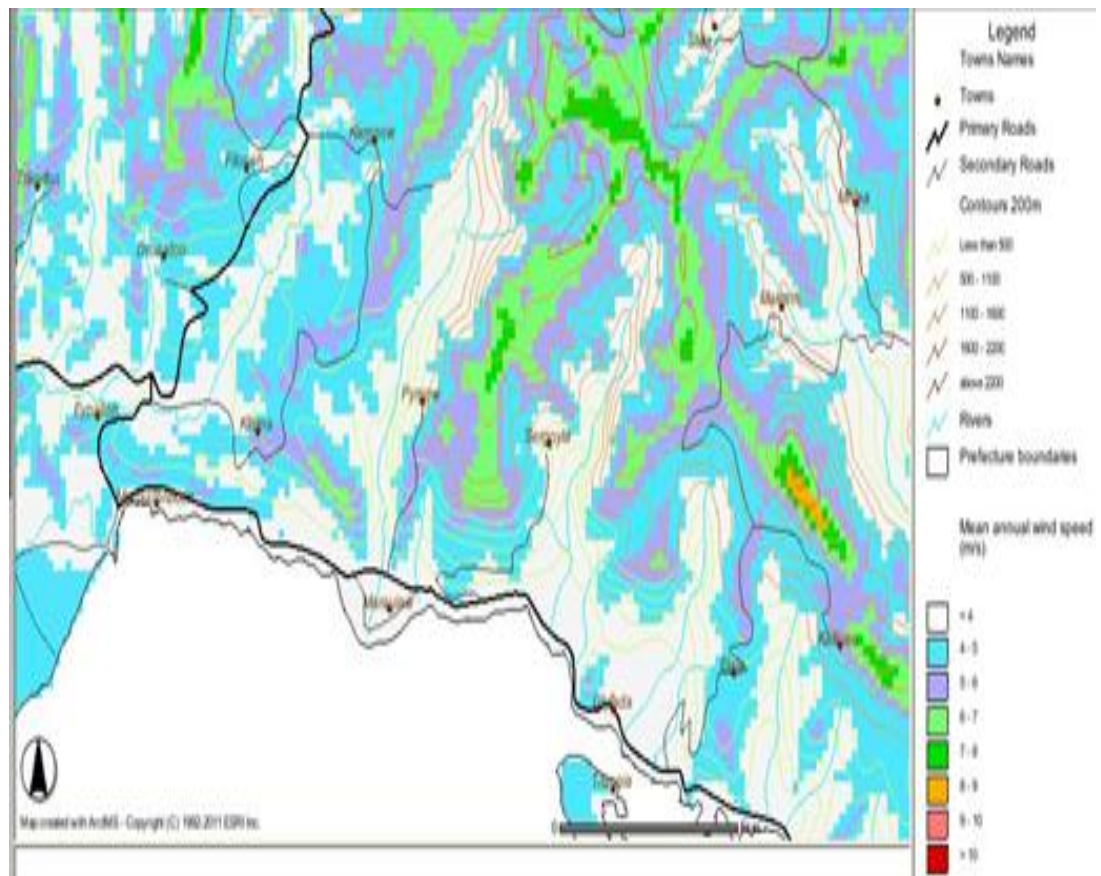
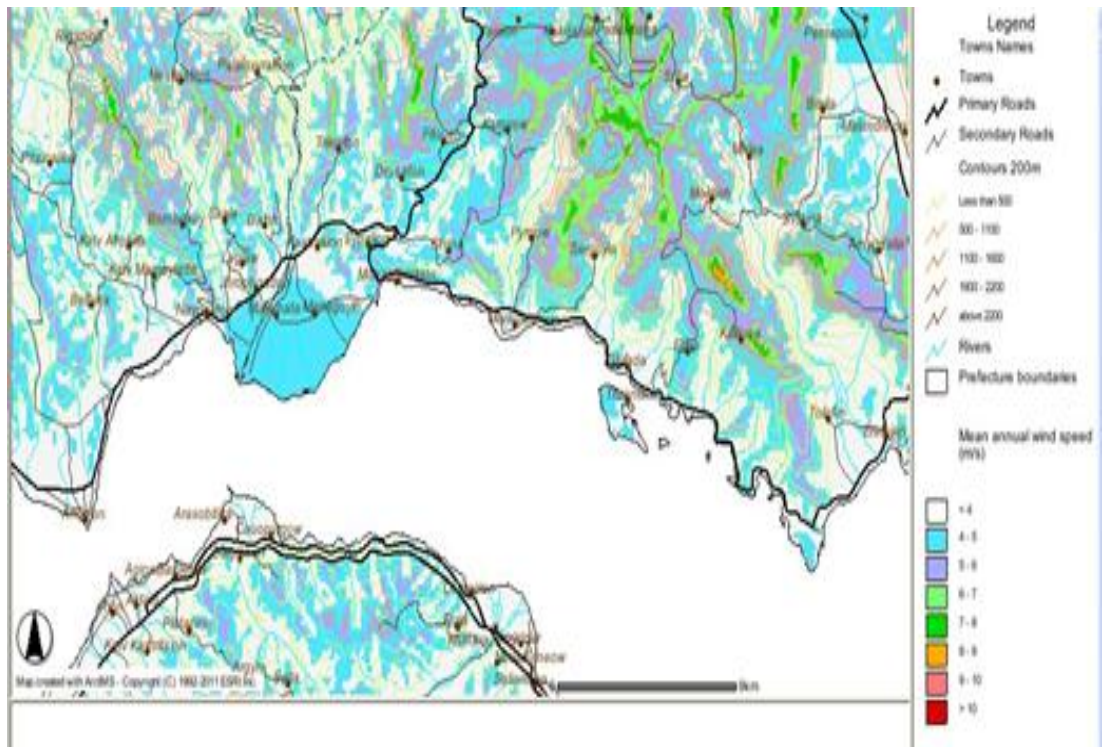
Στο πρώτο μέρος της εργασίας αυτής αναφερθήκαμε στο αιολικό δυναμικό και στο γεγονός ότι ένα μέρος του μόνο είναι εκμεταλλεύσιμο. Άρα το υψηλό αιολικό δυναμικό μιας περιοχής την καθιστά αυτόματα ελκυστική για αιολικές επενδύσεις και

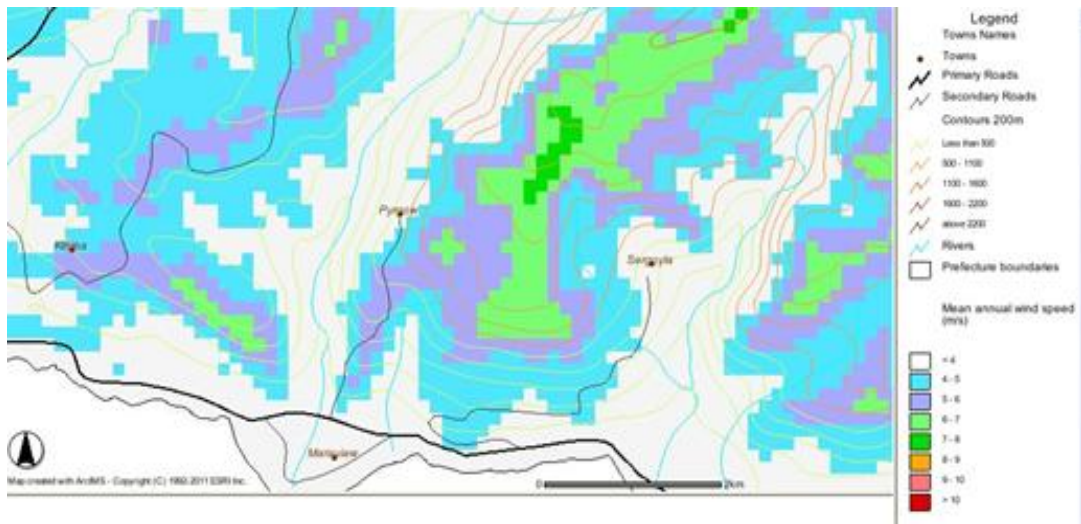
είναι ένα από τα πρώτα κριτήρια που εξετάζουν οι υποψήφιοι επενδυτές πριν καταλήξουν στη τοποθέτηση του αιολικού τους πάρκου. Όπως ήδη έχουμε αναφέρει η Ελλάδα θεωρείται από τις πλουσιότερες χώρες στον πλανήτη σε αιολικό δυναμικό. Ειδικά στην θαλάσσια περιοχή του Αιγαίου υπάρχει αιολικό δυναμικό από τα μεγαλύτερα στον ευρωπαϊκό χώρο. 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).



Εικόνα 85: Χάρτης του τεχνικά αξιοποιήσιμου αιολικού δυναμικού της Ελλάδας

Μεγεθύνοντας προοδευτικά το χάρτη αυτό (τριπλή εικόνα που ακολουθεί), βρίσκουμε ότι υπάρχει αξιόλογο και άρα αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό στη συγκεκριμένη περιοχή και μάλιστα σε αρκετά σημεία σαν αυτό που τελικά επελέγη για την χωροθέτηση και εγκατάσταση του αιολικού πάρκου.

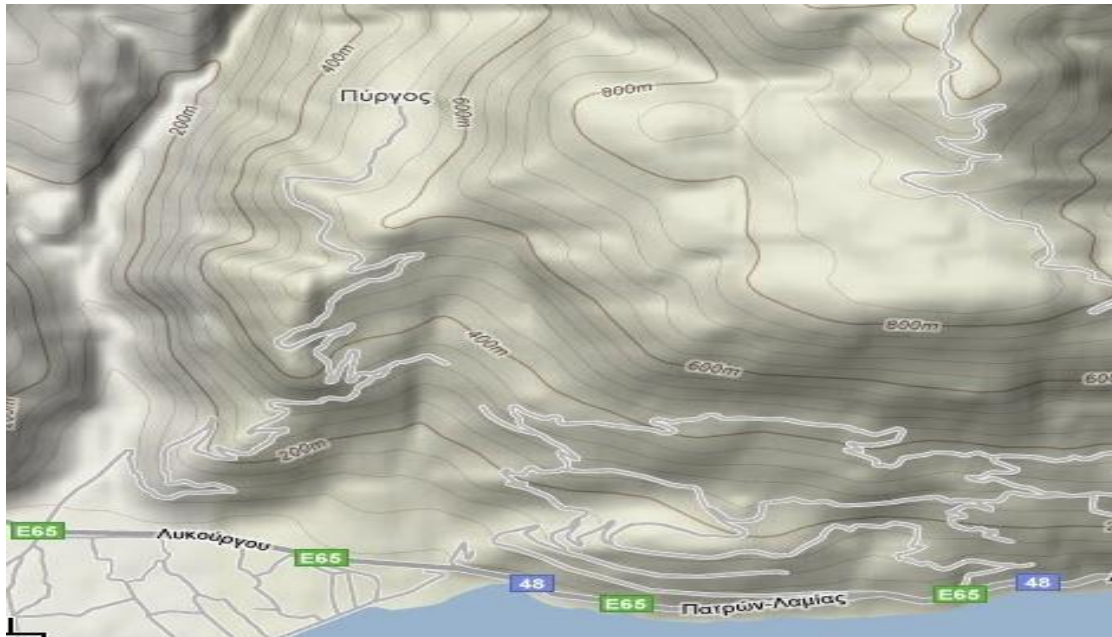




Εικόνα 86: Τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό στα νοτιοδυτικά του νομού Φωκίδας.

Στην τελευταία από τις παραπάνω τρεις βλέπουμε την περιοχή (μάλιστα σε σχέδιο συμπτωματικά στόχου σταυρού) δεξιά της κοινότητας Πύργου, η οποία συνίσταται στη βορειοανατολική πλαγιά του επιπέδου των 800 μέτρων , υψηλότερη του επιπέδου του χωριού (600 μέτρα) το οποίο βρίσκεται στην δυτική πλαγιά. Η επόμενη διπλή εικόνα μας δείχνει αυτά τα στοιχεία.





Εικόνα 87 : Ανάγλυφη απεικόνιση περιοχής αιολικού πάρκου χωριού Πύργου

Έχουμε πει σε προηγούμενη θεωρητική ενότητα, ότι όταν ο άνεμος (όπως στη περίπτωση μας) που έρχεται από τη Θάλασσα δεν συναντά εμπόδια, αφού η τραχύτητα του νερού είναι μικρή, φθάνει με τη μέγιστη προβλεπόμενη ταχύτητα στις ανεμογεννήτριες. Επίσης αν το βουνό (όπως στην περίπτωση μας) δεν είναι απότομο τότε μπορεί ακόμη και να διπλασιαστεί η ταχύτητα του ανέμου. Βλέπουμε λοιπόν και εδώ την καταλληλότητα της περιοχής που επιλέχθηκε για το αιολικό πάρκο «Τρίκορφο»

4.2 Αιολικό πάρκο

Στην ενότητα αυτή θα δούμε τα κατασκευαστικά και τα οικονομικά στοιχεία ενός αιολικού πάρκου και θα τα εξειδικεύσουμε για το πάρκο που μελετούμε. Τέλος θα δούμε τις πιθανές επιπτώσεις που μπορεί να φέρει στην γύρω περιοχή. Το αιολικό πάρκο «Τρίκορφο» έχει συνολική ισχύ 30 MW καθώς αποτελείται από 10 ανεμογεννήτριες V90 ισχύος 3 MW η κάθε μία. Έτσι η δυναμικότητα του υπερκαλύπτει την άδεια (24 MW) που χορηγήθηκε στην εταιρεία που επένδυσε σε αυτό και μπορεί να αξιοποιηθεί με περαιτέρω επέκτασή της στο μέλλον.

4.2.1 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 οριοθέτηση δηλαδή η τοποθέτηση των ανεμογεννητριών, των δρόμων πρόσβασης κλπ.

Στην συνέχεια πρέπει να μελετηθεί και να κατασκευαστεί ο κεντρικός, αν δεν υπάρχει ήδη, δρόμος πρόσβασης σε αυτό. Τέλος πρέπει να προβλεφτεί 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, η λειτουργικότητα και η τεχνική αρτιότητα του πάρκου. Στην συνέχεια θα δούμε τους παράγοντες που επηρεάζουν τις κατασκευαστικές αποφάσεις.

4.2.1.1 Γενική χωροθέτηση αιολικού πάρκου

Η χωροθέτηση ενός αιολικού πάρκου είναι μια πολύ δύσκολη υπόθεση γιατί επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Κάποιοι από αυτούς 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 τους παραπάνω παράγοντες, πρέπει να αποφασιστεί μια λύση κατασκευής του πάρκου σε ένα χώρο ο οποίος θα εξασφαλίζει ικανό αιολικό δυναμικό, για να μπορεί να λειτουργήσει και να είναι αποδοτική και προσοδοφόρα η επένδυση, προσβασιμότητα σε αυτό, δυνατότητα αξιοποίησης της ηλεκτρικής

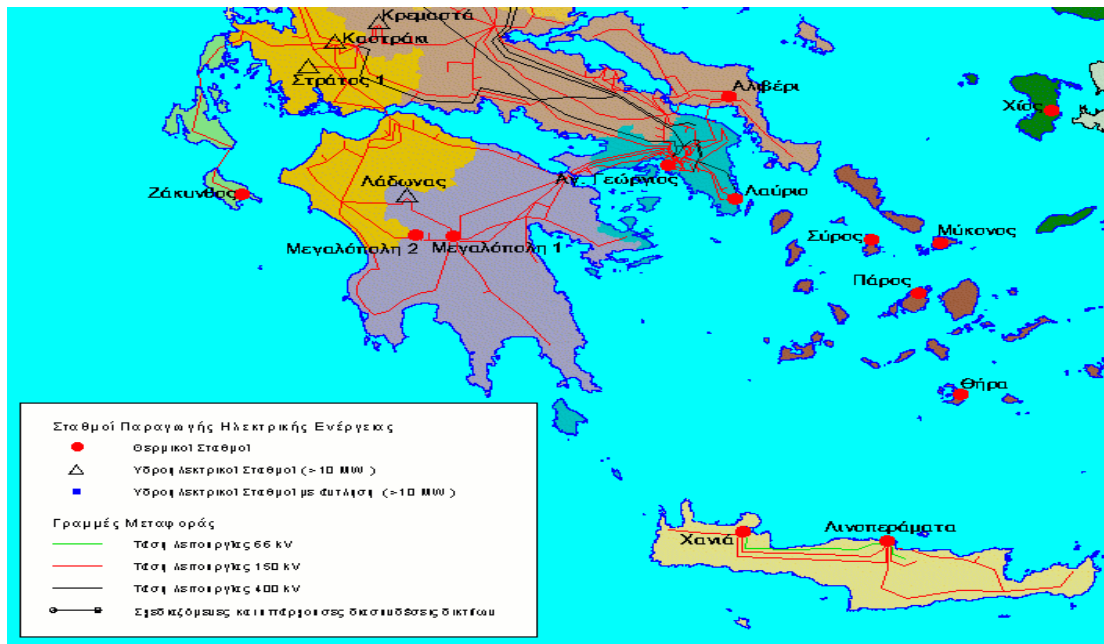
ενέργειας που παράγει, τις καλύτερες δυνατές συνθήκες ασφάλειας των ανθρώπων που διαβιούν στη γύρω περιοχή και την προστασία του φυσικού περιβάλλοντος της περιοχής.

Η εξασφάλιση πάντως του υψηλότερου αιολικού δυναμικού είναι ο σημαντικότερος από τους παράγοντες που πρέπει να ληφθεί υπόψη.

Ο επιλεγμένος χώρος στο Τρίκορφο προσφέρει πολλά από τα παραπάνω ζητούμενα. Καταρχήν έχει ένα ψηλό τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό το οποίο αναλύσαμε στην προηγούμενη ενότητα. Δεύτερον, γειτνιάζει με τους οικισμούς του Πύργου, της Σεργούλας και του Μαραθιά, έτσι χαράχθηκε εύκολα οδικό δίκτυο μέχρι την κορυφή του λόφου χωροθέτησης χωρίς πολλές παρεμβάσεις και μεγάλο κόστος. Η γειτνίαση του με τις κοινότητες που είπαμε προσφέρει και εύκολη πρόσβαση στο δίκτυο της ΔΕΗ έτσι ώστε να μπορεί το πάρκο να διαθέσει τις παραγόμενες κιλοβατώρες. Ακριβώς πάνω από την Εθνική οδό που διέρχεται στα όρια του οικισμού Μαραθιά και κάτω από το αιολικό πάρκο, περνά γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας διπλού κυκλώματος υπέρ-υψηλής τάσης 400KV (επόμενες δύο εικόνες).

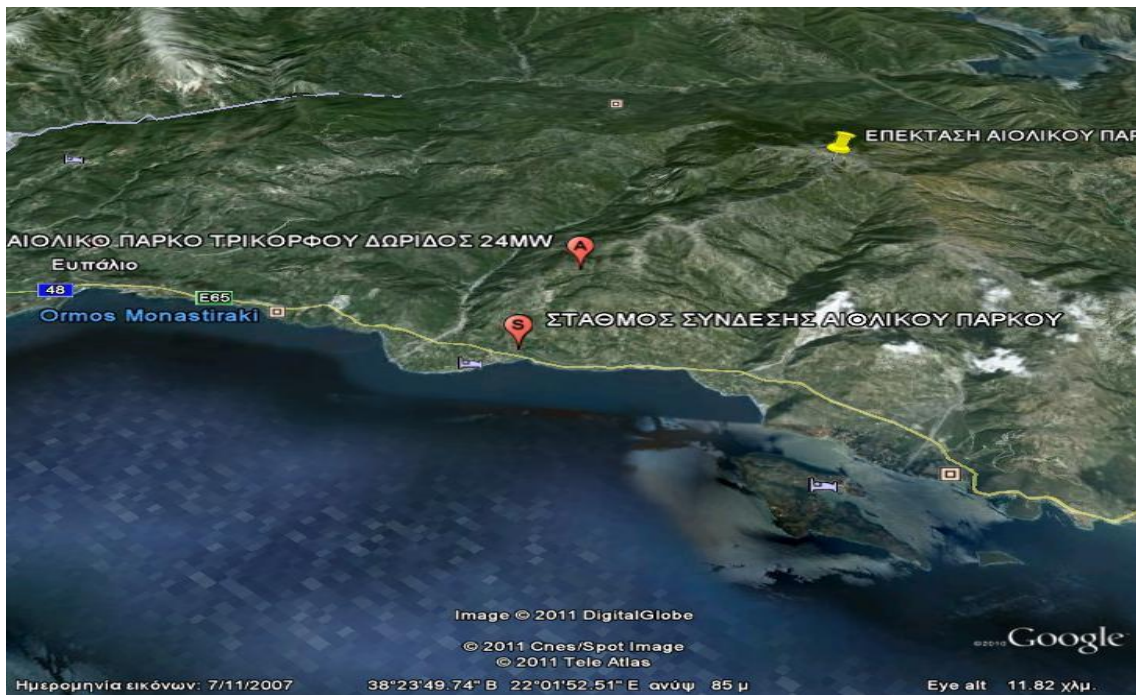


Εικόνα 88 : Η Εθνική οδός Αντιρρίου – Ιτέας, πυλώνες ΔΕΗ και ο σταθμός διασύνδεσης όπως φαίνονται από το πάρκο



Εικόνα 89: Δίκτυο της ΔΕΗ για την νότιο Ελλάδα.

Τρίτον, ακόμη υπάρχει η δυνατότητα για τοποθέτηση ανεμογεννητριών στην περιοχή καθώς δεν είχε συμπληρωθεί ο μέγιστος αριθμός έτσι όπως το έχει καθορίσει η ΡΑΕ και το ΚΑΠΕ (και μάλιστα προβλέπεται επέκταση του στο προσεχές μέλλον στα βόρεια της γενικής τοποθεσίας).



Εικόνα 90: ‘Αποψη υφιστάμενου και μελλοντικού πάρκου.

Τέταρτον, η τοποθέτηση του επάνω στην κορυφή του λόφου εξασφαλίστηκε από την μη ύπαρξη κατοικιών από ιδιώτες και την μη χρήση γης για γεωργικούς σκοπούς υπήρξαν μειωμένες αντιδράσεις από τους κάτοικους των πέριξ οικισμών



Εικόνα 91 : Κατευθύνσεις πρόσβασης του πάρκου



Εικόνα 92 : Άνετοι δρόμοι πρόσβασης του πάρκου

Πέμπτον, η προκήρυξη της περιοχής ως εκμεταλλεύσιμης για εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας (έχει οριστεί ως ΠΑΚ δηλαδή περιοχή αιολικής καταλληλότητας) έκανε πολύ πιο εύκολη την αδειοδότηση του έργου.

Έκτον, η μη ύπαρξη αρχαιολογικών χώρων, εθνικών δρυμών ή άλλων προστατευόμενων περιοχών και στρατιωτικών χώρων στην ευρεία περιοχή της κοινότητας ευνόησε την τοποθέτηση του αιολικού πάρκου. Το μόνο πρόβλημα ήταν και είναι ότι η απόσταση από τους γύρω οικισμούς είναι αρκετά μικρή και οι ανεμογεννήτριες φαίνονται από τα σπίτια έτσι προκαλώντας έτσι κάποια αισθητική όχληση (μικρή καθώς οι κύριες όψεις των κτισμάτων βλέπουν προς τη θάλασσα) αλλά όχι και θόρυβο, ο οποίος λόγω της απόστασης δεν φτάνει στους κατοίκους.

4.2.1.2 Εσωτερική χωροθέτηση αιολικού πάρκου

Η εσωτερική χωροθέτηση του αιολικού πάρκου εξαρτάται 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 ξεχωριστά σε κάθε ανεμογεννήτρια, η έκταση της κορυφογραμμής, περιορισμοί αποστάσεων ασφαλείας από διάφορες υποδομές της περιοχής, αποφυγή σκίασης οικιών η οποία μπορεί να δημιουργήσει αντίδραση των κατοίκων κ.ά.

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 μεταξύ 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 πεδίων ροής. Εξάλλου ο λόφος είναι αρκετά ομαλός και δεν υπήρξε δυσκολία στην δημιουργία των έργων τοποθέτησης και θεμελίωσης των ανεμογεννητριών ούτε στην σχεδίαση ενός δικτύου

πρόσβασης στις μηχανές, απαιτήθηκαν μόνο κάποια χωματουργικά έργα στις βάσεις θεμελίωσης και για διαπλάτυνση υφισταμένων αγροτικών δρόμων με πολύ μικρό οικονομικό κόστος.



Εικόνα 93: Η ομαλότητα του λόφου πάνω από το χωριό πρόσφερε ευκολία στην κατασκευή των δρόμων προσέγγισης των ανεμογεννητριών

Με βάση το μήκος της κορυφογραμμής τοποθετήθηκαν 10 ανεμογεννήτριες V90. Διάφορες υποδομές δεν υπάρχουν κοντά και έτσι δεν υπήρξε κάποιος περιορισμός σχετικά με αυτό. Επίσης δεν υπήρξε κάποιος περιορισμός σχετικά με την σκίαση οικιών καθώς το πάρκο είναι τοποθετημένο 200 έως 400 μέτρα ψηλότερα από το χωριό έτσι δεν υπάρχει πρόβλημα ούτε κατά την ανατολή ούτε κατά την δύση του ηλίου.

4.2.1.3 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 που όπως είπαμε και είδαμε προηγουμένως, είναι πολύ κοντά στο δίκτυο υπέρ – υψηλής τάσης.

4.2.2 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 παρακάτω επιπτώσεις.

4.2.2.1 Οπτική όχληση

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που προκαλεί ένα αιολικό πάρκο στους κατοίκους της περιοχής του είναι η οπτική όχληση, καθώς οι ανεμογεννήτριες, λόγω των διαστάσεων τους αλλά και του μεγάλου ύψους του πύλωνα τους, φαίνονται από πολύ μακρινές αποστάσεις. Η ανάγκη για κάθετη πρόσπτωση του ανέμου στα πτερύγια οδηγεί στην τοποθέτηση τους κοντά ή πάνω στον ορίζοντα, έτσι είναι ορατές από πολύ μεγάλες αποστάσεις. Επίσης η πυκνή τοποθέτηση των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται στην περιοχή (για να εξαντληθεί ο διαθέσιμος ενεργός χώρος και έτσι να έχουμε μέγιστη απολαβή κέρδους) επιβαρύνει και άλλο την οπτική όχληση. Βέβαια στην περιοχή ο χώρος είναι ανοικτός έτσι δεν προκαλείται τόσο άσχημη εντύπωση όση θα προκαλείτο 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 εδώ δεν συμβαίνει και εν τέλει είναι μία υποκειμενική υπόθεση καθώς στο μέλλον μπορεί να δούμε και οικιακές ανεμογεννήτριες ακόμη και μέσα σε κήπους αν το οικονομικό συμφέρον το απαιτεί.

4.2.2.2 Ακουστική όχληση

Η ακουστική όχληση είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για την κατασκευή ενός αιολικού πάρκου σχετικά κοντά σε 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 φυσικά δεν είναι αυτός ο θόρυβος που φτάνει στα αυτιά των κατοίκων. Οι κάτοικοι αντιλαμβάνονται πολύ μικρότερο θόρυβο 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, δίνουν την δυνατότητα να ρυθμίζεται ο θόρυβος που παράγει, ανάλογα με τις αντιδράσεις των κατοίκων.

4.2.2.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Οι επιπτώσεις στο περιβάλλον ενός αιολικού πάρκου είναι γενικά πολλές . Μπορεί να είναι επιπτώσεις σχετικά με την πανίδα (ζώα) ή την χλωρίδα (φυτά), σχετικά με το έδαφος, ή ακόμη και στη χρήση και την αξία της γης. Στην πανίδα οι επιπτώσεις έχουν να κάνουν κυρίως με τα πουλιά γιατί αυτά συγκρούονται με τα πτερύγια 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 ή περνούσαν από αυτή την περιοχή. Στην χλωρίδα οι επιπτώσεις είναι σχετικά μικρές γιατί συνήθως οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται σε περιοχές με χαμηλή έως καθόλου βλάστηση έτσι ώστε η τραχύτητα του εδάφους να είναι όσο το δυνατό μικρότερη. Αυτό συμβαίνει και στο Τρίκορφο. Κατά την κατασκευή του αιολικού πάρκου οι παρεμβάσεις στο έδαφος όπως είπαμε δεν ήσαν μεγάλες, έγιναν μόνο κάποια χωματουργικά έργα για την τοποθέτηση και την θεμελίωση των ανεμογεννητριών και για διάνοιξη των δρόμων έτσι οι επιπτώσεις ήσαν ιδιαίτερα μικρές. Αντίθετα με το έδαφος η ύπαρξη αιολικού πάρκου αλλάζει τις χρήσεις της γης αφού πολλοί κάτοικοι είναι απρόθυμοι να συνεχίσουν τις δραστηριότητες τους κοντά στις ανεμογεννήτριες. Στο Τρίκορφο το πρόβλημα αυτό δεν υφίσταται καθώς στον

λόφο δεν υπήρχε κάποιας μορφής χρήσης της γης έτσι δεν έχει αλλάξει κάτι από το παρελθόν. Το μόνο που έχει αλλάξει είναι η αξία της γης γιατί οι κάτοικοι πλέον δεν κτίζουν προς το πάνω μέρος του χωρίου, 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 τεχνολογικός. Εάν μειωθούν οι επιπτώσεις του αιολικού πάρκου στην περιοχή τότε θα γίνει πολύ πιο εύκολα αποδεκτό στους κατοίκους. Μην ξεχνάμε ότι μιλάμε για επαρχιακές περιοχές στις οποίες οι κάτοικοι είναι λιγότερο εξοικειωμένοι με την σύγχρονη τεχνολογία και ό,τι μπορεί να διαταράξει το περιβάλλον τους βρίσκει στην αρχή αντίθετους. 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 στη περιοχή πιθανόν δεν κατάφερε να πείσει τους κατοίκους. Παρακάτω εκθέτουμε αυτούσιο απόσπασμα από δημοσίευμα πριν από την κατασκευή του πάρκου που μελετήσαμε και που αποδεικνύουν τη συλλογιστική μας.

Υπό παρακολούθηση το αιολικό πάρκο στο Τρίκορφο

Αναρτήθηκε από iteanet



Από

www.nafpaktia.com

Στο μικροσκόπιο αποφάσισε το δημοτικό συμβούλιο Ευπαλίου να βάλει το υπό κατασκευή αιολικό πάρκο στο Τρίκορφο Δωρίδας. Η περιβαλλοντική αποκατάσταση, η υπογειοποίηση των καλωδίων, ο υποσταθμός και τα ανταποδοτικά οφέλη, τα κύρια ζητήματα.

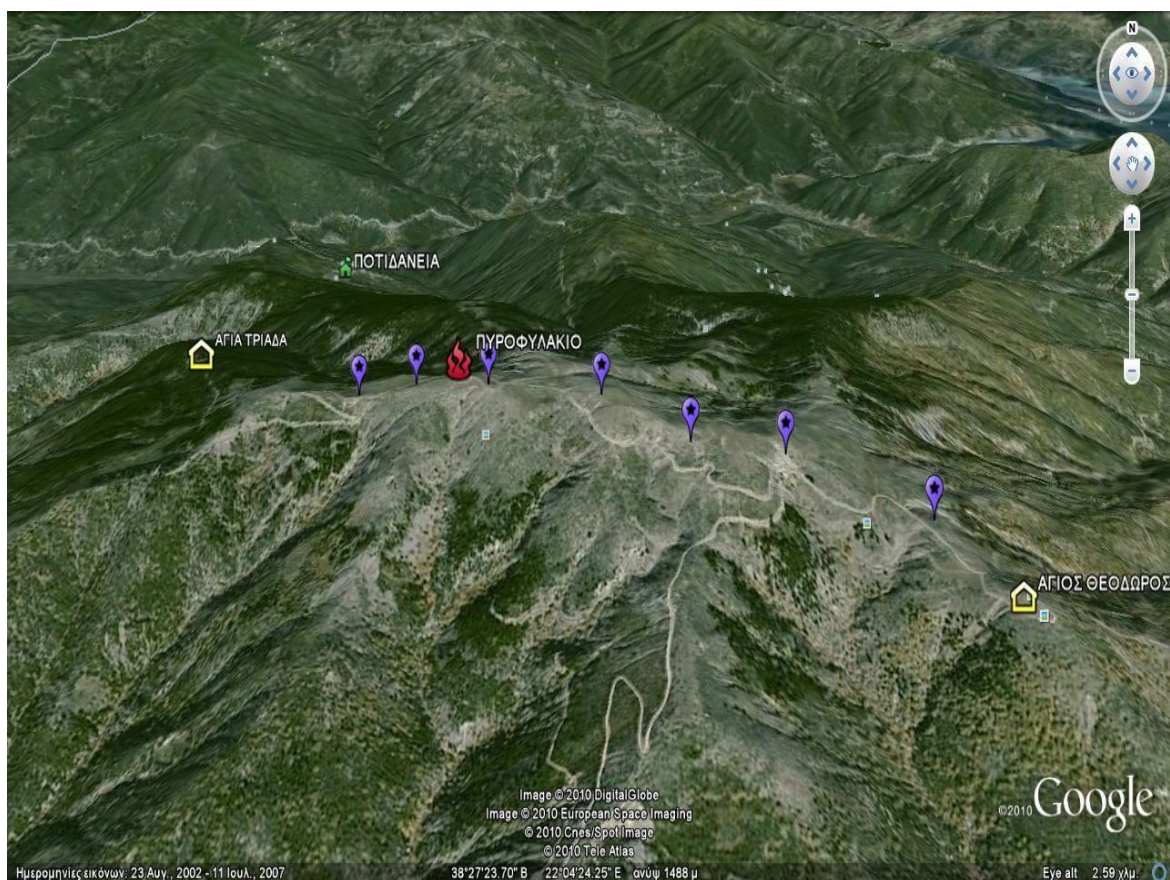
Το θέμα ήρθε στο δημοτικό συμβούλιο ύστερα από επερώτηση του Θανάση Μελίστα, ο οποίος κατά την εισήγησή του στάθηκε σε τρία βασικά σημεία. Πρώτον στα τεχνικά και περιβαλλοντικά ζητήματα του έργου, τονίζοντας ότι θα πρέπει να υπάρξει ιδιαίτερη μέριμνα τόσο ως προς την ασφάλεια του δρόμου πρόσβασης, όσο και στην...περιβαλλοντικήαποκατάσταση.

Ένα δεύτερο ζήτημα είναι ο τρόπος μεταφοράς της ενέργειας από το αιολικό πάρκο στον υποσταθμό που θα είναι χωροθετημένος στα όρια του οικισμού Μαραθιά. Σύμφωνα με την αρχική μελέτη έχει εγκριθεί η λύση της υπογειοποίησης των καλωδίων και οποιαδήποτε αλλαγή στον τρόπο μεταφοράς, για οικονομικούς λόγους, βρίσκει αντίθετους τους κατοίκους. Όσον αφορά δε το υποσταθμό, παρότι έχουν δοθεί διευκρινίσεις σε πρόσφατη σχετική ημερίδα, η ανησυχία των κατοίκων του Μαραθιά παραμένει, με τον Πολιτιστικό Σύλλογο του χωριού να ζητά την “βύθισή” του κατά 3 με 4 μέτρα ώστε να μειωθείηοπτικήρύπανση.

Τέλος ένα ακόμη σημαντικό ζήτημα είναι η δίκαια κατανομή των ανταποδοτικών τελών, καθώς το αιολικό πάρκο “πατάει” δύο τοπικά διαμερίσματα, αυτό του Μαραθιά και της Σεργούλας. Με ένα κείμενο 8 σημείων απάντησε ο Γιώργος Καλαντζής εκ μέρους της δημοτικής αρχής, που εκτός των τυπικών (σ.σ. ότι συμφωνούν με τα αιολικά πάρκα γενικότερα και ειδικότερα με το συγκεκριμένο) αφήνει ανοικτό το ενδεχόμενο εναέρια μεταφοράς του ρεύματος (σ.σ. να εξετασθούν τα συν και τα πλύν ανέφερε ο πρώην αντιδήμαρχος), ζητά την διερεύνηση εναλλακτικής θέσης για τον υποσταθμό ο οποίος να πάρει έγκριση και από την πολεοδομία, να τηρηθούν οι υποχρεώσεις της κατασκευάστριας εταιρίας ως προς τους περιβαλλοντικούς όρους, ενώ και η μελέτη αποκατάστασης να περάσει πρώτα από το δημοτικό συμβούλιο. Όσον αφορά τα ανταποδοτικά, ο κ. Καλαντζής τόνισε ότι ο Δήμος θα πρέπει να διεκδικήσει την αύξησή τους απ’ το 3% των εσόδων της εμπορικής λειτουργίας του πάρκου που λέει ο νόμος, σε 5%, να ζητηθεί η παροχή εργασιών με τη διάθεση των μηχανημάτων της εταιρίας για βελτιώσει δρόμων των οικισμών Πύργου , Σεργούλας και Μαραθιά, ενώ, τέλος, οι θέσεις εργασίας που θα δημιουργηθούν να καλυφθούναπόντόπιους.

Για την παρακολούθηση του έργου συστήθηκε και μια τριμελής επιτροπή απαρτιζόμενη από τους δημοτικούς συμβούλους Καλαντζή και Μελίστα και τον πρόεδρο του τοπικού διαμερίσματος Μαραθιά ΑριστείδηΣταμάτη.

Στο παρακάτω δεύτερο δημοσίευμα μάλιστα που αφορά στην επέκταση (βλέπε και επόμενη εικόνα) του πάρκου στη βόρεια μεριά της περιοχής Τρίκορφο και ενώ ήδη το πάρκο που μελετήσαμε λειτουργεί, μπορείτε να παρατηρήσετε ότι πλέον έχουμε πληθώρα ενστάσεων που εντάσσονται σχεδόν σε κάθε κατηγορία οχλήσεων και επιπτώσεων που αναφερθήκαμε στη μελέτη μας.



Εικόνα 94: Χωροθέτηση μελλοντικής επέκτασης του αιολικού πάρκου στο Τρίκορφο Δωρίδας.

Συμπεράσματα

Τα σχεδόν αυτονόητα συμπεράσματα που προκύπτουν, επιβεβαιώνουν τους ισχυρισμούς που διατυπώσαμε εισαγωγικά στη παρούσα εργασία για τις επενδύσεις Α.Π.Ε και ειδικά της αιολικής Α.Π.Ε στην Ελλάδα. Το αιολικό πάρκο « Τρίκορφο » αποτελεί ένα κύτταρο ανάπτυξης, σε μια περιοχή της χώρας μας που έχει ανάγκη σύγχρονης παραγωγικής προοπτικής, με εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας. Είναι φανερό δηλαδή πως οι ΑΠΕ αποτελούν αναγκαία αλλά και ελκυστική επένδυση αφενός για την ενεργειακή αυτοδυναμία της χώρας και αφετέρου της πράσινης ανάπτυξης.

Βιβλιογραφία & Αναφορές

1. A. R. Jha, Wind Turbine Technology, CRC Press, Taylor & Francis Group, Florida, USA, 2011.
2. National Research Council, Environmental Impacts of Wind Energy Projects, The National Academy Press, Washington, USA, 2007.
3. Energy Outlook of Greece, Υπουργείο Ανάπτυξης, Ελληνική Δημοκρατία, Φεβρουάριος 2009.
4. E. Hau, Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Applications, Economics, Second Edition, Springer – Verlag, Berlin, Germany, 2006.
5. D. Chiras, Wind Power Basics: A Green Energy Guide, New Society Publishers, Gabriola Island, Canada, 2010
6. J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers, Wind Energy Explained: Theory, Design and Application, John Wiley & Sons, West Essex, UK, 2002.
7. M. O. L. Hansen, Aerodynamics of Wind Turbines, Second Edition, Earth scan. London, UK, 2008.
8. European Wind Energy Association, Wind Energy – The Facts: A guide to the technology, economics and future of wind power, Earth scan, London, UK, 2009.
9. Οι ΑΠΕ αποτελούν αναγκαία αλλά και ελκυστική επένδυση, Διεύθυνση Σχεδιασμού και Οικονομικής Ανάλυσης, Εθνική Τράπεζα της Ελλάδος, Αθήνα, 25 Ιουνίου 2008.
10. Μελέτη σχεδιασμού και ένταξης της αιολικής ενέργειας σε τοπικά ηλεκτρικά δίκτυα, Χ. Ντούσκας, Π. Σκαρτσός, Γ. Κισσάς, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Τεχνολογιών Απορρύπανσης, ΤΕΙ Κοζάνης, 2009.
11. Μελέτη αιολικού πάρκου στη θέση Αγία Ελέσσα της νήσου των Κυθήρων, Ε. Καρλής, Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα Ενεργειακής και Περιβαλλοντικής Τεχνολογίας, ΤΕΙ Κρήτης, Ηράκλειο, 2006.
12. Global Wind Energy Outlook, J. Soby, President & Ceo Vestas America, December, 2006.
13. V90 – 3.0 MW: Exceptional performance and reliability at high wind speed sites, Vestas official brochure.

14. Vestas complete manual, appendix O: Operation and maintenance plan, Vestas, 2005.
15. Vestas Service Training Courses, Introduction to V90 - 3.0 MW, Vestas, January, 2008.
16. Κατασκευή, λειτουργία & συντήρηση πάρκων αιολικής ενέργειας στην Στερεά Ελλάδα, Πτυχιακή Εργασία, Π. Πατης, ΤΕΙ Κρήτης.
17. G. Abad, M. A. Rodriguez, G. Iwanski, Applications of the Doubly Fed Induction Machine (DFIM), Ingeteam, September, 2009.
18. Vestas Service Training Courses, Hydraulics V90, Vestas, January, 2008
19. General Specification V90 – 3.0MW VCRS, Vestas, October, 2006.
20. Vestas Service Training Courses, Gearbox and Lubrication, Vestas, January, 2008
21. 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.

1. <http://www.vestas.com/en/>
2. <http://www.wind-energy-market.com/en/wind-turbines/big-plants/details/details/bp/vestas-v90-30-mw-1/>
3. <http://smsvi.com/tutorial/Wind%20Energy.htm>
4. http://en.wikipedia.org/wiki/DFIG#Double_fed_induction_generator
5. <http://www.compositesworld.com/articles/wind-blade-manufacturing-part-i-m-and-p-innovations-optimize-production>
6. <http://caps.fool.com/blogs/a-review-of-solar-and-wind/266286>
7. <http://aims.cres.gr/grwind150/viewer.htm>
8. http://www.desmie.gr/up/files/GREECE_MODEL.png
9. <http://en.wikipedia.org/wiki/Coal>
10. <http://www.dei.gr/Default.aspx?id=2619&nt=102&lang=1>
11. <http://www.telosnet.com/wind/index.html>
12. <http://ehf.uni-oldenburg.de/wind/wind.html>
13. <http://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/wind-power2.htm>
14. http://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine
15. http://en.wikipedia.org/wiki/Darrieus_wind_turbine
16. <http://www.rcn27.dial.pipex.com/cloudsrus/wind.html>
17. <http://mrbrammer.com/humanities/geography/weather-precipitation/>
18. <http://www.solacity.com/SiteSelection.htm>
19. <http://www.wind-energy-market.com/en/wind-turbines/big-plants/details/details/bp/vestas-v90-30-mw-1/>