

ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε

**“Αιολικό πάρκο – Μελέτη και ανάλυση της λειτουργίας των
ανεμογεννητριών”
(Α.Π.: 1650)**



Πτυχιακή Εργασία

ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ : Κυρίος Γεώργιος

Επιβλέπων Καθηγητής: Σχοινάς Νικόλαος
Επίκουρος Καθηγητής τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών

Πάτρα- 2018

ΤΕΙ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε

**“Αιολικό πάρκο – Μελέτη και ανάλυση της λειτουργίας των
ανεμογεννητριών”
(Α.Π.: 1650)**

Πτυχιακή Εργασία

Κυρίος Γεώργιος

Επιβλέπων Καθηγητής: Σχοινάς Νικόλαος
Επίκουρος Καθηγητής τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 2018

.....
Ν. Σχοινάς
Επικ. Καθηγητής

.....
Α. Δροσόπουλος
Αναπλ. Καθηγητής

.....
Β. Χαραλαμπίκος
Επικ. Καθηγητής

Πάτρα, Μάιος 2018

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το θέμα της κατασκευής και λειτουργίας των αιολικών πάρκων μέσα στο πλαίσιο της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.). Η αιολική ενέργεια αξιοποιείται από τον άνθρωπο σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών εδώ και περίπου τρεις χιλιάδες χρόνια, ωστόσο το αυξανόμενο περιβαλλοντικό ενδιαφέρον των τελευταίων χρόνων συνέβαλλε στην περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας . Ειδικότερα, σε ένα αρχικό στάδιο γίνεται μια γενικότερη εισαγωγή στην αιολική ενέργεια, η οποία περιλαμβάνει μια σύντομη ιστορική ανάδρομη στην πορεία της αιολικής ενέργειας, αναφορά στη φύση και στα χαρακτηριστικά της, παρουσίαση των πλεονεκτημάτων όσο και των μειονεκτημάτων της. Στη συνέχεια αναφέρονται στοιχεία για το περιβάλλον και την αναγκαιότητα των ΑΠΕ, ενώ ακολουθεί λεπτομερής περιγραφή των ανεμογεννητριών και των νεότερων τεχνολογικών εξελίξεών τους. Σε ένα επόμενο στάδιο γίνεται αναφορά στα αιολικά πάρκα (επιλογή θέσης, ενεργειακή μελέτη κ.α) και πραγματοποιείται περιγραφή της κατασκευής και διασύνδεσης του αιολικού πάρκου. Στο σημείο αυτό δίνεται παράδειγμα λειτουργίας ενός συγκεκριμένου αιολικού πάρκου. Τέλος επισημαίνονται προβλήματα και αναφέρονται στοιχεία σχετικά με τη νομοθεσία, την δανειοδότηση και συστήματα στήριξης.

Abstract

This thesis deals with the issue of the construction and operation of wind farms in the context of the development of Renewable Energy Sources. Wind energy is used in a wide range of applications by humans for almost three thousand years, however the increasing environmental interest of recent years has contributed to further research and development of wind power. In particular in an initial stage, a general introduction to wind energy takes place, including a brief historical overview on the progress of wind energy, references to the nature and characteristics of wind energy and a short presentation of its advantages and disadvantages. Subsequently, information for the environment in combination with the neediness of renewable energy sources are provided, followed by a detailed description of wind turbines and their latest technological developments. In a next step, wind farms (position selection, energy etc. study) were described and it carried out a description of the construction and interconnection of the wind farm, while it is given example of the operation of a specific wind farm. Finally, problems are highlighted and information on legislation, lending and supporting systems are reported.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της ολοκλήρωσης του προπτυχιακού κύκλου σπουδών του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδας και συγκεκριμένα στην κατεύθυνση της Ηλεκτρικής Ενέργειας και Ηλεκτροτεχνικών Εφαρμογών. Το θέμα το οποίο πραγματεύεται είναι η κατασκευή και λειτουργία των αιολικών πάρκων μέσα στο πλαίσιο της ανάπτυξης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.), οι οποίες τα τελευταία χρόνια παρουσιάζουν ραγδαία ανάπτυξη εξαιτίας της ανάγκης για καθαρότερους και πιο φιλικούς προς το περιβάλλον τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου σε όλους τους ανθρώπους που συνέβαλαν στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή κ. Νικόλαο Σχοινά, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου τη συγκεκριμένη εργασία, καθώς επίσης και για την συνολική του επιστημονική καθοδήγηση του. Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερα τον κ Αναστάσιο Δροσόπουλο και τον κ. Βασίλειο Χαραλαμπίκο που δέχθηκαν να συμμετέχουν στην Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή της εργασίας. Τέλος ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου τόσο για την ηθική όσο και την υλική στήριξη που μου παρείχαν όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών μου.

Κατάλογος Περιεχομένων

Περίληψη	2
Abstract	3
Πρόλογος	4
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην αιολική ενέργεια	8
1.1.Γενικά-Ιστορική αναδρομή	8
1.2.Φύση της αιολικής ενέργεια και τα χαρακτηριστικά της	11
1.2.1. Η ταχύτητα του ανέμου	13
1.2.2. Η διεύθυνση του ανέμου	15
1.2.3. Ανατάραξη και στροβιλισμός του αέρα	15
1.2.4. Κατανομή του ανέμου	16
1.2.5. Η ενέργεια του ανέμου	18
Κεφάλαιο 2: Περιβάλλον και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.)	19
2.1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.)	19
2.2. Παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων των Α.Π.Ε. και της αιολικής ενέργειας	21
Κεφάλαιο 3: Περιγραφή ανεμογεννητριών και νεότερων εξελίξεων τους	23
3.1. Γενική αρχή λειτουργίας των ανεμογεννητριών	23
3.2. Είδη ανεμογεννητριών	24
3.3. Γενική διάταξη-Δομή ανεμογεννήτριας	29
3.4. Λειτουργικά χαρακτηριστικά μιας ανεμογεννήτριας	38
3.4.1. Απόδοση ισχύος	38
3.4.2. Διαθεσιμότητα	39
3.4.3. Ετήσιος υπολογισμός ενέργειας	39
3.4.4. Αιολικό δυναμικό	41
3.5. Επιλογή θέσης εγκατάστασης	41
3.6. Συντήρηση μιας ανεμογεννήτριας	42
Κεφάλαιο 4: Αιολικό πάρκο	42
4.1. Εισαγωγή στα αιολικά πάρκα	42
4.1.1. Βασικά χαρακτηριστικά των αιολικών πάρκων	42
4.1.2. Είδη αιολικών πάρκων	43
4.1.3. Λειτουργία αιολικού πάρκου	45
4.1.4. Συντήρηση αιολικού πάρκου	47
4.2. Περιγραφή εγκατάστασης ενός τυπικού αιολικού πάρκου	48
4.3. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις αιολικών πάρκων	51
4.4. Παράδειγμα αιολικού πάρκου στην Ελλάδα	54
Κεφάλαιο 5: Νομοθεσία, αδειοδότηση και τεχνοοικονομική ανάλυση αιολικού πάρκου	57
5.1. Νομοθεσία για έργα Α.Π.Ε	57
5.2. Αδειοδότηση αιολικού πάρκου	60
5.3. Τεχνοοικονομική ανάλυση αιολικού πάρκου	61
Συμπεράσματα	68
Παράρτημα	69
Βιβλιογραφία	71

Κατάλογος Εικόνων

- Εικόνα 1.1: Ανεμόμυλος κατά τον Μεσαίωνα
- Εικόνα 1.2: Ανεμόμυλος τύπου «western wheel»
- Εικόνα 1.3: Ανεμογεννήτρια Darrieus
- Εικόνα 1.4: Ανεμογεννήτρια Mod-5B
- Εικόνα 1.5: Γενική άποψη της κυκλοφορίας των ανέμων πάνω στην επιφάνεια της Γης.
- Εικόνα 1.6: Κατανομή της μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου στον ελληνικό χώρο.
- Εικόνα 1.7: Ροδόγραμμα για τη διεύθυνση του ανέμου.
- Εικόνα 1.8: Ιστόγραμμα και συνάρτηση Weibull.
- Εικόνα 2.1: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
- Εικόνα 2.2: Συνολικό δυναμικό των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας για το έτος 2050.
- Εικόνα 3.1: Αρχή λειτουργίας των ανεμογεννητριών
- Εικόνα 3.2: Ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα
- Εικόνα 3.3: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα
- Εικόνα 3.4: Διαμήκης τομή μιας τυπικής ανεμογεννήτριας.
- Εικόνα 3.5: Βασικά δομικά στοιχεία μιας ανεμογεννήτριας
- Εικόνα 3.6: Εσωτερική άποψη του πύργου της ανεμογεννήτριας
- Εικόνα 3.7: Πτερύγια ανεμογεννήτριας με μήκος περίπου 15 μέτρα
- Εικόνα 3.8: Σύστημα μετάδοσης κίνησης μιας ανεμογεννήτριας
- Εικόνα 3.9. Σύστημα προσανατολισμού μιας ανεμογεννήτριας
- Εικόνα 3.10. Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας 50kW
- Εικόνα 3.10. Καμπύλη ετήσιας ενέργειας ανεμογεννήτριας 50kW
- Εικόνα 4.1. Αιολικό πάρκο στο Τέξας των Η.Π.Α.
- Εικόνα 4.2. Υπεράκτιο αιολικό πάρκο στη Δανία
- Εικόνα 4.3. Διαδικασία λειτουργίας ενός τυπικού αιολικού πάρκου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας
- Εικόνα 4.4. Πίνακες μέσης τάσης σε υποσταθμό μέσης τάσης

Εικόνα 4.5. Άποψη υποσταθμού υψηλής τάσης

Εικόνα 4.6. Μονάδα απομακρυσμένου ελέγχου αιολικού πάρκου

Εικόνα 4.7. Ο χάρτης αιολικού δυναμικού της Κρήτης

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1. Η κλίμακα Beaufort.

Πίνακας 1.2. Παράμετροι για τον υπολογισμό του κατακόρυφου προφίλ της ταχύτητας του ανέμου.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στην αιολική ενέργεια

1.1. Γενικά - Ιστορική Αναδρομή

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια από τις πρώτες μορφές ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος και ουσιαστικά είναι ένα έμμεσο αποτέλεσμα της ηλιακής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης συμβάλει στην μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από μια περιοχή σε μια άλλη, δημιουργώντας την έννοια του ανέμου. Επιπλέον, η ενέργεια αυτής της μορφής είναι φιλική προς το περιβάλλον και πρακτικά ανεξάντλητη γι' αυτό και χαρακτηρίζεται ως "ήπιας μορφή ενέργεια", ενώ εντάσσεται στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.).

Η πρώτη αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας έλαβε χώρα το 3500 π.Χ. από τους Αιγυπτίους στην ναυσιπλοΐα για την κίνηση ιστιοφόρων πλοίων, εμπορικές συναλλαγές, συγκοινωνία. Παράλληλα άλλες ιστορικές καταγραφές αναφέρουν πως και άλλοι λαοί χρησιμοποιούσαν αιολικές μηχανές όπως οι Έλληνες, οι Πέρσες και οι Κινέζοι. Αργότερα περίπου τον 7^ο με 10^ο αιώνα μ.Χ. στην περιοχή του σημερινού Ιράκ και Αφγανιστάν χρησιμοποιούνται για πρώτη φορά οι ανεμόμυλοι για την άντληση νερού και την άλεση σιτηρών. Οι ανεμόμυλοι αυτοί ήταν κατακόρυφου άξονα προκειμένου να αξιοποιούν τις δυνατότητες του αέρα, μια ιδέα η οποία μεταφέρθηκε στην Ευρώπη μέσω των σταυροφόρων. Έτσι στις αρχές του Μεσαίωνα οι ανεμόμυλοι κυριάρχησαν στην Γηραιά Ήπειρο με τη διαφορά ότι ήταν οριζοντίου άξονα και παρουσίαζαν μια ελαφριά κλίση στα περύγια (Εικόνα 1.1). Οι χώρες που πρωτοστάτησαν στην χρήση της αιολικής ενέργειας ήταν η Αγγλία και η Ολλανδία.



Εικόνα 1.1: Ανεμόμυλος κατά τον Μεσαίωνα.

Πηγή: Invonio (<http://medilab.pme.duth.gr/invonio>)

Από τον 19^ο αιώνα και μετά έκανε την εμφάνισή του κυρίως στην Αμερική ένας νέος τύπος ανεμόμυλου γνωστός με το όνομα «western wheel» (Εικόνα 1.2). Η

ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου τύπου ήταν ότι είχε περίπου 20 πτερύγια, φτιαγμένα από ατσάλι. Χρησιμοποιήθηκε κυρίως για άρδευση, ενώ μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1930 λειτουργούσαν 8 εκατομμύρια τέτοιοι ανεμόμυλοι.



Εικόνα 1.2 : Ανεμόμυλος τύπου «western wheel».

Πηγή: Renewable energy, Agriculture, Technology (<http://www.sustainable-hyderabad.in>)

Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα ο James Blyth κατασκεύασε μια ανεμογεννήτρια συνεχούς ρεύματος 12 kW, υλοποιώντας την πρώτη απόπειρα παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος με τη χρήση μιας αιολικής μηχανής. Στη συνέχεια το 1922 ο Σουηδός Sigurd Johannes Savonius δημιούργησε την Savonius, μια ανεμογεννήτρια καθέτου άξονα, η οποία αποτελείται από δύο ημικυκλικά πτερύγια με κενό ανάμεσά τους που σε κάτοψη έχουν το σχήμα "S", ενώ το 1931 στον Καναδά ο G.J.M. Darrieus κατασκεύασε μια ανεμογεννήτρια καθέτου άξονα με καμπυλωτά πτερύγια ισχύος (Εικόνα 1.3). Αντίστοιχες προσπάθειες έλαβαν χώρα και στη Γερμανία και τη Βρετανία αναζητώντας την ιδανικότερη κατασκευαστική αρχιτεκτονική που θα εξασφάλιζε την οικονομικά αποδοτικότερη ανεμογεννήτρια.



Εικόνα 1.3: Ανεμογεννήτρια Darrieus .

Πηγή: Invonio (<http://medilab.pme.duth.gr/invonio>)

Οι Smith-Putman το 1941 στις ΗΠΑ κατασκεύασαν τη μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα με ατσάλινο ρήτορα διαμέτρου 53 m, η οποία μπορούσε να παράγει ρεύμα ισχύος της τάξεως των MW. Έκτοτε πραγματοποιήθηκαν διάφορες προσπάθειες για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, οι οποίες όμως εγκαταλείφθηκαν. Ωστόσο η απότομη αύξηση της τιμής του πετρελαίου κατά την δεκαετία του 70 συνέβαλε στην έρευνα και ανάπτυξη των ανεμογεννητριών και κατ' επέκτασιν στην δημιουργία αιολικών πάρκων μέσω χρηματοδοτήσεων από κυβερνητικά προγράμματα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η κατασκευή μιας σειράς νέων ανεμογεννητριών στις ΗΠΑ, όπου το 1975 δημιουργήθηκε το μοντέλο Mod-0 διαμέτρου 38 m, ισχύος 100 KW, το οποίο εξελίχθηκε στο μοντέλο Mod-5B το 1987, με διάμετρο 97.5 m και ισχύ 2.5 MW (Εικόνα 1.4). Πέραν όμως της εξέλιξης των ανεμογεννητριών, παρατηρήθηκε και μια αύξηση της ισχύος των αιολικών πάρκων, ξεκινώντας από ανεμογεννήτριες της τάξης των 50 KW και φθάνοντας στα 1500 KW.



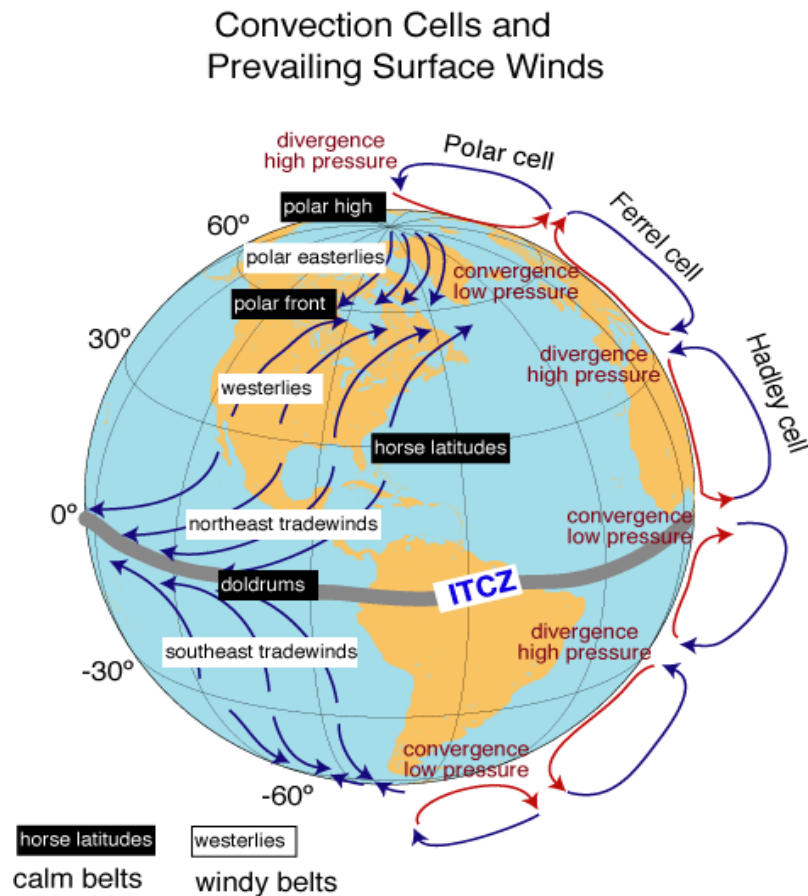
Εικόνα 1.4: Ανεμογεννήτρια Mod-5B.

Πηγή: Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/NASA_wind_turbines)

1.2. Φύση της αιολικής ενέργειας και τα χαρακτηριστικά της

Έχει ήδη αναφερθεί ότι η αιολική ενέργεια αποτελεί ένα έμμεσο αποτέλεσμα της ηλιακής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα η αιολική ενέργεια δημιουργείται από τη διαρκή κίνηση του ατμοσφαιρικού αέρα που περιβάλλει τη γη σε συνδυασμό με την ηλιακή ακτινοβολία, την ανομοιογένεια του αναγλύφου του εδάφους και την περιστροφική κίνηση της Γης γύρω από τον άξονά της. Εξαιτίας των παραπάνω αναπτύσσεται μια ανομοιόμορφη κατανομή της ατμοσφαιρικής πίεσης στην επιφάνεια της Γης, η οποία συμβάλλει στην μετακίνηση αερίων μαζών από μία περιοχή σε μία άλλη, σχηματίζοντας τους ανέμους. Ειδικότερα, στις περιοχές του Ισημερινού ο αέρας θερμαίνεται, γίνεται ελαφρύτερος και συνεπώς αρχίζει να ανυψώνεται κινούμενος τόσο προς το Βορρά όσο και προς το Νότο. Η κίνηση αυτή λαμβάνει χώρα έως τις περιοχές που βρίσκονται 30° Β (βόρεια) και 30° Ν (νότια), όπου ψυχρός αέρας αρχίζει να βυθίζεται καταλαμβάνοντας τα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Οι κύριες δυνάμεις διαμόρφωσης των ανέμων είναι: α) η δύναμη της βαροβαθμίδας, η οποία οφείλεται στη διαφορά πιέσεων μεταξύ δύο περιοχών, β) η κυκλοστροφική δύναμη (φυγόκεντρος), η οποία εμφανίζεται κατά την στροφή ενός ανέμου γύρω από ένα κέντρο, γ) η δύναμη της τριβής, η οποία σχετίζεται με την τριβή που αναπτύσσεται στα κινούμενα μόρια του αέρα εξαιτίας της ανομοιογένειας του γήινου αναγλύφου και δ) η οριζόντια εκτροπτική δύναμη, γνωστή ως δύναμη Coriolis, η οποία οφείλεται στην περιστροφή της γης και συμβάλλει στην γένεση μιας απόκλισης ροής του αέρα από τον Ισημερινό προς τους πόλους με κατεύθυνση προς

τα ανατολικά και αντίστοιχα μιας επιστρεφόμενης ροής από τους πόλους προς τον Ισημερινό με δυτική διεύθυνση (Εικόνα 1.5).



Εικόνα 1.5: Γενική άποψη της κυκλοφορίας των ανέμων πάνω στην επιφάνεια της Γης.

Πηγή: Winds (<https://igppweb.ucsd.edu/>)

Η αξιοποίηση των ανέμων και κατ' επέκτασιν της αιολικής ενέργειας επιτάσσει την λεπτομερή γνώση των χαρακτηριστικών του ανέμου με στόχο την ορθή και οικονομικά αποδοτικότερη χρήση τους. Τα κύρια χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν έναν άνεμο είναι η διεύθυνση και η ταχύτητα με την οποία κινείται η αέρια μάζα (ένταση), ωστόσο εξίσου σημαντικοί παράμετροι, η επικρατούσα στην περιοχή ανατάραξη, ο στροβιλισμός του ανέμου και η μεταβολή με το ύψος της ταχύτητας του ανέμου (κατανομή του ανέμου), οι οποίες είναι διαφορετικές για κάθε τόπο και υπολογίζονται με ένα πλήθος αξιόπιστων μετρήσεων για μια ορισμένη περιοχή.

1.2.1. Ταχύτητα ανέμου

Η ταχύτητα του ανέμου (V) ορίζεται ως το διάστημα το οποίο διανύει μια αέρια μάζα στη μονάδα του χρόνου και ο υπολογισμός του υλοποιείται με τη χρήση ειδικών οργάνων που καλούνται ανεμόμετρα όσο και εμπειρικά. Οι μονάδες μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου είναι διάφορες όπως: μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/sec), χιλιόμετρα ανά ώρα (km/h), μίλια (1.609 μ.) ανά ώρα (m.p.h.), αγγλικά πόδια ανά δευτερόλεπτο (ft/sec) και κόμβοι (1.852 m/h). Ο εμπειρικός προσδιορισμός της ταχύτητας γίνεται μέσω της παρατήρησης της κίνησης διαφόρων αντικειμένων ή της πρόκλησης καταστροφών, κάτι το οποίο εισήγαγε ο Άγγλος ναύαρχος Beaufort δημιουργώντας μια ανεμομετρική κλίμακα η οποία στηρίχθηκε στην εκτίμηση της σφοδρότητας (ταχύτητας) του ανέμου στη θάλασσα σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προκαλούσε στα πανιά των πλοίων. Με την πάροδο του χρόνου τα κριτήρια και οι βαθμίδες της κλίμακας Beaufort μεταβλήθηκαν (Πίνακας 1.1).

Πίνακας 1.1. Η κλίμακα Beaufort

Beaufort	Χαρακτηρισμός ανέμου
0	Άπνοια (νηνεμία)
1	Σχεδόν άπνοια / Υποπνέων (ελαφρύ αεράκι)
2	Πολύ ασθενής (ελαφριά αύρα)
3	Ασθενής
4	Σχεδόν μέτριος
5	Μέτριος
6	Ισχυρός
7	Σφοδρός / Σχεδόν Θυελλώδης (Near Gale)
8	Θυελλώδης (Gale)
9	Πολύ Θυελλώδης (Strong Gale)
10	Θύελλα (Storm)
11	Βίαιη / Σφοδρή θύελλα (Violent Storm)
12	Τυφώνας (Hurricane-force)

Η ταχύτητα του ανέμου είναι ένα μέγεθος ιδιαίτερα μεταβλητό εμφανίζοντας διακυμάνσεις ακόμα και σε διαστήματα εκατοστών του δευτερολέπτου, γι' αυτό και χρησιμοποιείται το μέγεθος της μέσης ταχύτητας του ανέμου σε μια χρονική περίοδο. Το μέγεθος αυτό δίνεται από την εξίσωση 1.2-1 για μια ορισμένη χρονική περίοδο T , ενώ η στιγμιαία ταχύτητα είναι το άθροισμα της μέσης ταχύτητας του ανέμου και της διακύμανσης του ανέμου και δίνεται από τις σχέσεις 1.2-2 και 1.2-3.

$$\bar{V} = \frac{1}{T} * \int_t^{t+T} V(t) * dt \quad (1.2-1)$$

$$V = \bar{V} \pm \sigma_V \quad (1.2-2)$$

$$\sigma_V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2 \quad (1.2-3)$$

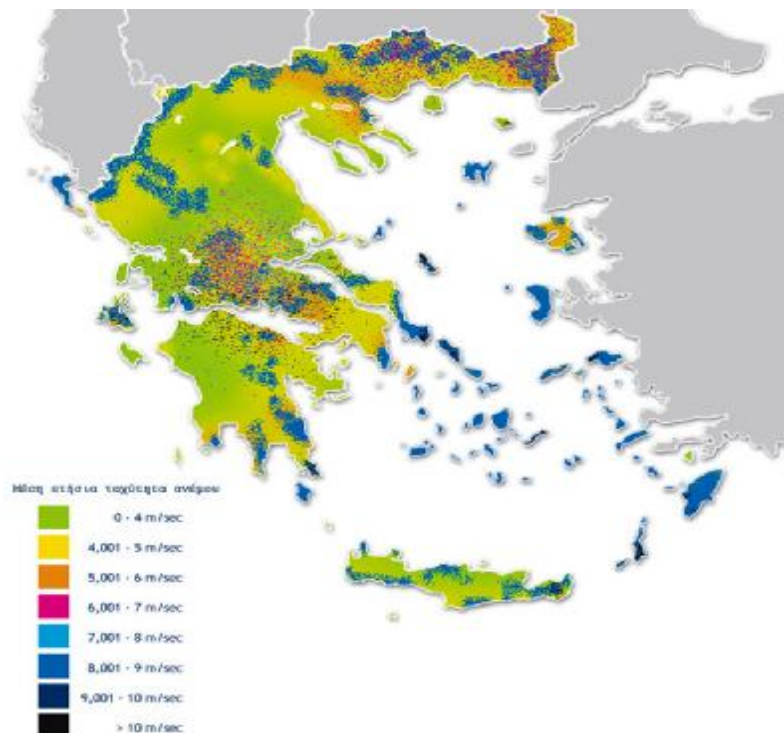
Όπου,

\bar{V} : μέση ταχύτητα του ανέμου

V : στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου

σ_V : η διακύμανση του ανέμου

Η μέγιστη ταχύτητα του ανέμου καθορίζει ουσιαστικά την αντοχή μιας αιολικής μηχανής και εξαρτάται τόσο από τη γεωγραφική θέση της περιοχής όσο και από τα χαρακτηριστικά του εδάφους. Το συγκεκριμένο μέγεθος υπολογίζεται με δεδομένα ωριαίων τιμών ταχύτητας. Σε περιπτώσεις που η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται απότομα ($>9\text{m/sec}$) για μικρό χρονικό διάστημα ($\sim 20\text{sec}$) τότε γίνεται λόγος για μια ριπή ανέμου. Αξίζει να αναφερθεί ότι για να θεωρηθεί μια περιοχή κατάλληλη για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας θα πρέπει η μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου (μετρούμενη 10m από το έδαφος της γης) να είναι μεγαλύτερη από 4 m/s. Στον παρακάτω εικόνα (Εικόνα 1.6) παρουσιάζεται μια κατανομή της μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου για τον ελληνικό χώρο όπου χαρακτηριστικά διαφαίνονται οι περιοχές με τη μεγαλύτερη μέση ετήσια ταχύτητα των ανέμων, οι οποίες δύναται να αξιοποιηθούν για την παραγωγή αιολικής ενέργειας, όπως τα νησιά του Αιγαίου και η Κρήτη.

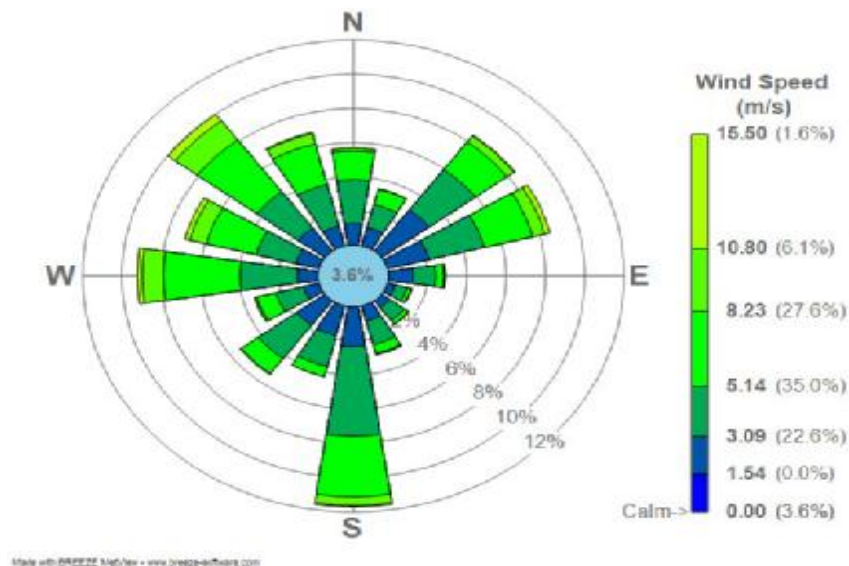


Εικόνα 1.6: Κατανομή της μέσης ετήσιας ταχύτητας του ανέμου στον ελληνικό χώρο.

Πηγή: Invonio (<http://medilab.pme.duth.gr/invonio>)

1.2.2. Διεύθυνση ανέμου

Η διεύθυνση του ανέμου ορίζεται ως το σημείο του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος σε σχέση με την θέση την οποία μετράμε και είναι ένα μέγεθος το οποίο μεταβάλλεται συνεχώς “ταλαντωμένο” γύρω από μια μέση θέση. Το μέγεθος αυτό παρουσιάζει μικρότερες διακυμάνσεις σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου και μετριέται σε μοίρες έχοντας ως σημείο αναφοράς τον πραγματικό Βορρά. Επιπροσθέτως είναι δυνατή η απεικόνισή του με ροδογράμματα που δίνουν άμεσα πληροφορίες για τη διεύθυνση του ανέμου, για τη μέση ταχύτητά του όσο και για τη διάρκεια της πνοής του ανέμου σε κάθε διεύθυνση (Εικόνα 1.7). Οι ακτινικές γραμμές του ροδογράμματος παρουσιάζουν τη μέση ταχύτητα του ανέμου, ενώ πάνω σε κάθε ακτινική γραμμή αναγράφεται η εκατοστιαία συχνότητα πνοής με την τιμή της νηνεμίας να εμφανίζεται στο κέντρο του ροδογράμματος.



Εικόνα 1.7: Ροδόγραμμα για τη διεύθυνση του ανέμου.

Πηγή: Wind rose (https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_rose)

1.2.3. Ανατάραξη και στροβιλισμός του αέρα

Για την υλοποίηση της εκτίμησης της αιολικής πυκνότητας λαμβάνονται υπόψιν οι χάρτες ανέμου μιας περιοχής, οι οποίοι αποτυπώνουν τις ετήσιες τιμές της μέσης ταχύτητας του ανέμου και έχουν δημιουργηθεί βάσει μετεωρολογικών δεδομένων αρκετών ετών. Οι χάρτες αυτοί είναι ιδιαίτερα σημαντικοί καθώς αποδίδουν τη διακύμανση της αιολικής ενέργειας, η οποία μεταβάλλεται τόσο γεωγραφικά όσο και εποχιακά. Έχει εκτιμηθεί ότι η ετήσια πυκνότητα της αιολικής ισχύος είναι δυνατό να αποκλίνει έως και 13% από χρόνο σε χρόνο, κάτι το οποίο σχετίζεται με την κυβική σχέση της ταχύτητας του ανέμου και της διαθέσιμης αιολικής ισχύος. Πέραν όμως

των συγκεκριμένων μεταβολών έχει παρατηρηθεί ότι ακόμα και στην ίδια περιοχή απαντάται μεγάλη ποικιλία στη συμπεριφορά του ανέμου η οποία οφείλεται στη γεωγραφία της περιοχής, στο μέγεθος της υδάτινης και εδαφικής της επιφάνειας, στην τοπογραφία και στη βλάστηση της. Σε τέτοιες περιπτώσεις γίνεται αναφορά σε ένα άλλο μέγεθος αυτό της διασποράς τύρβης (ένταση), δηλαδή της διακύμανσης της ταχύτητας του αέρα γύρω από την μέση τιμή σε συνδυασμό με τη διασπορά της. Η ένταση (I) της τύρβης ή αλλιώς ένταση ανατάραξης ορίζεται ως:

$$I = \frac{\sigma_V}{V} \quad (1.2-4)$$

Η ένταση της ανατάραξης παίρνει τιμές από 5% έως 20% και εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους. Αποτελεί ένα από τα βασικά μεγέθη που λαμβάνονται υπόψη στην εγκατάσταση των αιολικών μηχανών, αφού επιδρά στην συλλεγόμενη ισχύ και στη γενικότερη εγκατάσταση του συστήματος (καταπόνηση κυρίως των πτερυγίων) μέσω των έντονων και ξαφνικών διακυμάνσεων της ταχύτητας του ανέμου. Επιπλέον, η ανατάραξη του αέρα συντελεί στην δημιουργία τυχαίων στροβιλισμών του αέρα εξαιτίας της ύπαρξης διαφόρων χαρακτηριστικών της επιφάνειας του εδάφους (εδαφικές ανωμαλίες, κτίρια, δέντρα, κ.α.). Τα εμπόδια που απαντώνται είναι δυνατόν να συμβάλουν στη γένεση οργανωμένων στροβίλων, οι οποίοι Οι οργανωμένοι στρόβιλοι επηρεάζουν την εγκατάσταση του συστήματος μιας αιολικής μηχανής.

1.2.4. Κατανομή του ανέμου

Έχει ήδη αναφερθεί ότι η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται γεωγραφικά και επηρεάζεται από τα τοπικά εμπόδια, ωστόσο παρατηρείται και μια μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου ανάλογα με το ύψος. Αναλυτικότερα, η ταχύτητα του ανέμου στην επιφάνεια του εδάφους ορίζεται ως μηδενική εξαιτίας της τριβής του αέρα με την επιφάνεια, ενώ αυξάνεται με το ύψος πλησιέστερα προς την επιφάνεια του εδάφους. Η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους καθορίζει το "προφίλ της ταχύτητας του ανέμου" και εκφράζεται με διάφορες συναρτήσεις, κυριότερες εκ των οποίων είναι η εκθετική και η λογαριθμική συνάρτηση.

Εκθετική Συνάρτηση

$$V_{(z)} = V_r * \left(\frac{z}{z_r}\right)^a \quad (1.2-5)$$

Όπου,

z: το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους

V_r : η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος z_r πάνω από την επιφάνεια του εδάφους

$V_{(z)}$: η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z

a: εκθέτης που εξαρτάται από τη μορφολογία (ανάγλυφο) του εδάφους.

Λογαριθμική Συνάρτηση

$$\frac{V(z)}{V_{(10)}} = \frac{\ln(\frac{z}{z_0})}{\ln(\frac{10}{z_0})} \quad (1.2-6)$$

Όπου,

$V_{(10)}$: η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10 m από την επιφάνεια του εδάφους

z_0 : το μήκος της ανωμαλίας του εδάφους

Οι παράμετροι a και z_0 για διαφορετικούς τύπους εδαφών δίδονται στον Πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.2: Παράμετροι για τον υπολογισμό κατακόρυφου προφίλ ταχύτητας ανέμου

Τύπος εδάφους	Κατάταξη ανωμαλίας του εδάφους	Μήκος ανωμαλίας εδάφους, z_0	Εκθέτης a
Υδάτινες περιοχές	0	0,001	0,01
Ανοιχτός χώρος, λίγα εμπόδια	1	0,12	0,12
Αγροτική περιοχή με κτήρια και αχυρώνες	2	0,005	0,16
Αγροτική περιοχή με πολλά δένδρα, δάση, χωριά	3	0,3	0,28

Γενικότερα η κατανομή του ανέμου ακολουθεί την κατανομή Weibull (Εικόνα 1.8), η οποία προγράφει ικανοποιητικά τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά στις περιοχές της εύκρατης ζώνης αλλά και περιοχών με ύψος μέχρι 100m από το έδαφος, συνεισφέροντας στην εκτίμηση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής. Η κατανομή Weibull ορίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

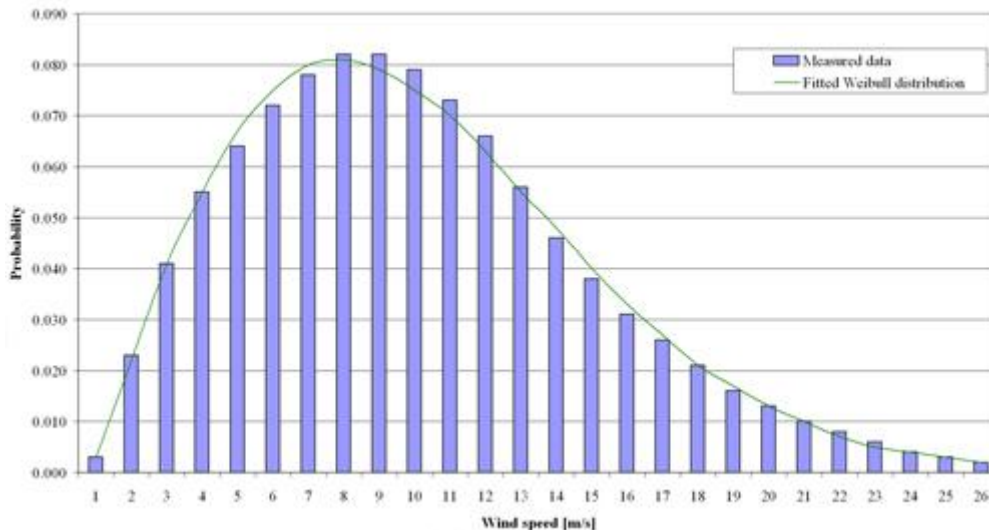
$$p_V = \frac{k}{c} * \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{V}{c}\right)^k} \quad (1.2-7)$$

Όπου,

p_V : η συχνότητα συμβάντος μιας ταχύτητας ανέμου V

C: παράμετρος κλίμακας

k: μορφολογική παράμετρος



Εικόνα 1.8: Ιστόγραμμα και συνάρτηση Weibull.

Πηγή: Wind energy the facts (<https://www.wind-energy-the-facts.org>)

Το ιστόγραμμα της συγκεκριμένης συνάρτησης κατασκευάζεται από μετρήσεις που ελήφθησαν στη διάρκεια πολλών ετών και παρουσιάζει την πιθανότητα ή το κλάσμα του χρόνου όπου η ταχύτητα του ανέμου βρίσκεται εντός του γραμμικού διαστήματος που δίνεται από το πλάτος κάθε στήλης. Τα δεδομένα έχουν μετρηθεί σε θύλακες του 1 m/s, δηλαδή 4,5 – 5,5 και 5,5 – 6,5 m/s, κλπ. και το άθροισμα του ύψους των στηλών είναι 1 ή 100%.

Στη συνέχεια για τον υπολογισμό της αιολικής ισχύος δεν λαμβάνεται υπόψη η μέση ταχύτητα αλλά πολλαπλασιάζεται κάθε πιθανότητα μιας ορισμένης ταχύτητας ανέμου (από την Weibull) με την ισχύ που παράγεται σε αυτή η ταχύτητα, σχηματίζοντας έτσι μια θεωρητική κατανομή της αιολικής ισχύος για κάθε ταχύτητα. Μια ανεμογεννήτρια δεν παραλαμβάνει όλη την ισχύ καθώς η κινητική ενέργεια στην έξοδο θα ήταν μηδενική. Επιπλέον έχει αποδειχτεί ότι μια ιδανική ανεμογεννήτρια θα πρέπει να μειώσει την αρχική ταχύτητα του αέρα κατά τα 2/3 της.

1.2.5. Η ενέργεια του ανέμου

Η ισχύς ή ενέργεια ανά μονάδα χρόνου είναι επίσης γνωστή και ως ροή ενέργεια ή πυκνότητα ισχύος του αέρα και δίνεται ως εξής:

$$W = (\rho AV) * \frac{1}{2} V = \frac{1}{2} (\rho AV)^3 \quad (1.2-8)$$

Όπου,

ρ : η πυκνότητα του αέρα σε (kg/m³)

V: η ταχύτητα του ανέμου σε (m/s)

W: η ισχύς σε (Watts ή Joules/ s)

Το όριο Betz

Το όριο Betz (1919) ισχύει για όλους τους τύπους των αεροκινητήρων, αποδεικνύοντας ότι μόνο ένα μέρος της συνολικής ισχύς W του αερίου ρεύματος μπορεί να μετατραπεί σε χρήσιμη ενέργεια από μια ανεμογεννήτρια. Πιο συγκεκριμένα, η διαθέσιμη ισχύς για μια ανεμογεννήτρια ισούται με τη μεταβολή της κινητικής ενέργειας του αέρα που περνά μέσα από το κινητό πλαίσιο (δρομέας με πτερύγια), της ανεμογεννήτριας με τη μέγιστη απόδοση της να είναι ανάλογη της μέγιστης διαφοράς της ταχύτητας του αέρα που προσπίπτει στο δρομέα του ανεμοκινητήρα σε σχέση με την ταχύτητα εξόδου του αέρα από το θάλαμο, η οποία δεν πρέπει να είναι μηδενική. Έχει αποδειχθεί ότι προκύπτουσα μέγιστη τιμή του συντελεστή απόδοσης C_p είναι 59% με τις απώλειες απόδοσης να σχετίζονται με την τριβή των μορίων του αέρα με τα πτερύγια του δρομέα, τον στροβιλισμό του αέρα στο δρομέα, τις απώλειες ισχύς στο μηχανικό στο ηλεκτρικό σύστημα μετάδοσης κίνησης.

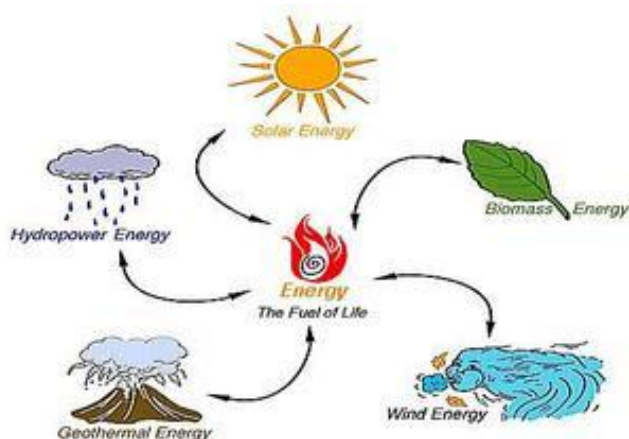
Κεφάλαιο 2: Περιβάλλον και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.)

2.1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.)

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ή ήπιες μορφές ενέργειας αποτελούν μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας, προερχόμενες από διάφορες φυσικές διεργασίες οι οποίες θεωρούνται πρακτικά ανεξάντλητες αφού τα αποθέματά τους ανανεώνονται φυσικά (Εικόνα 2.1). Οι περισσότερες από αυτές στηρίζονται στην ηλιακή ακτινοβολία, ενώ εξαιρέσεις αποτελούν η γεωθερμική ενέργεια (δεν θεωρείται ανανεώσιμη) ως ροή ενέργειας από το εσωτερικό του φλοιού της γης και η ενέργεια από τις παλίρροιες. Τα κυριότερα είδη Α.Π.Ε. είναι :

- Αιολική ενέργεια
- Ηλιακή ενέργεια
- Υδραυλική ενέργεια: αξιοποιεί τις υδατοπτώσεις
- Βιομάζα: αποτελεί αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, που μετασχηματίζει την ηλιακή ενέργεια με μία σειρά διεργασιών των φυτικών οργανισμών χερσαίας ή υδρόβιας προέλευσης.
- Γεωθερμική ενέργεια: η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης.

- ο Αστικά Απορρίμματα: μορφή ενέργεια που παράγεται μέσω καύσης την φυσική αποσύνθεσή των απορριμμάτων.
- ο Ενέργεια από θαλάσσια κύματα: εκμεταλλεύεται την δυναμική ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων.

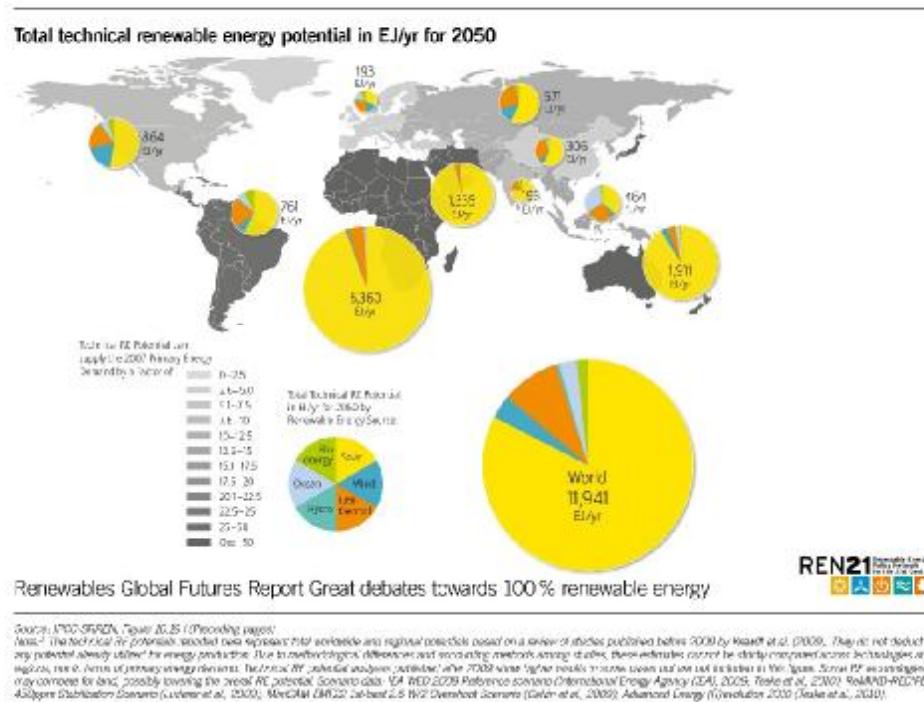


Εικόνα 2.1: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

Πηγή: Renewable Energy (<https://reich-chemistry.wikispaces.com>)

Οι ΑΠΕ απασχολούν ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια την ανθρωπότητα και ολόένα και περισσότερες χώρες παγκοσμίως στοχεύουν στην παραγωγή ενέργειας μέσω της υιοθέτησης φιλικών προς το περιβάλλον πρακτικών. Το ενδιαφέρον για τις ήπιες μορφές ενέργειας εντάθηκε κατά τη δεκαετία του 1970 ως αποτέλεσμα της πετρελαϊκής κρίσης του 1973 η οποία υπογράμμισε σε διεθνές επίπεδο ότι τα αποθέματα του πετρελαίου είναι πεπερασμένα και περιορισμένα, οδηγώντας τις βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες να αναθεωρήσουν την πολιτική τους όσον αφορά την εξάρτησή τους από τα ορυκτά καύσιμα. Παράλληλα, ένα δεύτερο στοιχείο που κατέστησε επιτακτική την ανάγκη ανάπτυξης των ηπίων μορφών ενέργειας ήταν η εμφάνιση του φαινομένου του θερμοκηπίου το οποίο συμβάλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη, την αλλοίωση του περιβάλλοντος και της ποιότητας ζωής και οφείλεται στην παραγωγή, το μετασχηματισμό και τη χρήση των συμβατικών καυσίμων. Αρχικά οι εγκαταστάσεις των Α.Π.Ε. αποτελούσαν πειραματικές εφαρμογές με ιδιαίτερα υψηλό κόστος, ωστόσο η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για ενέργεια συντέλεσε στην συνεχή βελτίωση των εφαρμοζόμενων τεχνολογιών και τη μείωση του κόστους παραγωγής του τελικού προϊόντος. Σήμερα 58 χώρες έχουν θέσει στόχους για την χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό τους ισοζύγιο συμπεριλαμβανομένων και αναπτυσσόμενων χωρών αλλά και πολιτειών/περιφερειών των ΗΠΑ και του Καναδά. Η Ευρώπη αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης των ΑΠΕ εξάγοντας περισσότερο του 35% του παγκόσμιου δυναμικού ενέργειας από ήπιες μορφές. Στο παρακάτω σχήμα

αποτυπώνονται οι στόχοι των χωρών όσον αφορά τη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο για το έτος 2050 (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2: Συνολικό δυναμικό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για το έτος 2050.

Πηγή: Renewable Energy (<http://www.ren21.net>)

2.2. Παρουσίαση πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων των ΑΠΕ και της αιολικής ενέργειας

Πλεονεκτήματα των ΑΠΕ

Τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης ΑΠΕ αφορούν κυρίως θέματα που σχετίζονται άμεσα με το περιβάλλον. Ειδικότερα, είναι φιλικές προς το περιβάλλον, έχοντας μηδενικά απόβλητα ενώ παράλληλα είναι ανεξάντλητες, συνεισφέροντας στον περιορισμό του φαινομένου του θερμοκηπίου. Συμβάλουν στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικούς, μη ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους, ενισχύοντας την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού. Επιπλέον, βοηθούν την ενεργειακή αυτάρκεια μικρών και αναπτυσσόμενων χωρών αποτελώντας σημαντική εναλλακτική λύση και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, εξαιτίας της γεωγραφικής τους διασποράς. Είναι ευέλικτες εφαρμογές, οι οποίες δύναται να παράγουν ενέργεια ανάλογη με τις ανάγκες του πληθυσμού και έχουν εξοπλισμό με μεγάλο χρόνο ζωής και χαμηλό λειτουργικό κόστος.

Μειονεκτήματα των ΑΠΕ

Πέραν όμως των πλεονεκτημάτων, οι ΑΠΕ παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα. Εξαιτίας του μικρού συντελεστή απόδοσης (~30%) που παρουσιάζουν, απαιτείται η εφαρμογή τους σε μεγάλη επιφάνεια, αυξάνοντας έτσι το κόστος. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται μέχρι τώρα ως συμπληρωματικές πηγές ενέργειας, ενώ δεν μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές ανάγκες των μεγάλων αστικών κέντρων. Ακόμη, η παροχή και η απόδοση τους εξαρτώνται άμεσα από την εποχή του έτους, το κλίμα της περιοχής εγκατάστασης και το γεωγραφικό πλάτος, ενώ δύσκολη είναι η διαδικασία εύρεσης των κατάλληλων περιοχών για την εγκατάσταση. Τέλος αρκετές από τις εγκαταστάσεις των ΑΠΕ προκαλούν οπτική ρύπανση και θόρυβο.

Πλεονεκτήματα της αιολικής ενέργειας

Πιο συγκεκριμένα όσον αφορά την αιολική ενέργεια, τα τελευταία χρόνια παρουσιάζει μια σημαντική ανάπτυξη σε διεθνές επίπεδο εξαιτίας των πλεονεκτημάτων της. Η αιολική ενέργεια είναι απόλυτα ανανεώσιμη, φιλική προς το περιβάλλον μειώνοντας παράλληλα τη κατανάλωση των ορυκτών καυσίμων, πρακτικά ανεξάντλητη και οικονομικά συμφέρουσα τόσο γιατί η πρώτη ύλη διατίθεται δωρεάν από το περιβάλλον όσο και γιατί με την εξέλιξη της τεχνολογίας στο χρόνο το κόστος εγκατάστασης γίνεται συγκρίσιμο με αυτό των συμβατικών μορφών. Επιπλέον, παρέχει αυτονομία σε εθνικό και ατομικό επίπεδο και δημιουργεί θέσεις εργασίας για χιλιάδες ανθρώπους.

Μειονεκτήματα της αιολικής ενέργειας

Από την άλλη πλευρά το μεγαλύτερο πρόβλημα της αιολικής ενέργειας είναι ότι παρουσιάζει μια ασταθή και διακοπτόμενη παραγωγή ρεύματος λόγω της απρόβλεπτης αλλαγής της ταχύτητας του αέρα, η οποία δημιουργεί μεγάλες διακυμάνσεις στην τιμή της παραγόμενης ισχύος και μεγάλα προβλήματα και στη σταθερότητα της αιολικής εγκατάστασης. Ακόμη, η αιολική ενέργεια χρησιμοποιείται κυρίως συμπληρωματικά καθώς δεν μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες των μεγάλων αστικών κέντρων λόγω του μεγάλου αρχικού κόστους για την εφαρμογή σε μεγάλη επιφάνεια. Εξίσου σημαντικό μειονέκτημα της αιολικής ενέργειας είναι ορισμένες περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις όπως η οπτική όχληση, η αλλοίωση του χαρακτήρα μιας περιοχής, ο θόρυβος και οι επιπτώσεις στα πτηνά που προκύπτουν από την εγκατάσταση των αιολικών μηχανών.

Κεφάλαιο 3: Περιγραφή ανεμογεννητριών και νεότερων εξελίξεών τους

3.1. Γενική αρχή λειτουργίας ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες είναι αιολικές μηχανές που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική ή δυναμική ενέργεια, αξιοποιώντας τις δυνάμεις της αντίστασης και της άνωσης, οι οποίες αναπτύσσονται στις αεροτομές των πτερυγίων (Εικόνα 3.1). Η δύναμη της αντίστασης ορίζεται ως η δύναμη που ασκείται σε ένα αντικείμενο από την ροή του αέρα και έχει την κατεύθυνση της ροής, ενώ η άνωση είναι η δύναμη που ασκείται από τον άνεμο στο αντικείμενο με κατεύθυνση κάθετη στη ροή του ανέμου. Ειδικότερα, ο άνεμος περιστρέφει τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας, τα οποία συνδέονται με ένα περιστρεφόμενο άξονα χαμηλής ταχύτητας περιστροφής που διαπερνάει ένα κιβώτιο μετάδοσης κίνησης στο οποίο αυξάνεται η ταχύτητα της περιστροφής. Εν συνεχεία το συγκεκριμένο κιβώτιο συνδέεται με έναν άξονα μεγαλύτερης ταχύτητας περιστροφής, κινώντας έτσι μια γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται σε έναν πύργο στήριξης με στόχο την βελτιστοποίηση της παραγωγής τους. Ο πύργος στήριξης έχει ένα ύψος που ξεκινάει από τα 30 μέτρα και φτάνει αρκετά μέτρα πάνω από το έδαφος εξασφαλίζοντας τη χρήση ομαλότερου και ταχύτερου ανέμου. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν περιοχές στις οποίες ανά 10 μέτρα ύψος μεταβάλλεται η ταχύτητα του ανέμου κατά 20%, αντιστοιχώντας σε μια μεταβολή της παραγόμενης ενέργειας της τάξεως του 34%. Σήμερα οι ανεμογεννήτριες είναι δυνατόν να παράγουν ενέργεια που κυμαίνεται από μερικά δεκάδες ή εκατοντάδες W μέχρι μερικά MW, ανάλογα με το αν αξιοποιούνται για τη διαμόρφωση αυτόνομων συστημάτων (μικρή ενεργειακή κάλυψη: σπίτι, αγρόκτημα κ.λπ.) ή συνδέονται στο δημόσιο δίκτυο(αιολικά πάρκα) για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών περισσότερων καταναλωτών. Ορισμένοι παράμετροι επηρεάζουν την παραγωγή ισχύος μιας ανεμογεννήτριας, όπως η ταχύτητα του ανέμου, η καμπύλη ισχύος της μηχανής, η διαθεσιμότητα της μηχανής, οι απώλειες μεταφοράς και ο βαθμός απόδοσης.

Στη διάρκεια του χρόνου αναπτύχθηκαν διάφοροι τύποι ανεμογεννητριών, οι οποίες διέφεραν ως προς την κατεύθυνση του άξονα περιστροφής και τον αριθμό των πτερυγίων. Ο μετεωρολόγος Poul La Cour (1846-1908) δραστηριοποιήθηκε στην αεροδυναμική και ήταν ο πρωτοπόρος στην κατασκευή των ανεμογεννητριών (1891) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία χρησιμοποιήθηκε για ηλεκτρόλυση με στόχο την παραγωγή υδρογόνου σε μια εγκατάσταση αερίου για τον φωτισμό των κτιρίων ενός σχολείου. Στη συνέχεια κατά τον Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο, η κατασκευαστική εταιρεία F.L.Smidth της Δανίας επιδόθηκε στην δημιουργία 65 ανεμογεννητριών με δύο και τρία πτερύγια, ενώ μία από τις πρώτες ανεμογεννήτριες τριών πτερυγίων της εγκαταστάθηκε στο νησί Bogy, στη Δανία το 1942, η οποία σε συνδυασμό με μία ντιζελογεννήτρια συνέβαλε στην ηλεκτροδότηση του νησιού. Το 1951 ο μηχανικός Johannes Juul, ο οποίος ήταν μαθητής του Poul La Cour ανέπτυξε την πρώτη ανεμογεννήτρια που μπορούσε να μετατρέψει το ρεύμα από συνεχές σε εναλλασσόμενο. Ο ίδιος μηχανικός το 1956-57 κατασκεύασε μια πρωτοποριακή μηχανή(200 KW), η οποία αποτέλεσε τη βάση ανάπτυξης των σύγχρονων

ανεμογεννητριών, για την εταιρεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην περιοχή Gedser στην νότια Δανία. Η μηχανή είχε περύγια, ηλεκτρομαγνητικά μεταβαλλόμενης κλίσης και περιελάμβανε μηχανισμό φρένου για την προστασία της μηχανής από τις υψηλές ταχύτητες του ανέμου. Έκτοτε, ο σχεδιασμός των έχει προοδεύσει σημαντικά στοχεύοντας στην βελτίωση των αποδόσεων.



Εικόνα 3.1: Αρχή λειτουργίας των ανεμογεννητριών.

Πηγή: Invonio (<http://medilab.pme.duth.gr/invonio>)

3.2. Είδη ανεμογεννητριών

Οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες ανάλογα με τη θέση του άξονα περιστροφής ως προς την Γη, στις ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα και σε αυτές κατακόρυφου άξονα. Οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (Εικόνα 3.2) έχουν άξονα παράλληλο προς την επιφάνεια της Γης και ως επί το πλείστον παράλληλο και με τη διεύθυνση του ανέμου. Επιπλέον, οι συγκεκριμένες ανεμογεννήτριες έχουν δύο ή τρία περύγια με μεγάλο αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης, ενώ στα μηχανικά τους μέρη περιλαμβάνονται: ο δρομέας ή φτερωτή, το σύστημα μετάδοσης κίνησης (κύριος άξονας, κιβώτιο ταχυτήτων), η γεννήτρια, ο πύργος στήριξης, το σύστημα πέδησης, το σύστημα προσανατολισμού και το σύστημα ελέγχου, σύνδεσης και αποθήκευσης (συσσωρευτές) της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 3.2: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα.

Πηγή: Invonio (<http://medilab.pme.duth.gr/invonio>)

Ειδικότερα, στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα στην κορυφή του πύργου είναι τοποθετημένα ο δρομέας (ρότορας) και η ηλεκτρογεννήτρια. Ο ρόλος του άξονα όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι η μετατροπή της γραμμικής κίνησης του ανέμου σε περιστροφική για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ όσον αφορά το δρομέα οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε σχέση με τη θέση του ως προς τον πύργο στήριξης και τη διεύθυνση του ανέμου. Έτσι οι ανεμογεννήτριες που έχουν το δρομέα μπροστά από τον πύργο στήριξης είναι τύπου up-wind (ρότορας με τη φτερωτή μπροστά) ενώ αυτές που έχουν το δρομέα πίσω από το πύργο είναι τύπου down-wind (ρότορας με τη φτερωτή πίσω). Ο πρώτος τύπος είναι σχεδιασμένος για να στρέφεται προς τον άνεμο με την αξιοποίηση ενός περυγίου στην ουρά και παράλληλα ένας άλλος μηχανισμός εξαναγκάζει το ρότορα να τεθεί εκτός ροής του ανέμου σε περιπτώσεις που η μηχανή βρίσκεται εκτός λειτουργίας ή επικρατούν πολύ ισχυροί άνεμοι. Από την άλλη πλευρά ο τύπος down-wind (ρότορας με τη φτερωτή πίσω) ο άνεμος διέρχεται πρώτα από το κάλυμμα και μετά από τη φτερωτή. Επιπλέον ο συγκεκριμένος τύπος δεν διαθέτει τη μεταλλική πλάκα (περυγίο) και γενικότερα

προτιμάται σε αιολικές μηχανές οι οποίες αξιοποιούνται για ισχυρούς ανέμους. Αξίζει να αναφερθεί ότι υλοποιήθηκαν μια σειρά ερευνητικών προγραμμάτων για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των πτερυγίων του ρότορα (το σχήμα της πτέρυγας, η γωνία που σχηματίζει με την σχετική διεύθυνση του ανέμου), ενώ η διάρκεια ζωής ενός ρότορα εξαρτάται άμεσα από τις μηχανικές ιδιότητες του, το σχεδιασμό του και τις περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες εκτίθεται. Ακόμη, οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα ανάλογα με την κατεύθυνση του προσπίπτοντος ανέμου, διακρίνονται σε ανάντη, η οποία έχει επικρατήσει και κατάντη. Σε ένα ευρύτερο πλαίσιο οι ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα έχουν επικρατήσει σε σχέση με αυτές κατακόρυφου άξονα λόγω των πλεονεκτημάτων τους. Αναλυτικότερα, έχουν τον άξονα περιστροφής του δρομέα τοποθετημένο οριζόντια και σχεδόν παράλληλα με την κατεύθυνση ροής του ανέμου παρουσιάζοντας υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή και καλύτερη απόδοση, εκμεταλλεύονται άνεμο μεγαλύτερης ταχύτητας λόγω του ύψους της ανεμογεννήτριας και έχουν εύκολη συναρμολόγηση. Ωστόσο η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων πρέπει να τοποθετηθούν στην κορυφή του πύργου, το οποίο κάνει το σχεδιασμό τους πιο σύνθετο και ακριβό και επίσης η συνεχής εκμετάλλευση του ανέμου απαιτεί την κατασκευή ενός μηχανισμού περιστροφής για τον προσανατολισμό των πτερυγίων στη διεύθυνση του ανέμου.

Όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (Εικόνα 3.3), ο ρότορας περιστρέφεται γύρω από ένα άξονα κάθετο προς τη διεύθυνση του ανέμου και είναι ανεπηρέαστες από την αλλαγή της διεύθυνσης του ανέμου. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα ανήκουν στους τύπους Savonius και του τύπου Darrieus και χρησιμοποιούνται κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς εξαιτίας της χαμηλής απόδοσής τους. Στα πλεονεκτήματα αυτών των ανεμογεννητριών περιλαμβάνονται η εκμετάλλευση ανέμου ανεξάρτητα από τη διεύθυνσή του, το οποίο συμβάλει στην απλοποίηση της κατασκευαστικής τους δομής και κατ'επέκτασιν στο μικρότερο βάρος και κόστος κατασκευής. Επιπλέον το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια είναι τοποθετημένα στο έδαφος κάνοντας πιο εύκολη τόσο την εγκατάστασή τους όσο και τη συντήρηση των μηχανικών τμημάτων τους. Αντίθετα, στα μειονεκτήματα εντοπίζονται η χαμηλή απόδοσή τους εξαιτίας του γεγονότος ότι ο δρομέας βρίσκεται πολύ κοντά στο έδαφος όπου οι ταχύτητες του ανέμου είναι χαμηλές, η έντονα ταλαντευόμενη αεροδυναμική της ισχύς από τη συνεχή αλλαγή του βήματος των πτερυγίων, η έλλειψη ροπής εκκίνησης η οποία απαιτεί εξωτερικό μηχανισμό και η δυσκολία συντήρησης ορισμένων μηχανικών τμημάτων.



Εικόνα 3.3: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα.

Πηγή: Invonio (<http://medilab.pme.duth.gr/invonio>)

Μια πιο σύγχρονη προσέγγιση όσον αφορά την ταξινόμηση των ανεμογεννητριών βασίζεται στην ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων τους. Έτσι οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε ταχύστροφες και σε αργόστροφες ανάλογα με την τιμή ενός αδιάστατου μεγέθους το οποίο καλείται παράμετρος περιστροφής ή λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου λ και ορίζεται ως:

$$\lambda = \frac{\omega * R}{V_w} \quad (3.2-1)$$

Όπου,

ω : η γωνιακή ταχύτητα του ρότορα (rad/s)

R : η ακτίνα του ρότορα (m)

V_w : η ταχύτητα του ανέμου (m/s)

Επιπροσθέτως, οι ανεμογεννήτριες ανάλογα με τη μηχανική ισχύ (N) που παρέχουν κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες: α)Μικρές ανεμογεννήτριες ($50W \leq N \leq 10kW$),

β) Μεσαίες ανεμογεννήτριες ($10\text{kW} \leq N \leq 200\text{kW}$) και γ) Μεγάλες ανεμογεννήτριες ($200\text{kW} \leq N$). Ο τύπος των πτερυγίων μιας ανεμογεννήτριας και ο τρόπος ελέγχου της γωνίας τους συνιστούν άλλο ένα κριτήριο ταξινόμησης δημιουργώντας τις εξής κατηγορίες:

Ø Ανεμογεννήτριες με έλεγχο του βήματος των πτερυγίων (pitch control)

Ανεμογεννήτρια με πτερύγια που έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται κατά το διαμήκη άξονά τους, μεταβάλλοντας το βήμα της έλικας δηλαδή τη γωνία (β) πρόσπτωσης που σχηματίζεται μεταξύ της χορδής της αεροτομής και της κατεύθυνσης της κίνησης (pitch angle) και ελέγχοντας τη γωνία πρόσπτωσης του ανέμου και κατ' επέκτασιν την ασκούμενη ροπή. Αναλυτικότερα, σε περίπτωση που η ανεμογεννήτρια λειτουργεί με άνεμο που ξεπερνά τα κατασκευαστικά της όρια, τότε τα πτερύγια στρέφονται σε κατάλληλη γωνία μέσω ενός συστήματος ελέγχου, εξασφαλίζοντας ότι δε θα αναπτυχθεί ροπή μεγαλύτερη της επιτρεπόμενης. Το συγκεκριμένο σύστημα (pitch control) συνεισφέρει στην ανάπτυξη χαμηλότερων φορτίων στα πτερύγια και στο δομικό σύστημα της ανεμογεννήτριας, περιορίζοντας την αεροδυναμική ισχύς χωρίς ωστόσο να διακόπτεται η λειτουργία της και επίσης συμβάλει στην καλύτερη απόδοση σε συνθήκες χαμηλού ανέμου. Στα βασικά μειονεκτήματα του συστήματος ανήκουν η αυξημένη πολυπλοκότητά του και η καταπόνηση των πτερυγίων λόγω αδρανειακής φόρτισης.

Ø Ανεμογεννήτριες με παθητικό αεροδυναμικό έλεγχο (passive stall control)

Ανεμογεννήτριες με αεροδυναμικό έλεγχο της ροής και ισχύος του δρομέα (passive stall control), χωρίς έλεγχο βήματος, οι οποίες διαθέτουν πτερύγια σταθερής κλίσης που σε συνθήκες υψηλών ταχυτήτων ανέμου παρουσιάζουν απώλεια αεροδυναμικής στήριξης. Πιο συγκεκριμένα, στη διάρκεια τέτοιων συνθηκών η ανυψωτική δύναμη σταματά να αυξάνεται, περιορίζοντας έτσι την αναπτυσσόμενη ροπή και την παραγόμενη ενέργεια και αποφεύγοντας τη φόρτιση της ανεμογεννήτριας πέρα από τα κατασκευαστικά όριά της. Το σύστημα είναι κατασκευαστικά απλό, έχει χαμηλό κόστος και δε χρειάζεται συντήρηση, ωστόσο στο δρομέα και στο δομικό σύστημα αναπτύσσονται υψηλά φορτία και παράλληλα παράγεται λιγότερη ισχύς σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου.

Ø Ανεμογεννήτριες με ενεργό αεροδυναμικό έλεγχο (active stall control)

Πρόκειται για ανεμογεννήτριες 1 MW ή και μεγαλύτερες με ενεργό έλεγχο του βήματος των πτερυγίων (active stall). Η διαφορά αυτού του συστήματος με τον κλασικό έλεγχο του βήματος των πτερυγίων έγκειται στο γεγονός ότι σε περιπτώσεις που η ταχύτητα του ανέμου ξεπερνάει τα κατασκευαστικά όρια της ανεμογεννήτριας, η γωνία pitch μεταβάλλεται αντίθετα (negative pitch control), μετατρέποντας το φαινόμενο stall (stall effect) σε πιο έντονο το φαινόμενο και

διακόπτοντας έτσι την περίσσεια αεροδυναμικής ισχύος. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου εντοπίζονται η καλύτερη απόδοση, ο έλεγχος με μεγαλύτερη ακρίβεια της ισχύος εξόδου της γεννήτριας, η ελαχιστοποίηση της καταπόνησης του συστήματος, η απόδοση της μέγιστης ισχύος σε όλες τις υψηλές ταχύτητες ανέμου και η ευκολότερη εκκίνηση και αποσύνδεση.

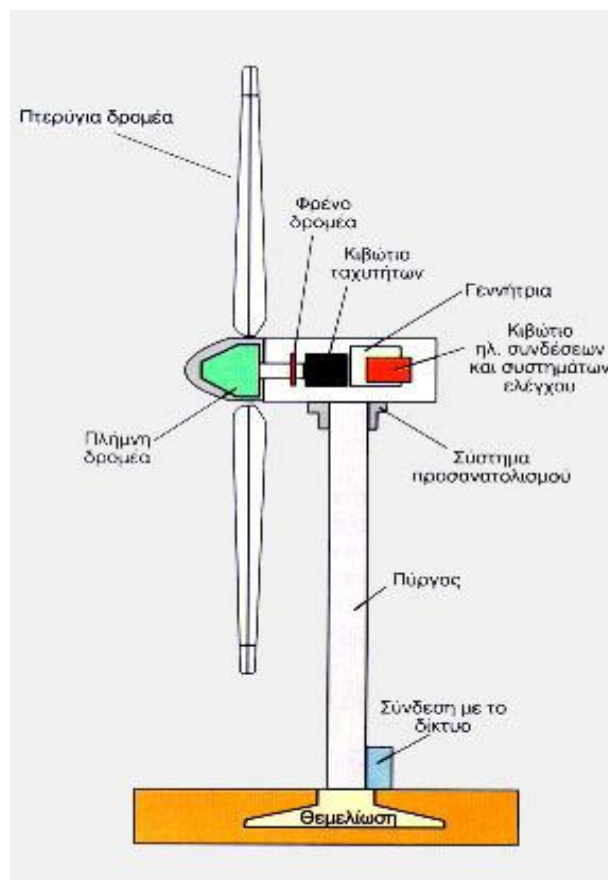
3.3. Γενική διάταξη – Δομή ανεμογεννήτριας

Η γενική διάταξη μιας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα περιστροφής (Εικόνα 3.4),(Εικόνα 3.5) περιλαμβάνει:

- Άτρακτος: βρίσκεται στην κορυφή του πύργου και περιέχει όλα τα βασικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας καθώς επίσης και το κιβώτιο ταχυτήτων και την ηλεκτρική γεννήτρια.
- Πτερύγια: συλλέγουν τον άνεμο και μεταφέρουν την ισχύ του στην κεφαλή του ρότορα. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες 1000kW έχουν πτερύγια με μήκος 27 m.
- Κεφαλή: Η κεφαλή του ρότορα είναι συνδεδεμένη με το διαφορικό χαμηλής ταχύτητας της ανεμογεννήτριας.
- Διαφορικό χαμηλών ταχυτήτων: συνδέει την κεφαλή του ρότορα με το κιβώτιο ταχυτήτων και περιέχει σωλήνες για το υδραυλικό σύστημα ώστε να είναι σε θέση να λειτουργήσει το αεροδυναμικό φρένο.
- Κιβώτιο ταχυτήτων: μεταφέρει την κίνηση στο διαφορικό υψηλών στροφών, κάνοντας το να περιστρέφεται με ταχύτητα 50 φορές μεγαλύτερη από αυτή του διαφορικού χαμηλών στροφών. Εξαιτίας του υψηλού κόστους του γίνεται έρευνα για την ανάπτυξη ανεμογεννητριών «άμεσης ώθησης» (“directdrive”) οι οποίες λειτουργούν σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής και δεν χρειάζονται κιβώτιο ταχυτήτων.
- Διαφορικό υψηλών ταχυτήτων: περιστρέφεται περίπου με 1500 στροφές ανά λεπτό (rpm) και είναι εξοπλισμένο με ένα δισκόφρενο και ένα μηχανικό φρένο, το οποίο χρησιμοποιείται σε περίπτωση που το αεροδυναμικό φρένο υποστεί βλάβη ή η ανεμογεννήτρια επισκευάζεται.
- Ηλεκτρική γεννήτρια: είναι μια σύγχρονη ή μια ασύγχρονη γεννήτρια.
- Μηχανισμός περιστροφής: χρησιμοποιεί ηλεκτρικές μηχανές (κινητήρας περιστροφής) για την περιστροφή της ατράκτου, ενώ ελέγχεται από ηλεκτρονικό ελεγκτή ο οποίος λειτουργεί με τη βοήθεια του ανεμοδείκτη.
- Ηλεκτρονικός ελεγκτής: παρακολουθεί διαρκώς την κατάσταση της ανεμογεννήτριας μέσω υπολογιστή και ελέγχει τον μηχανισμό περιστροφής.
- Ανεμόμετρο & ανεμοδείκτης: μετρούν την ένταση και τη διεύθυνση του ανέμου. Τα ηλεκτρικά σήματα του ανεμόμετρου αξιοποιούνται από τον ηλεκτρονικό ελεγκτή της ανεμογεννήτριας για να αρχίσει την λειτουργία της όταν η ταχύτητα του ανέμου ξεπεράσει μια ελάχιστη τιμή είτε για να

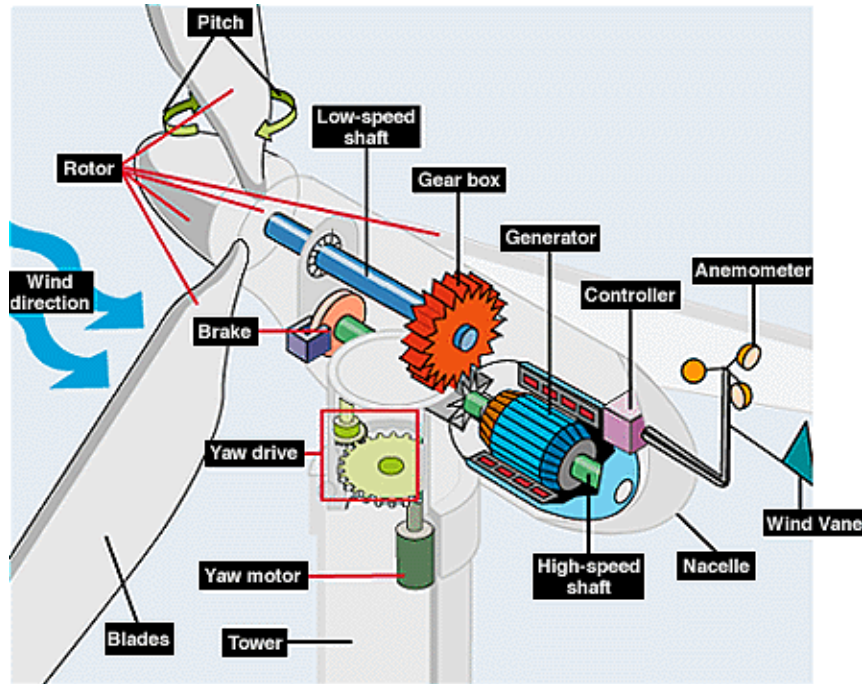
σταματήσει η λειτουργία της ανεμογεννήτριας όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβεί ένα ανώτατο όριο.

- Πύργος: στηρίζει την άτρακτο και τα κινούμενα μέρη της. Ο πύργος τείνει να είναι ψηλός καθώς όσο απομακρύνεται από το έδαφος αυξάνονται οι ταχύτητες του ανέμου.
- Μονάδα ψύξης: ψύχει την ηλεκτρική γεννήτρια μέσω ενός ηλεκτρικού ανεμιστήρα και περιέχει μια μονάδα ψύξης με λάδι η οποία χρησιμοποιείται για να ψύχει το λάδι στο κιβώτιο ταχυτήτων. Σε ορισμένες ανεμογεννήτριες έχουν τοποθετηθεί υδρόψυκτες γεννήτριες.
- Υδραυλικό σύστημα: επαναφέρει τα αεροδυναμικά φρένα της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 3.4: Διαμήκης τομή μιας τυπικής ανεμογεννήτριας.

Πηγή: ΚΑΠΕ (<http://www.cres.gr/kape/>)



Εικόνα 3.5: Βασικά δομικά στοιχεία μιας ανεμογεννήτριας.

Πηγή: Ανεμογεννήτρια, wikipedia (<https://el.wikipedia.org>)

Οι ανεμογεννήτριες προσδιορίζονται με τη βοήθεια των παρακάτω παραμέτρων:

- Ύψος ατράκτου: αποτελεί το ύψος του άξονα περιστροφής της έλικας πάνω από την επιφάνεια του εδάφους.
- Επιφάνεια σαρώσεως: είναι η επιφάνεια που καλύπτει η περιστρεφόμενη έλικα και σαρώνεται από τον άνεμο (επιφάνεια κύκλου).
- Στερεότητα: ορίζεται ως ο λόγος του αθροίσματος της επιφάνειας κάθε πτερυγίου της έλικας προς την επιφάνεια σαρώσεως.
- Λόγος ταχύτητας ακραίου σημείου: ορίζεται ως ο λόγος της ταχύτητας του άκρου του πτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου.
- Εκτιμητέα ισχύς: αποτελεί τη μέγιστη συνεχή ισχύ εξόδου στο σημείο ηλεκτρικής σύνδεσης.

Στη συνέχεια περιγράφονται λεπτομερέστερα ορισμένα από τα βασικά εξαρτήματα μιας ανεμογεννήτριας ηλεκτροπαραγωγής.

Πύργος στήριξης

Ο πύργος στήριξης αποτελεί ουσιαστικά τον κορμό όλης της κατασκευής αφού στηρίζει επάνω του την άτρακτο και το ρότορα. Οι πύργοι είναι συνήθως χαλύβδινοι σωληνοειδείς είτε δικτυωτοί. Οι χαλύβδινοι σωληνοειδείς είναι κωνικοί, με τη διάμετρό τους δηλαδή να αυξάνεται προς τη βάση για λόγους ευστάθειας και αποτελούν τον τύπο που απαντάται συχνότερα στις ανεμογεννήτριες. Ο δεύτερος τύπος κατασκευάζεται με χαλύβδινα δικτυώματα και ενώ παρουσιάζει χαμηλότερο

κόστος για αισθητικούς λόγους τείνει να εκλείψει. Η θεμελίωση του πύργου πραγματοποιείται με οπλισμένο σκυρόδεμα, στο οποίο σταθεροποιείται με κοχλίες και στο εσωτερικό του πύργου υπάρχουν καλώδια μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, καλώδια γείωσης της κατασκευής, σκάλες και ανελκυστήρες για το προσωπικό που τον συντηρεί (Εικόνα 3.6). Τα τυπικά ύψη των πύργων είναι 60-80 μέτρα και πρέπει να είναι κατάλληλα ώστε ο αέρας που προσπίπτει στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας να έχει ομαλή ροή για να μειώνεται στο ελάχιστο ο θόρυβος.



Εικόνα 3.6: Εσωτερική άποψη του πύργου της ανεμογεννήτριας.

Πηγή: Ανεμογεννήτρια, wikipedia (<https://el.wikipedia.org>)

Άτρακτος ανεμογεννήτριας (Nacelle)

Η άτρακτος μιας αιολικής μηχανής (Εικόνα 3.5) τοποθετείται επάνω από τον πύργο και συνδέεται με το ρότορα. Περιλαμβάνει ουσιαστικά όλο τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό (το κιβώτιο ταχυτήτων, την γεννήτρια, κύριο πλαίσιο κ.λπ.) και το υλικό κατασκευής είναι από ανθρακονήματα (fiberglass) ώστε τα εσωτερικά στοιχεία να είναι προστατευμένα από το περιβάλλον.

Δρομέας (Ρότορας)

Ένας ρότορας αποτελείται από την πλήμνη στην οποία εδράζονται τα πτερύγια γι' αυτό και αποτελεί πολύ σημαντικό μέρος της ανεμογεννήτριας. Ο αριθμός των οπών της πλήμνης συνδέεται άμεσα με το πόσα πτερύγια θα περιλαμβάνει η αιολική μηχανή.

Πτερύγια (Blades)

Οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται σήμερα έχουν ως επί το πλείστον δύο ή τρία πτερύγια με μια ταχύτητα άκρου πτερυγίου 50 έως 70 m/s, αποδίδοντας έτσι την βέλτιστη απόδοση. Το υλικό κατασκευής των πτερυγίων είναι συνήθως ενισχυμένος πολυεστέρας ή ανθρακονήματα, επειδή σαν υλικά έχουν μικρό βάρος και σημαντική αντοχή. Παρουσιάζουν αεροδυναμικό σχήμα και μπορεί να είναι ενιαία ή να διαθέτουν ακροπτερύγια. Ειδικότερα, η αεροτομή του πτερυγίου πρέπει να αφήνει κατάλληλο χώρο για την εσωτερική κατασκευή του, η οποία θα ανθίσταται στα φορτία κόπωσης που αναπτύσσει το πτερύγιο (Εικόνα 3.7). Η αεροτομή του πτερυγίου παρουσιάζει αυξημένη ανύψωση κοντά στη ρίζα, η οποία μειώνεται βαθμιαία προς το άκρο του πτερυγίου. Τα σύγχρονα πτερύγια έχουν ρίζα κυκλικής διατομής, η οποία μεταβάλλεται κατά μήκος σε παχύτερη με την ακτίνα στα άκρα να είναι 20 με 30 % της αρχικής διατομής. Επιπλέον στο άκρο του πτερυγίου η αεροτομή σμικρύνεται και περιστρέφεται, ώστε να αξιοποιείται η μεγαλύτερη δυνατή ενέργεια από τον άνεμο.

Η επιλογή ενός πτερυγίου που θα συμβάλει στην βέλτιστη απόδοση μιας μηχανής βασίζεται στις εξής παραμέτρους: α) μεγάλη τιμή λόγου άνωσης (L) προς αντίσταση (D) [L/D] για απόδοση ευρείας κλίμακας, β) καλά χαρακτηριστικά πέδησης, γ) αντοχή στις δύσκολες καιρικές συνθήκες και δ) χαμηλή παραγωγή θορύβου. Επιπλέον, ο υπολογισμός των πτερυγίων λαμβάνει χώρα σε δύο τμήματα:

I. Αεροδυναμική αξιολόγηση

Σε αυτό το στάδιο υλοποιείται ανάλυση αεροδυναμικής επίδοσης με τη χρήση ειδικών λογισμικών, τα οποία χρησιμοποιούν θεωρητικές βάσεις δεδομένων των πτερυγίων και τα αποτελέσματά τους παρουσιάζουν τη συνολική επίδοση της υπό-κατασκευή ανεμογεννήτριας σε σχέση με την ταχύτητα του ανέμου, αλλά και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πτερυγίων.

II. Αξιολόγηση και υπολογισμός υλικού/κατασκευής

Σε επόμενο βήμα υπολογίζεται κατά προσέγγιση η κατανομή της δύναμης κατά μήκος του πτερυγίου με τη βοήθεια της δύναμης και της ταχύτητας περιστροφής.

Το τελικό αποτέλεσμα, δηλαδή τα σημεία καταπόνησης των πτερυγίων προκύπτει από μια ανάλυση με τη βοήθεια λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων.



Εικόνα 3.7: Πτερύγια ανεμογεννήτριας με μήκος περίπου 15 μέτρα.

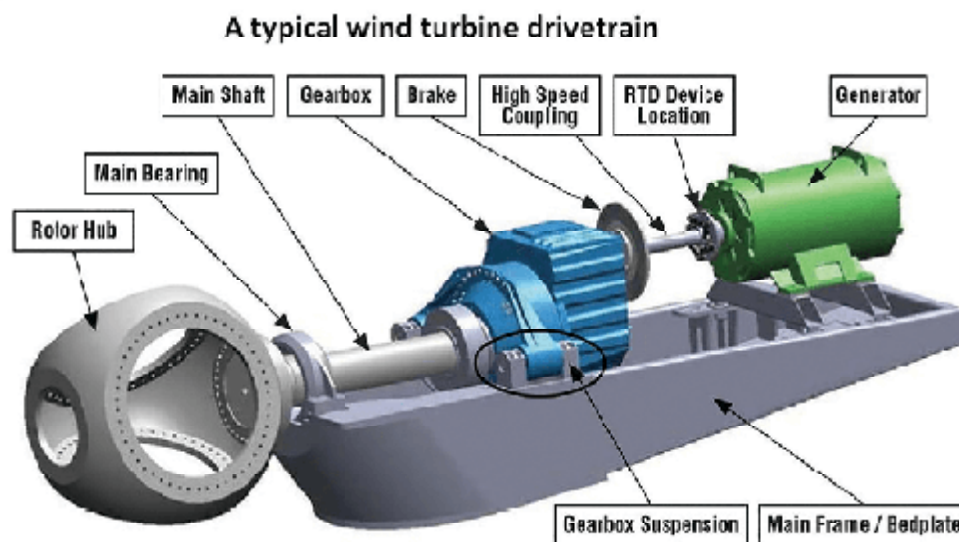
Πηγή: Ανεμογεννήτρια, wikipedia (<https://el.wikipedia.org>)

Τα πτερύγια περιστρέφονται κατά μήκος του άξονά τους και δέχονται άνεμο υπό διαφορετικές γωνίες με τη γωνία πρόσπτωσης να αυξάνεται προς τη βάση του πτερυγίου. Πάνω στο πτερύγιο ασκούνται δυνάμεις άνωσης και αντίστασης, οι οποίες μετατρέπονται σε ροπή και σε αξονική δύναμη ώθησης. Η ροπή είναι αυτή που παράγει ωφέλιμο έργο, ενώ η αξονική δύναμη ώθησης συντελεί στην αναστροφή του του στροβίλου. Οι δυνάμεις αυτές εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά της αεροτομής, το μέγεθος της σχετικής ταχύτητας του ανέμου και τη γωνία πρόσπτωσης. Το βήμα περιστροφής των πτερυγίων ρυθμίζεται από σύστημα ελέγχου στροφέα για να διατηρείται η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα εντός ορίων λειτουργίας στις διάφορες μεταβολές του ανέμου.

Σύστημα μετάδοσης κίνησης

Η μηχανική ισχύς που παράγεται από τα πτερύγια μεταφέρεται στην γεννήτρια με ένα σύστημα μετάδοσης κίνησης (Εικόνα 3.8), το οποίο βρίσκεται μέσα στην άτρακτο και αποτελείται από τους άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας με τα έδρανα τους, ένα σύστημα τροχοπέδησης και το κιβώτιο ταχυτήτων, όπου οι στροφές πολλαπλασιάζονται και η ταχύτητα του δρομέα προσαρμόζεται στην ταχύτητα περιστροφής την οποία χρειάζεται η ηλεκτρογεννήτρια. Ειδικότερα, στο κιβώτιο ταχυτήτων αυξάνεται ο ρυθμός περιστροφής της έλικας από 20 με 50 στροφές ανά λεπτό [rpm] σε 1.000 με 1.500 rpm. Στα απλά κιβώτια ταχυτήτων ο άξονας της έλικας και ο άξονας του δρομέα της ηλεκτρογεννήτριας βρίσκονται σε παράλληλη ζεύξη, αντίθετα στα πιο σύνθετα κιβώτια η ζεύξη γίνεται σε σειρά για να εξασφαλίζεται μεγαλύτερη στερεότητα. Έτσι, η ενέργεια από την περιστροφή του δρομέα της

ανεμογεννήτριας μεταφέρεται στην γεννήτρια μέσω του άξονα χαμηλών ταχυτήτων, του κιβωτίου ταχυτήτων και του άξονα υψηλών ταχυτήτων. Η αναγκαιότητα ύπαρξης του κιβωτίου ταχυτήτων βασίζεται στο ότι αν χρησιμοποιούταν μια ηλεκτρική τριφασική γεννήτρια, η οποία συνδεόταν απευθείας με το τριφασικό δίκτυο και είχε ένα, δύο, ή τρία ή περισσότερα ζεύγη πόλων, θα ήταν ιδιαίτερα βαριά και επίσης θα εκτόξευε στα ύψη το κόστος.



Εικόνα 3.8: Σύστημα μετάδοσης κίνησης μιας ανεμογεννήτριας.

Πηγή: Windpower (<https://www.windpowerengineering.com>)

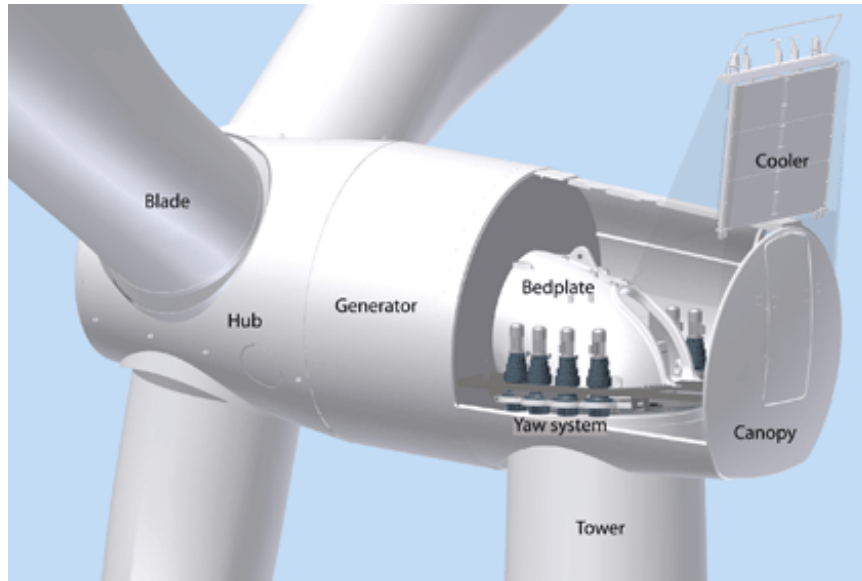
Ηλεκτρογεννήτρια

Κάθε ανεμογεννήτρια περιλαμβάνει μια ηλεκτρική γεννήτρια η οποία είναι συνήθως σύγχρονη και συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω υδραυλικού ή ελαστικού συνδέσμου, μετατρέποντας την μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Οι γεννήτριες διακρίνονται σε δύο κύρια είδη, τις σύγχρονες και τις ασύγχρονες. Οι σύγχρονες γεννήτριες παράγουν στην έξοδό τους ρεύμα ίδια συχνότητας με αυτό του συνδεδεμένου δικτύου διανομής. Αντίθετα, οι ασύγχρονες παράγουν ρεύμα με ελαφρά μεγαλύτερη συχνότητα από αυτή του δικτύου. Και τα δύο είδη γεννητριών αποτελούνται από ένα ακίνητο (τον στάτη) και ένα κινητό πλαίσιο (δρομέας, ρότορας). Ο στάτης αποτελείται από ένα πυρήνα από μεμονομένα φύλλα σιδήρου συνδεδεμένα μεταξύ τους και πάνω του τοποθετούνται τα τριφασικά τυλίγματα του πηνίου από μονωμένο σύρμα. Ο δρομέας είναι διαφορετικός για κάθε είδος γεννήτριας. Έτσι, ο δρομέας μιας σύγχρονης γεννήτριας δομείται από τύλιγμα πηνίου διατρεχόμενο από συνεχές ρεύμα στις μεγάλες γεννήτριες και από μόνιμο μαγνήτη στις μικρές. Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του δρομέα επάγει ρεύμα στον στάτη και ακολούθως αυτό συνδέεται στο δίκτυο διανομής. Από την άλλη πλευρά, ο

δρομέας μιας ασύγχρονης γεννήτριας είναι ένα κλουβί με ράβδους οι οποίες βραχυκυκλώνονται στα δύο άκρα τους. Σε αυτή την περίπτωση ο δρομέας επάγει ρεύμα στο στάτη καθώς κινείται ως προς το περιστρεφόμενο πεδίο που ο ίδιος παράγει, χωρίς να υπάρχει καμία ηλεκτρική σύνδεση. Η γεννήτρια τότε λειτουργεί με μια ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή του περιστρεφόμενου πεδίου που παράγει ο στάτης. Οι μεγάλες γεννήτριες των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι σύγχρονες εξαιτίας της καλύτερης αποδοτικότητάς τους σε σχέση με τις ασύγχρονες και του μεγαλύτερου ελέγχου της επαγωγικής ισχύος και κατ' επέκτασιν της τάσεως του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος.

Σύστημα προσανατολισμού ανεμογεννήτριας (Yaw system)

Το σύστημα προσανατολισμού (Εικόνα 3.9) περιστρέφει την άτρακτο σύμφωνα με τη διεύθυνση του ανέμου μέσω ενός ανεμομέτρου και διαφόρων αισθητήρων, αναγκάζοντας τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται συνεχώς σε παράλληλη θέση. Το σύστημα χρησιμοποιεί περιστροφικό μηχανισμό που συνδέεται σε δακτυλιοειδή οδοντωτό τροχό, ο οποίος απαντάται στην κορυφή του πύργου στήριξης. Σε ένα γενικό πλαίσιο η διεύθυνση του ανέμου πρέπει να είναι κάθετη στο επίπεδο της έλικας όταν η ανεμογεννήτρια λειτουργεί κανονικά, κάτι στο οποίο συνεισφέρει ένα αργό σύστημα ελέγχου κλειστού βρόγχου. Παράλληλα, στην κορυφή της άτρακτου είναι τοποθετημένο ένα ανεμούριο, το οποίο ανιχνεύει την κατεύθυνση του ανέμου και η κάθε στροφή του παρέχει ένα σήμα εισόδου στο σύστημα ελέγχου καθοδηγώντας τον περιστροφικό μηχανισμό. Σε περιπτώσεις θυελλωδών ανέμων το σύστημα αποκλίνει την άτρακτο κατά 90° , ώστε να ρυθμίζεται η ισχύς εξόδου. Αν και το σύστημα προσανατολισμού μοιάζει απλό, αποτελεί ένα από τα πιο δύσκολα τμήματα της ανεμογεννήτριας με ιδιαίτερα πολύπλοκη σχεδίαση, καθώς είναι δύσκολο να προβλεφθούν τα ασκούμενα δυναμικά φορτία κατά την εκτροπή και ιδιαίτερα σε συνθήκες θυελλωδών ανέμων ή ανεμοστροβίλων.



Εικόνα 3.9: Σύστημα προσανατολισμού μιας ανεμογεννήτριας.

Πηγή: Windpower monthly (<https://www.windpowermonthly.com>)

Σύστημα πέδησης

Η ομαλή λειτουργία των ανεμογεννητριών εξασφαλίζεται από την ύπαρξη αποτελεσματικών συστημάτων πέδησης, τα οποία επιφέρουν ασφαλείς συνθήκες λειτουργίας σε περίπτωση θυελλωδών ανέμων, απώλεια σύνδεσης με το δίκτυο ή άλλες επείγουσες καταστάσεις ανάγκης. Σε αυτές τις συνθήκες, τα πτερύγια της έλικας περιστρέφονται ώστε να δημιουργηθεί μηδενική ή αρνητική γωνία πρόσπτωσης του αέρα και έτσι να μειωθεί η ταχύτητα περιστροφής της έλικας. Σε παλαιότερες ανεμογεννήτριες αλλά και σε ορισμένες ανεμογεννήτριες με αυτοπέδηση υπάρχει τοποθετημένο ένα σύστημα μηχανικής πέδησης. Έτσι για να σταματήσει εντελώς η έλικα εγκαθίσταται μηχανική πέδη στους κύριους άξονες του κιβωτίου ταχυτήτων ή στον άξονα με το μεγαλύτερο γρανάζι, αν και οι ροπές που αναπτύσσονται πάνω του είναι σημαντικά μεγάλες. Είναι απαραίτητο να μην υπάρχει ίχνος αβεβαιότητας όσον αφορά τη λειτουργία των συστημάτων πέδησης σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.

Σύστημα εποπτείας και ελέγχου

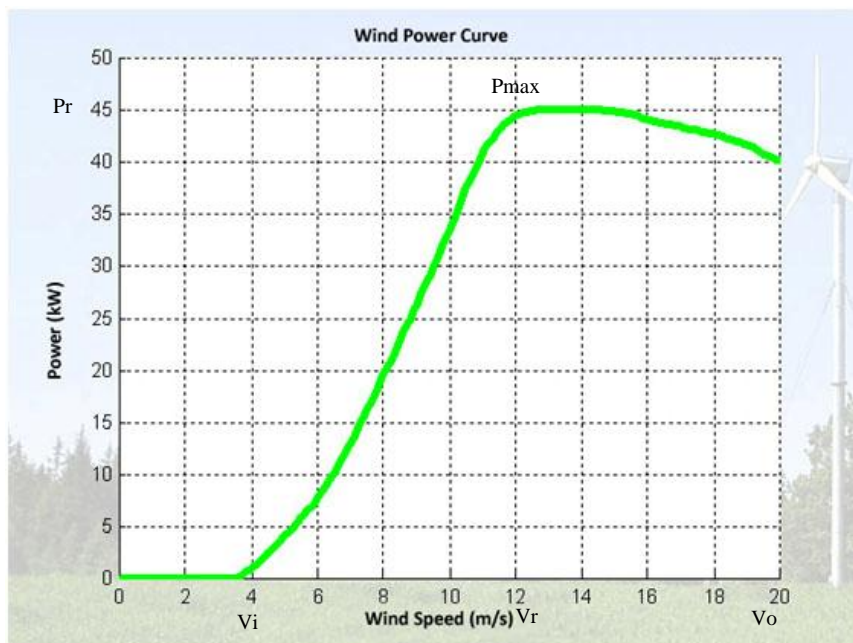
Η προστασία μιας ανεμογεννήτριας απαιτεί ένα πλήρες αυτόματο σύστημα εποπτείας και ελέγχου, το οποίο ελέγχει την απότομη ανύψωση των στροφών, την περιστροφή των πτερυγίων της έλικας και τη διακοπή της λειτουργίας σε ομαλές ή έκτακτες συνθήκες. Παράλληλα, το σύστημα παρακολουθεί την κατάσταση λειτουργίας, την παραγωγή ισχύος, την ταχύτητα, την κατεύθυνση του ανέμου κλπ. Και συνδέεται με έναν υπολογιστή που είναι εγκατεστημένος σε διαφορετική τοποθεσία (τηλεποπτεία).

3.4. Λειτουργικά χαρακτηριστικά μιας ανεμογεννήτριας

3.4.1. Απόδοση ισχύος

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσεται της ταχύτητας του ανέμου που επικρατεί στο ύψος της ατράκτου παρουσιάζεται από την καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας, η οποία προσδιορίζεται είτε θεωρητικά είτε με πρακτικές δοκιμές που γίνονται σύμφωνα με τις διεθνείς προδιαγραφές και συστάσεις. Οι καμπύλες ισχύος που παράγονται από πρακτικές δοκιμές καταγράφουν τους μέσους όρους των μετρήσεων που λήφθηκαν σε χρονικά διαστήματα των 10 λεπτών. Πιο συγκεκριμένα, η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ενέργειας που μετριέται στην έξοδο της γεννήτριας προς την ενέργεια του ανέμου που σαρώνει το εμβαδόν της κυκλικής επιφάνειας, η οποία διαγράφεται από την περιστροφή της έλικας. Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 3.10) παρουσιάζεται η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας 50 kW και μπορούν να οριστούν οι εξής παράμετροι:

- Ταχύτητα κατωφλίου εισόδου (V_i): αποτελεί την ταχύτητα του ανέμου που η γεννήτρια αρχίζει να παράγει καθαρή ισχύ και είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για την εκκίνηση της έλικας.
- Ταχύτητα κατωφλίου εξόδου (V_o): είναι η ταχύτητα του ανέμου που η γεννήτρια παράγει ισχύ με ελαττωμένο μηχανικό και αεροδυναμικό φορτίο και άνευ ηλεκτρικών απωλειών.
- Εκτιμητέα ισχύς (P_r): ορίζεται ως η μέγιστη και συνεχής ισχύς εξόδου της γεννήτριας (χωρίς απώλειες).
- Εκτιμητέα ταχύτητα (V_r): η ταχύτητα του ανέμου που παράγει την εκτιμητέα ισχύ.



Εικόνα 3.10: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας 50 kW.

Πηγή: Energy works (<http://www.energyworks.gr>)

Ένα άλλο μέγεθος χαρακτηριστικό των ανεμογεννητριών είναι ο συντελεστής απόδοσης ισχύος ανεμογεννήτριας (C_p), ο οποίος προσδιορίζεται ως το ποσοστό του ανέμου που εκμεταλλεύεται η πτερωτή της αιολική μηχανή, αποτελώντας ουσιαστικά τον αεροδυναμικό βαθμό της πτερωτής. Έτσι αν η συνολική διαθέσιμη ισχύς ορίζεται με τον τύπο: $P = \frac{1}{2}A\rho V^3$, η πραγματική ισχύς η οποία συλλέγεται είναι ένα πολύ μικρότερο μέγεθος, συμβολίζεται με P_R και υπολογίζεται από τον συντελεστή απόδοσης με τον παρακάτω τύπο.

$$C_p = P_R/P \quad (3.4-1)$$

Αξίζει να αναφερθεί ότι ο συντελεστής δεν μπορεί να υπερβεί το όριο του Betz (0.593), ακόμα και για μια ιδανική πτερωτή. Η ηλεκτρική ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας είναι μικρότερη λόγω των απωλειών που η ίδια παρουσιάζει αλλά και των απωλειών του κιβωτίου ταχυτήτων. Πιο συγκεκριμένα τα κιβώτια ταχυτήτων έχουν απόδοση της τάξεως του 90-95%, ενώ η απόδοση των γεννητριών κυμαίνεται από 50 % έως 80%.

3.4.2. Διαθεσιμότητα

Το χρονικό διάστημα στο οποίο η ανεμογεννήτρια παράγει ισχύ καλείται διαθεσιμότητα και οι τυπικές τιμές της είναι 95 – 99% (καλύτερες από πετρελαιοκίνητα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη). Το υπόλοιπο χρονικό διάστημα, δηλαδή το 1-5%, για το οποίο δεν είναι διαθέσιμες σχετίζεται με τη συντήρηση των αιολικών μηχανών ή με την επιδιόρθωση κάποια βλάβης. Έχει ήδη παρουσιαστεί στο διάγραμμα της καμπύλης ισχύος (Εικόνα 3.10) ότι η ωφέλιμη ισχύς παράγεται μεταξύ των ταχυτήτων ανέμου V_i και V_0 και εξαρτάται από τις συνθήκες ανέμου που επικρατούν, γι' αυτό και η ανεμογεννήτρια λειτουργεί σε χαμηλότερο επίπεδο από αυτό της διαθεσιμότητάς της. Παράλληλα ένα άλλο μέτρο που αφορά την αξιοποίηση των ανεμογεννητριών είναι ο συντελεστής φόρτου ή ικανότητας, ο οποίος ορίζεται ως το πηλίκο της πραγματικής ενέργειας που παράγεται σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, προς την εκτιμητέα ενέργεια που θα παράγονταν στο ίδιο χρονικό διάστημα. Έτσι για παράδειγμα ο συντελεστής εβδομαδιαίου φόρτου ορίζεται ως:

$$\text{Συντελεστής εβδομαδιαίου φόρτου} = \frac{\text{Ενέργεια που παράγεται ανά εβδομάδα (kWh)}}{\text{Εκτιμητέα ενέργεια ανεμογεννήτριας (kWh)} * 168} \quad (3.4-2)$$

3.4.3. Ετήσιος υπολογισμός ενέργειας

Τόσο πριν την εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας όσο και μετά από αυτήν αναμενόμενη εκτιμάται η ενεργειακή παραγωγή ενός σταθμού παραγωγής, δηλαδή η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου σε συνδυασμό με την καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας (Εικόνα 3.11). Ο

υπολογισμός της ενεργειακής παραγωγής πριν την εγκατάσταση, περιέχει δεδομένα για την κατανομή του ανέμου στην περιοχή εκτιμώντας την θεωρητικά αναμενόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Αντίθετα, μετά την εγκατάσταση ο υπολογισμός είναι ακριβέστερος αφού περιλαμβάνει την πραγματική τιμή της καμπύλης ισχύος. Έχει καθιερωθεί ο υπολογισμός να πραγματοποιείται για ένα χρονικό διάστημα ενός έτους γι' αυτό και έχει επικρατήσει ο όρος ετήσια ενεργειακή παραγωγή, η οποία δίνεται από την παρακάτω εξίσωση και για τον υπολογισμό της χρησιμοποιούνται θύλακες του 1 m/s για τις ταχύτητες ανέμου.

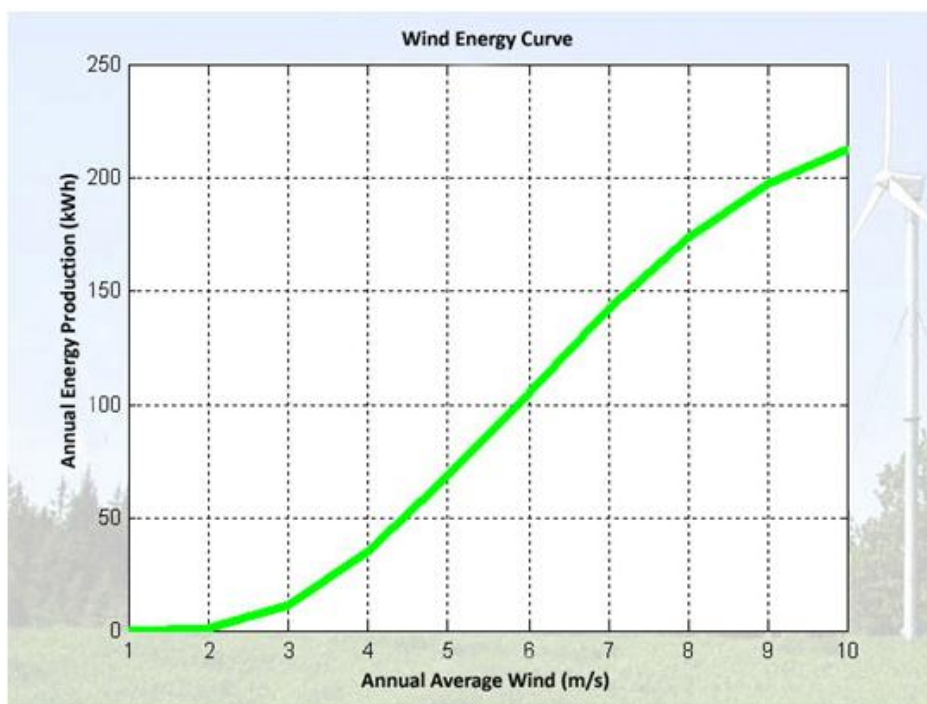
$$Ενέργεια = \sum_{i=1}^{i=n} H(i) * W(i)$$

(3.4-3)

Όπου,

$H(i)$: ο αριθμός των ωρών για ταχύτητα ανέμου του θύλακα i

$W(i)$: η ισχύς εξόδου που αντιστοιχεί στην ταχύτητα ανέμου του θύλακα i .



Εικόνα 3.11: Καμπύλη ετήσιας ενέργειας ανεμογεννήτριας 50 kW.

Πηγή: Energy works (<http://www.energyworks.gr>)

3.4.4. Αιολικό δυναμικό

Το αιολικό δυναμικό μιας περιοχής ορίζεται ως το άθροισμα τριών συνιστωσών: α) του φυσικού διαθέσιμου αιολικού δυναμικού, β) του τεχνικώς αξιοποιήσιμου αιολικού δυναμικού και γ) του οικονομικώς αξιοποιήσιμου αιολικού δυναμικού.

α) φυσικό διαθέσιμο αιολικό δυναμικό: αποτελεί την κινητική ενέργεια των αέριων μαζών οι οποίες κινούνται κάθε χρόνο επάνω από την περιοχή.

β) τεχνικώς αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό: αποτελεί το μέρος του φυσικώς διαθέσιμου αιολικού δυναμικού, το οποίο μπορεί να δεσμευτεί από τις αιολικές μηχανές και είναι ανεξάρτητο από οικονομικούς περιορισμούς. Το τεχνικώς αξιοποιήσιμο δυναμικό μεταβάλλεται με το χρόνο εξαιτίας της ανάπτυξης νέων τεχνολογιών.

γ) οικονομικώς αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό: αποτελεί το μέρος του τεχνικώς αξιοποιήσιμου δυναμικού, του οποίου το κόστος αξιοποίησης είναι οικονομικώς συμφέρον. Και αυτό το δυναμικό μεταβάλλεται γιατί εξαρτάται από τις εκάστοτε οικονομικές συνθήκες.

Σε ένα γενικό πλαίσιο είναι γνωστό ότι περιοχές με υψηλό φυσικό διαθέσιμο αιολικό δυναμικό είναι: i) οι κορυφογραμμές όπου η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη, ii) οι κοιλάδες ή περάσματα μεταξύ υψωμάτων, iii) τα οροπέδια, ειδικά αυτά που βρίσκονται σε μεγάλο υψόμετρο και iv) αρκετές παράκτιες περιοχές. Η έρευνα του φυσικώς διαθέσιμου αιολικού δυναμικού μιας περιοχής μπορεί να υλοποιηθεί μέσω της μελέτης χαρτών και της συλλογής ιστορικών πληροφοριών σχετικά με το κλίμα, ενώ παράλληλα έχουν δημιουργηθεί άτλαντες αιολικού δυναμικού, οι οποίοι παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για την εκτίμηση του αιολικού δυναμικού ορισμένων περιοχών και την μετέπειτα ασφαλή διαστασιολόγηση της εγκατάστασης της αιολικής μηχανής.

3.5. Επιλογή θέσης εγκατάστασης

Η επιλογή της θέσεως εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας σχετίζεται άμεσα με τη συμπεριφορά του ανέμου (ένταση του ανέμου, διακυμάνσεις στο μέτρο και στη διεύθυνση, κλπ.) σε αυτή τη θέση, η οποία καθορίζει και την λειτουργική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας. Κρίσιμη παράμετρος για την επιλογή της θέσεως είναι το αιολικό δυναμικό της περιοχής, ενώ ορισμένα άλλα κριτήρια για την τοποθέτηση των ανεμογεννητριών και τη βιωσιμότητά τους είναι τα εξής:

- ο Η παραγωγή ενέργειας να είναι συμφέρουσα οικονομικά (μικρό κόστος παραγωγής)
- ο Η εγκατάσταση να μην επηρεάζει αρνητικά το περιβάλλον.
- ο Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας να είναι συμβατή με τη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου.

- Να έχουν ληφθεί υπόψιν κατά το σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας οι πιθανές ακραίες μετεωρολογικές συνθήκες της συγκεκριμένης θέσης.
- Η επιλεγμένη θέση να είναι αποδεκτή κοινωνικά.

3.6. Συντήρηση ανεμογεννητριών

Η συντήρηση μιας ανεμογεννήτριας περιλαμβάνει τον έλεγχο και την αντικατάσταση ορισμένων υλικών στα ηλεκτρικά και μηχανολογικά μέρη της. Η συντήρηση διακρίνεται σε τέσσερα τμήματα και στη συγκεκριμένη περίπτωση λαμβάνεται ως παράδειγμα η ανεμογεννήτρια V82 μάρκας Vestas.

- i. Τρίμηνη συντήρηση: Πραγματοποιείται τρεις μήνες μετά την εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας και σχετίζεται με τον έλεγχο των ηλεκτρικών τμημάτων και των κοχλιών σύνδεσης.
- ii. Εξάμηνη συντήρηση: Γίνεται έξι μήνες μετά την εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας και επαναλαμβάνεται μετά από ένα χρόνο, περιλαμβάνοντας έλεγχο των ηλεκτρικών και μηχανικών τμημάτων, λίπανση των ρουλεμάν και άλλων τμημάτων και έλεγχο της πίεσης των υδραυλικών συστημάτων.
- iii. Δωδεκάμηνη συντήρηση: Πραγματοποιείται ένα έτος μετά την εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας και αφορά έλεγχο των πιεζοστατών, αλλαγή φίλτρων και επανάληψη των εργασιών που γίνονται στην εξάμηνη συντήρηση.
- iv. Συντήρηση 4 ετών: Λαμβάνει χώρα τέσσερα έτη μετά την εγκατάσταση της ανεμογεννήτριας, αποτελώντας ένα συνδυασμό της τρίμηνης και της ετήσιας συντήρησης.

Κεφάλαιο 4: Αιολικά πάρκα

4.1. Εισαγωγή στα αιολικά πάρκα

4.1.1. Βασικά χαρακτηριστικά των αιολικών πάρκων

Ένα αιολικό πάρκο συνιστάται από μία συστοιχία πολλών ανεμογεννητριών, οι οποίες εγκαθίστανται και λειτουργούν σε μια περιοχή με υψηλό αιολικό δυναμικό, διοχετεύοντας το σύνολο της παραγωγής τους σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο ή λειτουργώντας αυτόνομα είτε για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές που αντιμετωπίζουν προβλήματα στην ηλεκτροδότηση είτε για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας σε αντλιοστάσια (Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1: Αιολικό πάρκο στο Τέξας των Η.Π.Α.

Πηγή: wikipedia (<https://el.wikipedia.org>)

Τα δομικά στοιχεία ενός αιολικού πάρκου είναι οι ανεμογεννήτριες, οι κύριοι δρόμοι πρόσβασης, τα καλώδια σύνδεσης του δικτύου, το δίκτυο της Δ.Ε.Η. και ο υποσταθμός. Όσον αφορά την ηλεκτρική ισχύ σε ένα αιολικό πάρκο, η ροή της γίνεται παράλληλα με το συμβατικό δυναμικό παραγωγής της εταιρείας ηλεκτρισμού, δηλαδή σειρές από εκατοντάδες μηχανές παρουσιάζουν ένα δυναμικό ισχύος της τάξεως των εκατοντάδων MW το οποίο είναι συγκριτικά μικρότερο από το δυναμικό που παρέχουν οι συμβατικές πηγές και απαιτείται από το φορτίο. Η αναλογία του δυναμικού αιολικής παραγωγής προς το συνολικό δυναμικό το οποίο εξυπηρετεί ένα ηλεκτρικό φορτίο σε μια ορισμένη χρονική στιγμή εκτιμάται από την αιολική διείσδυση (WP) και ορίζεται ως εξής:

$$WP = \frac{\text{Αιολικό Δυναμικό}}{\text{Αιολικό Δυναμικό} + \text{Συμβατικό Δυναμικό}} \quad (4.1-1)$$

Η μέγιστη τιμή αιολικής διείσδυσης με την οποία λειτουργούν με ασφάλεια οι περισσότερες ανεμογεννήτριες είναι μεταξύ 10%-15%.

4.1.2. Είδη αιολικών πάρκων

Τα αιολικά πάρκα ανάλογα με την θέση εγκατάστασής τους διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τα χερσαία και τα υπεράκτια. Τα χερσαία αιολικά πάρκα είναι τα

επικρατέστερα με ένα ποσοστό περίπου 98% των εν λειτουργία αιολικών πάρκων και η εγκατάστασή τους λαμβάνει χώρα στη στεριά, συνήθως στις κορυφογραμμές με σχετικά μεγάλο υψόμετρο εξαιτίας της σημαντικής επιτάχυνσης του ανέμου. Σε τέτοιες εγκαταστάσεις μελετάται πολύ προσεκτικά η χωρική διάταξη των ανεμογεννητριών του πάρκου ώστε να εξασφαλίζεται στο βέλτιστο βαθμό η αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού, ενώ οπτικά μεταβάλλεται μόνο η θέση εγκατάστασης και όχι το υπόλοιπο έδαφος, το οποίο αξιοποιείται ως έχει.

Αντίθετα, η εγκατάσταση των υπερακτίων γίνεται στη θάλασσα, απαιτώντας πιο πολύπλοκη μηχανική όσον αφορά την υποδομή, τοποθέτηση, ηλεκτρική σύνδεση και την χρήση υλικών (Εικόνα 4.2). Τα υπεράκτια πάρκα παρουσιάζουν μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμων και με την πάροδο του χρόνου εμφανίζουν σημαντική ανάπτυξη εξαιτίας της εξέλιξης της τεχνολογίας των αιολικών συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση του μεγέθους των ανεμογεννητριών καθώς και της απόστασης από την ακτή συνεισφέρουν στην εγκατάσταση συνεχώς αποδοτικότερων ανεμογεννητριών και κατ' επέκτασιν στη μείωση του κόστους παραγωγής υπεράκτιας αιολικής ενέργειας. Η κατασκευή τους είναι δυνατόν να οδηγήσει στη γένεση ορισμένων κοινωνικών ζητημάτων, τα οποία ωστόσο μπορούν αν αποφευχθούν μέσω ενός ορθού προγραμματισμού έτσι ώστε να μην διαταράσσεται το περιβάλλον, να μην υπάρχουν αισθητικά προβλήματα και να λυθούν οι όποιες αντιπαραθέσεις. Ειδικότερα, λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν οι μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής εγκατάστασης, βυθομετρικά και ωκεανογραφικά χαρακτηριστικά, ο πιθανός μηχανισμός έδρασης της ανεμογεννήτριας, η απόσταση από την ακτή και τους σταθμούς εξυπηρέτησης, η ναυσιπλοΐα και αλιεία της περιοχής και οι επιπτώσεις στο θαλάσσιο οικοσύστημα. Ορισμένα από τα κριτήρια καταλληλότητας μιας περιοχής προς εγκατάσταση υπερακτίων αιολικών πάρκων είναι: α) το βάθος (έως περίπου 50 μέτρα), β) η απόσταση από την ακτή (έως 10χλμ), γ) η οπτική όχληση από την ακτή, δ) η ικανοποιητική ταχύτητα ανέμου και ε) το αν η περιοχή ανήκει σε προστατευόμενη ζώνη. Όσον αφορά τον τεχνικό εξοπλισμό, ορισμένες απαιτήσεις των υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι:

- Μεγάλη αντιδιαβρωτική προστασία των δομικών στοιχείων.
- Άτρακτοι με καλύτερη σφράγιση.
- Κλειστό σύστημα ψύξης για τη γεννήτρια.
- Συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου με δυνατότητα τηλε-ελέγχου από τη στεριά.
- Ύπαρξη ειδικού γερανού επάνω στην άτρακτο για τη διευκόλυνση της συντήρησης και επισκευής.
- Ειδικά εργαλεία άρσης στην άτρακτο και στον πύργο για τα βαρέα στοιχεία και φορτία.
- Πλατφόρμες σύνδεσης για σκάφη συντήρησης
- Φωτισμό, σύμφωνα με τους κανόνες στη θάλασσα.



Εικόνα 4.2: Υπεράκτιο αιολικό πάρκο στη Δανία.

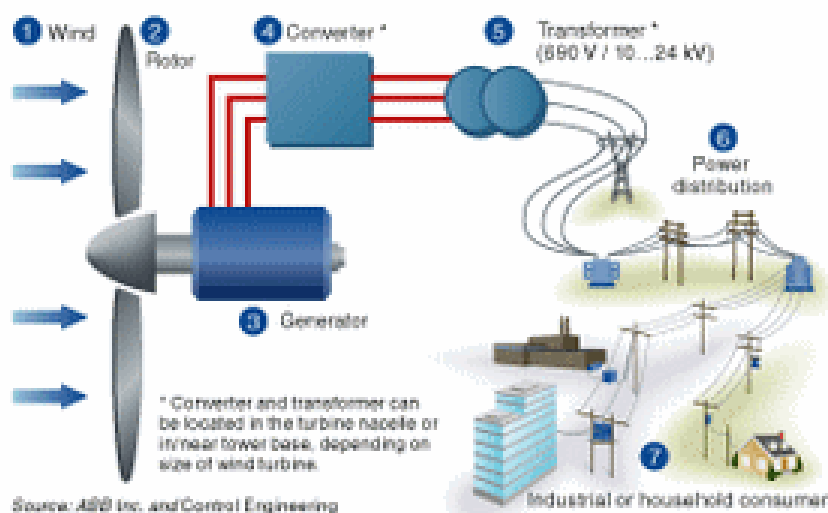
Πηγή: wikipedia (<https://el.wikipedia.org>)

4.1.3. Λειτουργία αιολικού πάρκου

Η λειτουργία ενός αιολικού πάρκου (Εικόνα 4.3) ξεκινάει τη στιγμή που αέρας κινεί τα αεροδυναμικώς σχεδιασμένα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας συμβάλλοντας στην παραγωγή ρεύματος. Το ρεύμα αυτό μέσω των καλωδίων μεταβαίνει στον μικρό υποσταθμό κάθε ανεμογεννήτριας (μετασχηματιστή) όπου μετατρέπεται η τάση του από χαμηλή σε μέση και έπειτα μέσω του δικτύου μέσης τάσης καταλήγει στον κεντρικό υποσταθμό μέσης τάσεως. Εκεί συλλέγεται το ρεύμα από όλες τις ανεμογεννήτριες του πάρκου και μεταφέρεται στον υποσταθμό υψηλής τάσεως, όπου η τάση μετατρέπεται σε υψηλή και τελικά διοχετεύεται στο εθνικό δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της γραμμής διασύνδεσης υψηλής τάσης. Σε ένα τελικό στάδιο σύρματα μεταφοράς ρεύματος υψηλής τάσης οδηγούν το ρεύμα σε ένα υποσταθμό, στον οποίο μετασχηματιστές μετατρέπουν την υψηλή τάση σε χαμηλή έτσι ώστε οι καταναλωτές να μπορούν να λειτουργούν τις ηλεκτρικές συσκευές.

Η λειτουργία ενός αιολικού πάρκου παρακολουθείται και ελέγχεται σε καθημερινή βάση με ένα εποπτικό σύστημα ελέγχου και συλλογής δεδομένων (SCADA), το οποίο συνδέει όλα τα δομικά μέρη του αιολικού πάρκου με ένα κεντρικό υπολογιστή μέσω του οποίου ένας χειριστής έχει τη δυνατότητα να επιβλέπει τη λειτουργία του πάρκου και να εξασφαλίζει τη βέλτιστη απόδοσή του. Παράλληλα το σύστημα αποθηκεύει τις πληροφορίες αυτές συμβάλλοντας στον εντοπισμό αστοχιών ή προβλημάτων λειτουργίας συγκεκριμένων αιολικών μηχανών.

From wind power to electricity generation-distribution



Εικόνα 4.3: Διαδικασία λειτουργίας ενός τυπικού αιολικού πάρκου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Πηγή: Control Engineering Europe (<http://www.controlengurope.com>)

Επιπλέον, σημαντικό σημείο της λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου είναι η ασφάλεια του όσον αφορά το προσωπικό, τις εγκαταστάσεις και τους περίοικους. Η ασφάλεια του προσωπικού διασφαλίζεται με όλα τα απαραίτητα μέσα ατομικής προστασίας και την εφαρμογή του κανονισμού ασφαλείας τόσο κατά την διάρκεια εγκατάστασης όσο και κατά την διάρκεια λειτουργίας. Επιπλέον, η αντικεραυνική προστασία των εγκαταστάσεων γίνεται με αλεξικέραυνα σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ 1197/1991, ο αριθμός των οποίων καθορίζεται από σχετική μελέτη, ενώ για λόγους πυρασφάλειας αφαιρείται η βλάστηση τριγύρω από όλους τους υποσταθμούς σε όλη την περίοδο λειτουργίας της αιολικής εγκατάστασης και προστίθεται χαλίκι στην επιφάνεια του εδάφους για λόγους αποστράγγισης των υδάτων. Ένα άλλο σύστημα ασφαλείας των αιολικών πάρκων είναι το σύστημα γείωσης τους, το οποίο βασίζεται στη γείωση κάθε υποσταθμού και της αντίστοιχης ανεμογεννήτριας μέσω ενός συνδυασμού θεμελιακής γείωσης με δακτυλιοειδή ηλεκτρόδια και ακτινικά ηλεκτρόδια γείωσης, επιτυγχάνοντας αντίσταση γείωσης μικρότερη των 10Ω ανά αιολική μηχανή. Παράλληλα, το σύνολο του ηλεκτρικού εξοπλισμού τοποθετείται επάνω σε πλάκες σκυροδέματος, ενώ ένα μεταλλικό πλέγμα θάβεται κάτω από τους υποσταθμούς διαχείρισης ρεύματος για την επίτευξη της γείωσης. Τέλος γύρω από όλες τις εγκαταστάσεις τοποθετείται περίφραξη με ψηλούς μεταλλικούς φράκτες ώστε να εμποδίζεται η πρόσβαση σε μη εξουσιοδοτημένα άτομα ή άγρια ζώα.

4.1.4. Συντήρηση αιολικού πάρκου

Οι ανεμογεννήτριες εμφανίζουν ένα προσδοκώμενο χρόνο ζωής της τάξεως των 20 χρόνων, στη διάρκεια ωστόσο του οποίου είναι επιτακτική η ανάγκη συντήρησής τους, η οποία είναι σχετικά δύσκολη και ακριβή διαδικασία. Η συντήρηση περιλαμβάνει επιτόπιους ελέγχους των εξαρτημάτων και των συνδέσεων με το δίκτυο, επιδιόρθωση βλαβών και αντικατάσταση των εξαρτημάτων, ενώ η σωστή λειτουργία των ανεμογεννητριών εξαρτάται από πλήθος παραγόντων όπως είναι οι καιρικές συνθήκες, η ταχύτητα του ανέμου, οι δονήσεις των πτερυγίων κ.α.. Δύο από τους κυριότερους παράγοντες εκδήλωσης προβλημάτων στις ανεμογεννήτριες είναι οι δονήσεις και η σκόνη. Η πιθανότητα εμφάνισης κάποιας αστοχίας ή ατυχήματος από δονήσεις έγκειται στις δονήσεις του ανέμου που δέχονται τα πτερύγια και άλλα μέρη της αιολικής μηχανής, προκαλώντας τη μετατόπιση υλικών, την αποκόλληση συνδέσμων ή το μερικό ή ολικό σπάσιμο των πτερυγίων. Από τη άλλη πλευρά, η σκόνη σε οποιαδήποτε μορφή της εμποδίζει τη ροή του ανέμου και μειώνει την ψύξη, αυξάνοντας έτσι τη θερμοκρασία των διαφόρων μηχανικών και ηλεκτρικών εξαρτημάτων όπως η γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, το κιβώτιο ταχυτήτων, κλπ. Η διαδικασία συντήρησης μιας ανεμογεννήτριας διακρίνεται στις επιμέρους συνιστώσες:

- Ø Προληπτική συντήρηση
- Ø Έγκαιρη συντήρηση
- Ø Προαιρετική συντήρηση
- Ø Διορθωτική συντήρηση

Η προληπτική συντήρηση περιλαμβάνει διάφορες εργασίες, ελέγχους, και δραστηριότητες στα επιμέρους τμήματα των ανεμογεννητριών με κάθε κατασκευαστή ανεμογεννητριών να παρέχει το δικό του εγχειρίδιο και πρόγραμμα προληπτικής συντήρησης. Η συντήρηση αυτού του είδους συνεισφέρει στη βελτίωση της λειτουργίας των ανεμογεννητριών και στη μείωση της εμφάνισης απρόβλεπτων βλαβών, περιλαμβάνοντας διαδικασίες όπως η λίπανση των κινούμενων τμημάτων, η εκτέλεση αποσυναρμολόγησης του κιβωτίου ταχυτήτων των ανεμογεννητριών, ρυθμίσεις ή και αντικατάσταση εξαρτημάτων και η εκτέλεση λειτουργικών ελέγχων.

Στην ίδια κατεύθυνση στοχεύει και η καλούμενη έγκαιρη συντήρηση με τη διαφορά ότι βασίζεται στην ανάλυση συγκεκριμένων στοιχείων για την έγκαιρη ανίχνευση μεταβολών στις συνθήκες λειτουργίας. Η διαδικασία εκτελείται σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά τα οποία τεχνικοί συλλέγουν και καταχωρούν δεδομένα ώστε να καταφύγουν στην μετέπειτα ανάλυση και σύγκρισή τους. Μέσω της συγκεκριμένης διαδικασίας προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα όσον αφορά την εξέλιξη κάποιων μεταβλητών, ενώ παράλληλα συντελείται προγραμματισμός διορθωτικών εργασιών, οι οποίες θα έχουν ελάχιστη επίδραση στην παραγωγικότητα της κάθε ανεμογεννήτριας.

Ένα άλλο είδος συντήρησης, για τις ανεμογεννήτριες, είναι η προαιρετική, η οποία σχετίζεται με την ανάλυση των υπαρχόντων βλαβών και την προέλευσή τους, εστιάζοντας στην αναγνώριση και διόρθωση των αιτιών των βλαβών τόσο στα εξαρτήματα της κάθε ανεμογεννήτριας όσο και στη διαδικασία εγκατάστασής της. Για την πρόληψη αυτών των σφαλμάτων πραγματοποιούνται διάφορες ενέργειες όπως τροποποιήσεις στο σχεδιασμό, βελτίωση των διαδικασιών συντήρησης και της εκπαίδευσης του προσωπικού συντήρησης κ.α.

Το πρώτο στάδιο κάθε συντήρησης είναι ο έλεγχος της κατάστασης κάθε ανεμογεννήτριας κατά τον οποίο αν εντοπιστεί κάποια βλάβη τότε δημιουργείται η ανάγκη μιας διορθωτικής ενέργειας (διορθωτική συντήρηση). Έτσι, η διορθωτική συντήρηση περιλαμβάνει την εκτέλεση των απαραίτητων εργασιών με στόχο την διόρθωση πιθανών σφαλμάτων, την αντικατάσταση εξαρτημάτων ή τη διόρθωση οποιασδήποτε ανωμαλίας ανιχνεύθηκε. Η διαδικασία αυτού του τύπου συντήρησης είναι αρκετά πολύπλοκη και χρονοβόρα και εξαρτάται άμεσα από το είδος της βλάβης που έχει εντοπιστεί.

4.2. Περιγραφή εγκατάστασης ενός τυπικού αιολικού πάρκου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η πλειονότητα των αιολικών πάρκων είναι χερσαίου τύπου με τον κύριο ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό να περιλαμβάνει τα εξής:

- Ανεμογεννήτριες
- Καλωδίωση μεταφοράς ενέργειας και σήματος
- Υποσταθμούς σε κάθε ανεμογεννήτρια χαμηλής τάσεως-μέσης τάσεως(X.T.M.T.)
- Τον κεντρικό υποσταθμός μέσης τάσεως
- Τον υποσταθμό μέσης τάσεως-υψηλής τάσεως του εθνικού δικτύου παροχής ρεύματος.
- Κεντρικές εγκαταστάσεις ελέγχου και ρύθμισης
- Σύστημα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας (σε ανεξάρτητες μονάδες)

Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες ενός τυπικού αιολικού πάρκου είναι συνήθως οριζοντίου άξονα και παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλής τάσεως (400 -1000 Volt), το οποίο μετέπειτα διοχετεύεται στο δίκτυο μέσης ή υψηλής τάσεως της ΔΕΗ. Σημαντικό σημείο της διαδικασίας είναι η ανύψωση των βολτ στη μέση τάση, η οποία λαμβάνει χώρα με τη βοήθεια μετασχηματιστών για κάθε ανεμογεννήτρια ξεχωριστά. Οι μετασχηματιστές τοποθετούνται κοντά στις ανεμογεννήτριες ή εντός του πυλώνα τους, ενώ σε μεγάλες αιολικές μηχανές βρίσκονται στην κορυφή του πυλώνα, μαζί με τα υπόλοιπα εξαρτήματα.

Καλώδια μεταφοράς σήματος και ενέργειας

Τα καλώδια μεταφοράς ενέργειας υλοποιούν την σύνδεση της κάθε ανεμογεννήτριας με την κεντρική μονάδα διαχείρισης ενέργειας, ενώ τα καλώδια σήματος συνδέουν την κάθε ανεμογεννήτρια με την εγκατάσταση κεντρικού ελέγχου που παρακολουθεί και ελέγχει τις λειτουργίες της. Τα καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και σήματος βρίσκονται συνήθως θαμμένα μέσα στο έδαφος.

Κεντρικός υποσταθμός μέσης τάσης

Ο κεντρικός υποσταθμός μέσης τάσης (Εικόνα 4.4) αποτελεί το σημείο διασύνδεσης όλων των ανεμογεννητριών και περιλαμβάνει τον αυτόματο διακόπτη διασύνδεσης (ΑΔΔ) του αιολικού πάρκου, έναν αποζεύκτη, τους μετασχηματιστές τάσεως και εντάσεως και τους διακόπτες φορτίου των αναχωρήσεων της ισχύς από τις ανεμογεννήτριες. Ο αυτόματος διακόπτης διασύνδεσης (ΑΔΔ) είναι ένας αυτόματος διακόπτης ισχύος και ελέγχεται από έναν ηλεκτροβιομηχανικού τύπου μέσω των μετασχηματιστών τάσεως και εντάσεως, ο οποίος παρέχει τη δυνατότητα τηλεχειρισμού του ΑΔΔ.



Εικόνα 4.4: Πίνακες μέσης τάσης σε υποσταθμός μέσης τάσης.

Πηγή: Safety Engineer (<https://www.safetyengineer.gr>)

Υποσταθμός υψηλής τάσης

Στον υποσταθμό υψηλής τάσης (Εικόνα 4.5) πραγματοποιείται μετατροπή της μέσης τάσης σε υψηλή, ενώ παράλληλα αποτελεί το σημείο σύνδεσης του αιολικού πάρκου με το δίκτυο μεταφοράς του εθνικού συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο σταθμός κατασκευάζεται κοντά ή μακριά από το αιολικό πάρκο και έχει τη δυνατότητα σύνδεσης πολλών αιολικών πάρκων. Στην Ελλάδα, τέτοιοι σταθμοί απαντώνται σε υψόμετρα κάτω των 1000 μέτρων, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ΔΕΗ, ενώ για μεγαλύτερα υψόμετρα απαιτείται εξοπλισμός ειδικών προδιαγραφών. Στα βασικά μέρη ενός υποσταθμού υψηλής τάσης περιέχονται ο κεντρικός μετασχηματιστής (Μ.Τ.-Υ.Τ.), ο διακόπτης ισχύος, οι μετασχηματιστές τάσεως και εντάσεως, διάφοροι αποζεύκτες και γειωτές, η μονάδα αντιστάθμισης άεργου ισχύος και οι πίνακες ελέγχου.



Εικόνα 4.5: Άποψη υποσταθμού υψηλής τάσης.

Πηγή: Engineering Services (<http://www.engineering-services.gr>)

Κεντρικές εγκαταστάσεις ελέγχου και ρύθμισης

Έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω πως τα αιολικά πάρκα παρακολουθούνται και διαχειρίζονται από πολύπλοκα συστήματα εποπτικού ελέγχου και απόκτησης δεδομένων (SCADA) (Εικόνα 4.6). Τα συστήματα αυτά στεγάζονται συνήθως στην εγκατάσταση κεντρικού ελέγχου αλλά έχουν και τη δυνατότητα παρακολούθησης και ελέγχου της εγκατάστασης του αιολικού πάρκου χρησιμοποιώντας τυπική επίγεια καλωδίωση είτε καλώδια οπτικών ινών.



Εικόνα 4.6: Μονάδα απομακρυσμένου ελέγχου αιολικού πάρκου.

Πηγή: Ingeteam (<https://www.ingeteam.com>)

Βοηθητικός και λοιπός Η/Μ εξοπλισμός

Ο βοηθητικός ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός συμβάλει στην λειτουργία και συντήρηση του αιολικού πάρκου και αποτελείται από τα παρακάτω:

- Ηλεκτρικό δίκτυο μέσης τάσης και δίκτυο επικοινωνίας
- Δίκτυο υψηλής τάσης
- Εξοπλισμός οικίσκου ελέγχου
- Μετασχηματιστής υπηρεσίας 50 kVA
- Τηλεφωνικές γραμμές

4.3. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αιολικών πάρκων

Σε ένα γενικό πλαίσιο η αιολική ενέργεια παρουσιάζει πολλά θετικά στοιχεία, ωστόσο υπάρχουν ακόμη ορισμένες αρνητικές επιπτώσεις τόσο στον άνθρωπο όσο και στο περιβάλλον που ακόμη διερευνώνται. Οι σημαντικότερες ανησυχίες για τις αρνητικές επιπτώσεις των αιολικών πάρκων σχετίζονται με το θόρυβο που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες, το φαινόμενο της σκίασης, προβλήματα από τυχών ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, αισθητικά προβλήματα και προσβολή του φυσικού τοπίου (Οπτική όχληση), την επίδραση των ανεμογεννητριών στις γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες καθώς και τις επιπτώσεις στον πληθυσμό των πουλιών.

Ο θόρυβος των ανεμογεννητριών

Το ουσιαστικότερο πρόβλημα που προκύπτει από την χρήση των αιολικών μηχανών είναι ο θόρυβος, ο οποίος ωστόσο είναι εύκολο να ελεγχθεί και να προληφθεί. Ο θόρυβος αυτός διακρίνεται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με την προέλευσή του, στον μηχανικό που προκύπτει από τα περιστρεφόμενα μηχανικά μέρη (κιβώτιο ταχυτήτων, ηλεκτρογεννήτρια κλπ.) και στον αεροδυναμικό, ο οποίος δημιουργείται από την περιστροφή των πτερυγίων. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι σημαντικά πιο ήσυχες και γίνονται ολοένα και πιο αθόρυβες με την αντιμετώπισή του θορύβου να γίνεται είτε στην πηγή είτε στη διαδρομή του. Ο μηχανικός θόρυβος ελαχιστοποιείται εξ αρχής με τη σχεδίαση της αιολικής μηχανής είτε μέσω εσωτερικής ηχομονωτικής επένδυσης στο κέλυφος της κατασκευής. Επιπλέον, η τοποθέτηση ηχομονωτικών πετασμάτων και αντικραδασμικών πελμάτων στήριξης συμβάλει στην αντιμετώπιση του μηχανικού θορύβου στη διαδρομή του. Όσον αφορά τον αεροδυναμικό θόρυβο, η αντιμετώπισή του συντελείται μέσω της προσεκτικής σχεδίασης των πτερυγίων της αιολικής μηχανής από τον κατασκευαστή και είναι αισθητά πιο έντονος από το μηχανικό. Το επίπεδο του αντιληπτού θορύβου από μία ανεμογεννήτρια σύγχρονων προδιαγραφών σε απόσταση 200 μέτρων, είναι μικρότερο από αυτό που αντιστοιχεί στο επίπεδο θορύβου του περιβάλλοντος μιας μικρής επαρχιακής πόλης. Σε ένα γενικό πλαίσιο και λαμβάνοντας υπόψιν τις περιοχές εγκατάστασης των αιολικών πάρκων έχει αποδειχτεί πως δεν προκαλείται αύξηση της στάθμης του θορύβου.

Το φαινόμενο της σκίασης

Το φαινόμενο της σκίασης σχετίζεται με τη στροβοσκοπική επίδραση των σκιών που δημιουργούνται από τα περιστρεφόμενα πτερύγια των ανεμογεννητριών όταν ο ήλιος βρίσκεται πίσω από αυτά. Η παραγόμενη σκιά παρουσιάζεται σαν διακοπτόμενες ανακλάσεις, προκαλώντας ενόχληση σε ανθρώπους μέσα σε κτίρια, οι οποίοι εκτίθενται στο φαινόμενο.

Προβλήματα από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές

Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές σχετίζονται αφενός με προβλήματα που προκαλούν οι ανεμογεννήτριες λόγω της θέσης τους σε σχέση με ήδη υπάρχοντες σταθμούς τηλεόρασης ή ραδιοφώνου και αφετέρου με πιθανές ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές από τις ίδιες. Πιο συγκεκριμένα, η διάδοση των εκπομπών στις συχνότητες της τηλεόρασης ή και του ραδιοφώνου επηρεάζεται από εμπόδια που παρεμβάλλονται μεταξύ πομπού και δέκτη και έτσι τα κινούμενα πτερύγια που μπορούν να προκαλέσουν αυξομείωση σήματος λόγω αντανάκλασεων. Για το λόγο αυτό, τα πτερύγια των ανεμογεννητριών κατασκευάζονται από συνθετικά υλικά ώστε να έχουν ελάχιστη επίπτωση στη μετάδοση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ενώ παράλληλα η νομοθεσία προβλέπει την αδειοδότηση ενός αιολικού πάρκου μόνον αν

τηρούνται κάποιες ελάχιστες αποστάσεις από τηλεπικοινωνιακούς ή ραδιοηλεκτρονικούς σταθμούς. Όσον αφορά τις εκπεμπόμενες ακτινοβολίες τα μοναδικά τμήματα τα οποία θα μπορούσαν να «εκπέμπουν» ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία χαμηλού επιπέδου είναι η ηλεκτρογεννήτρια και ο μετασχηματιστής μέσης τάσης. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της ηλεκτρογεννήτριας είναι ιδιαίτερα ασθενές και οριοθετείται σε μια μικρή απόσταση γύρω από το κέλυφος της και 40-50 μέτρα πάνω από το έδαφος, γι' αυτό δεν υπάρχει θέμα έκθεσης στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ούτε καν στη βάση της ανεμογεννήτριας. Από τη άλλη πλευρά, ο μετασχηματιστής περιβάλλεται πάντα από περίφραξη ασφαλείας ή είναι κλεισμένος σε μεταλλικό υπόστεγο και δεν τίθεται θέμα έκθεσης.

Αισθητικά προβλήματα και προσβολή του φυσικού τοπίου(Οπτική όχληση)

Η οπτική όχληση είναι καθαρά υποκειμενικό ζήτημα και δύσκολα τίθενται κανόνες που να είναι κοινώς αποδεκτοί. Από έρευνες έχει αποδειχθεί ότι τα αιολικά πάρκα είναι πιο εύκολα αποδεκτά από αισθητική άποψης από ανθρώπους, οι οποίοι είναι ενήμεροι για τα οφέλη από την χρήση τους. Επιπλέον, συγκριτικά με ένα λιγνιτικό σταθμό παραγωγής ενέργειας, η οπτική όχληση των αιολικών πάρκων είναι σημαντικά μικρότερη.

Επίδραση ανεμογεννητριών στις γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες

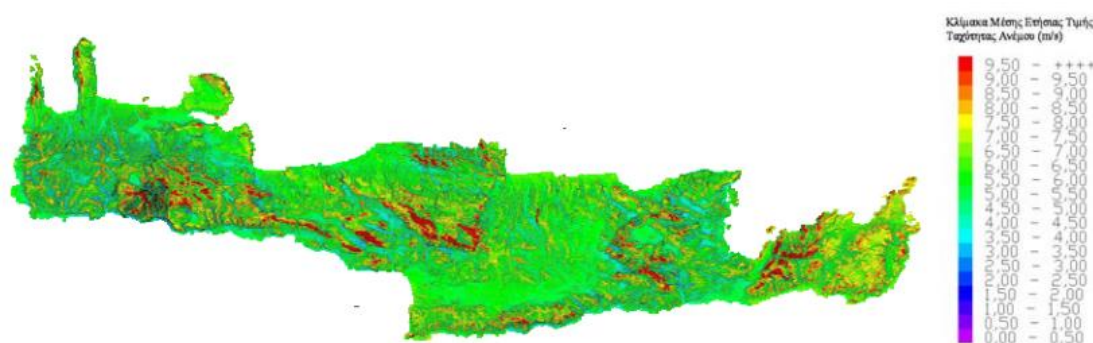
Οι θέσεις εγκατάστασης των αιολικών πάρκων είναι συνήθως ορεινές περιοχές με θαμνώδη βλάστηση, οι οποίες λόγω του υψομέτρου τους ευνοούν την ανάπτυξη ανέμων υψηλών ταχυτήτων. Σε αυτές τις περιοχές είναι ιδιαίτερα αναπτυγμένες οι γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες, οι οποίες ωστόσο συνεχίζονται και μετά την εγκατάσταση χωρίς κανένα πρόβλημα.

Επιπτώσεις στον πληθυσμό των πτηνών

Οι επιπτώσεις στον πληθυσμό των πουλιών σχετίζονται είτε με τις συγκρούσεις τους με τα διάφορα μέρη των ανεμογεννητριών είτε με τον αποπροσανατολισμό τους ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της νύχτα εξαιτίας του φωτισμού των αιολικών μηχανών. Έρευνες σε ευρωπαϊκό επίπεδο όμως έχουν δείξει ότι οι ανεμογεννήτριες δεν προκαλούν τόσο μεγάλο πρόβλημα όσον αφορά τη θνησιμότητα των πτηνών. Επιπλέον, σημαντικό είναι να υπογραμμιστεί το θέμα της προστασίας του πληθυσμού των πουλιών σε ευαίσθητες οικολογικά ή προστατευόμενες περιοχές, οι οποίες πρέπει να μελετώνται προσεκτικά κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και χωροθέτησης του αιολικού πάρκου.

4.4. Παράδειγμα αιολικού πάρκου στην Ελλάδα

Η Κρήτη παρουσιάζει ιδιαίτερη ανάπτυξη στην αξιοποίηση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές καλύπτοντας ένα αξιόλογο μέρος των ενεργειακών αναγκών της με περιβαλλοντικά φιλικό τρόπο, αποδοτικό και οικονομικό. Η ανάπτυξη αυτή οφείλεται στην ύπαρξη καλού αιολικού δυναμικού (υψηλό), οι οποίες αποτυπώνονται στο Γενικό Αιολικό Χάρτη της Κρήτης ο οποίος δημιουργήθηκε από το εργαστήριο αιολικής ενέργειας και σύνδεσης αιολικών συστημάτων του ΤΕΙ Κρήτης, χρησιμοποιώντας τα ανεμολογικά δεδομένα 48 ανεμογράφων που βρίσκονται τοποθετημένοι σε διάφορα μέρη του νησιού για ένα χρονικό διάστημα μεγαλύτερο των δέκα ετών (Εικόνα 4.7). Στο χάρτη φαίνεται ότι στην ευρύτερη περιοχή του νησιού απαντώνται πλήθος τοποθεσιών με μέση ετήσια άνω των 8,5 m/sec και αντίστοιχους συντελεστές απασχόλησης (capacity factor) μεγαλύτερους του 40%, οι οποίες προσφέρονται για μελέτη χωροθέτησης ανεμογεννητριών.



Εικόνα 4.7: Ο χάρτης αιολικού δυναμικού της Κρήτης

Πηγή: Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας Τ.Ε.Ι. Κρήτης (www.wel.gr)

Η περιοχή της μελέτης εντοπίζεται στην οροσειρά των Αστερουσίων που βρίσκεται στο Δημοτικό Διαμερίσματος Καστελλιανών, Δήμου Αρκαλοχωρίου. Η περιοχή καταλαμβάνει μια έκταση με εμβαδόν 389.106,44 m² (εμβαδόν οικοπέδου ανεμογεννητριών) και παρουσιάζει μια αρκετά ικανοποιητική μέση ετήσια ταχύτητα ανέμου της τάξεως των 8,5 m/sec, η οποία θεωρείται εξαιρετική για το υψόμετρο και τη μορφολογία της περιοχής. Το αιολικό πάρκο συνίσταται από 14 ανεμογεννήτριες, ισχύος 3 MW η κάθε μία, οι οποίες παράγουν τριφασικό ρεύμα, ονομαστικής τάσεως 1.000 V, σε συχνότητα 50 Hz. Στο πίσω μέρος της ατράκτου κάθε ανεμογεννήτριας είναι τοποθετημένος ο μετασχηματιστής ανύψωσης τάσης 1-0,4/20kV, ονομαστικής ισχύος 3.158 kV και στην είσοδο του μετασχηματιστή συνδέεται το κύκλωμα χαμηλής τάσης της γεννήτριας σε συνδεσμολογία αστέρα, γειωμένου ουδετέρου, ενώ στην έξοδο του κυκλώματος μέσης τάσης του μετασχηματιστή συνδέονται, με συνδεσμολογία τριγώνου, τα καλώδια που οδηγούνται στον κεντρικό ηλεκτρικό

πίνακα Μέσης Τάσης της ανεμογεννήτριας. Ο μετασχηματιστής είναι εξοπλισμένος με μεταγωγείς τάσης (off-load tap changer) $\pm 2 \times 2,5\%$, παρέχοντας τη δυνατότητα προσαρμογής της τάσης λειτουργίας με την τάση του δικτύου. Οι μετασχηματιστές των ανεμογεννητριών συνδέονται στην υπόγεια γραμμή μεταφοράς της μέσης τάσης μέσω αποξυετικών κυψελών προστασίας, μεταφέροντας την ισχύ των 20 kV σε κυψέλες Μέσης Τάσης. Οι ανεμογεννήτριες είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους σε τρεις βρόγχους, οι οποίοι περιέχουν τις 14 ανεμογεννήτριες του αιολικού πάρκου.

Η κατασκευή του κεντρικού υποσταθμού του πάρκου στηρίζεται στο σύστημα των κυψελωτών πινάκων μέσης τάσης με διακόπτες SF6, τύπου UNISWITCH, κατασκευής ABB, σύμφωνα με τα συνημμένα τεχνικά στοιχεία και αποτελείται από τέσσερα πεδία:

- i. α) Δύο κυψέλες άφιξης από κάθε κλειστό βρόγχο αιολικού πάρκου, τύπου UNISWITCH/CBC 24, η κάθε μια εξοπλισμένη με ένα διαχωριστή φάσης SF6 630 A με ενσωματωμένο γειωτή, ένα αυτόματο διακόπτη ισχύος SF6 τύπου HAD US 24 KV, 630 A, 16 KA, συνδεδεμένοι με μηχανική μανδάλωση, τρεις μετασχηματιστές εντάσεως, ηλεκτρονόμο δευτερογενούς προστασίας υπερεντάσεως φάσεων/γής και τρεις χωρητικούς καταμεριστές.
- ii. β) Μια κυψέλη σύνδεσης μετασχηματιστή 20/0,4 kV, 25 kVA για την τροφοδοσία του υποσταθμού – οικίσκου ελέγχου, η οποία θα περιλαμβάνει αποξυεκτή φορτίου 24 KV, 630 A, 16 KA σε κοινό κέλυφος με γειωτή, χειροκίνητο μηχανισμό λειτουργίας για τον αποξυεκτή και το γειωτή, τρεις βάσεις ασφαλειών και ασφάλειες για την προστασία του μετασχηματιστή, μηχανική ένδειξη τηγμένης ασφάλειας και τρεις χωρητικούς καταμεριστές.
- iii. γ) Μία κυψέλη διασύνδεσης με Δ.Ε.Η. τύπου UNISWITCH /SMC 24 εξοπλισμένη με δύο μανδαλωμένους διαχωριστές φάσης SF6 630 A με ενσωματωμένο γειωτή, ένα ηλεκτροκίνητο αυτόματο διακόπτη ισχύος τύπου HAD US 24 KV, 630 A, 16 KA, τρεις μετασχηματιστές εντάσεως μέτρησης - προστασίας 400/1 – 1A cl 0,5 – 15 VA & 5P10 – 10 A, τρεις μονοπολικούς μετασχηματιστές τάσεως 3 20 / 3 1,0 / 3 1,0 KV, 50 VA, cl 0,5, καθώς και μια μονάδα προστασίας, ελέγχου και μετρήσεων τύπου REF 541, που περιλαμβάνει όλες τις απαιτούμενες προστασίες και μετρήσεις (τάση, ρεύμα, συχνότητα, ενεργός ισχύς, άεργος ισχύς, παραγόμενη / καταναλισκόμενη ενέργεια) καθώς και την ένδειξη της κατάστασης του αυτόματου διακόπτη ισχύος και τρεις χωρητικούς καταμεριστές.
- iv. δ) Μία κυψέλη βοηθητικού μετασχηματιστή 20 kV/0,4 KV, 25 kVA με διαχωριστή φάσης.

Παράλληλα σε κάθε ανεμογεννήτρια του πάρκου γίνεται διασύνδεση των καλωδίων, ισχύος και ελέγχου, μέσα στον πύργο της και εν συνεχεία τα καλώδια συνδέονται στον πίνακα ο οποίος βρίσκεται στη βάση του πύργου βάσει των προδιαγραφών της κατασκευάστριας εταιρείας. Οι ανεμογεννήτριες συνδέονται μεταξύ με υπόγειο καλώδιο μέσης τάσης 20 KV, τύπου XLPE, 12/20 KV, κατά IEC 502, διατομής 3x(1x240 mm²). Η σύνδεση λαμβάνει χώρα με τρεις κλειστούς βρόγχους με τα

καλώδια να τοποθετούνται υπόγεια σε κανάλι όδευσης καλωδίων, διαστάσεων 0,60x1,0 m, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της Δ.Ε.Η. Κάθε βρόγχος καταλήγει σε έναν Κεντρικό Πίνακα Ελέγχου Μέσης Τάσης, ο οποίος περιλαμβάνει κυψέλη εξόδου μέσης τάσης 20 KV που μετέπειτα συνδέει το αιολικό πάρκο με τον Υποσταθμό Υψηλής Τάσης (150 KV).

Το αιολικό πάρκο είναι εξοπλισμένο με ένα σύστημα γείωσης που στοχεύει στη προστασία του και τόσο ο σχεδιασμός όσο και η κατασκευή των μεταλλικών μερών της γείωσης και της αντικεραυνικής προστασίας γίνεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές της Δ.Ε.Η:

- οδηγία διανομής Νο 119 ΩΕΩ/ΤΤΕ D-23
- προδιαγραφή ASP K3/1988
- ΕΛΟΤ 1197/2002, • και με τους διεθνείς κανονισμούς:
- IEC 61936-1. First edition. 2002-10. Power installations exceeding 1kV a.c.- Part 1
- IEC 62305-1. Protection against lightning - part 1: general principles. Edition 1.0, 01/00/06.
- IEC 62305-3. Protection against lightning - part 3: physical damage to structures and life hazard. Edition 1.0, 01/00/06.
- IEC 62305-4. Protection against lightning - part 4: electrical and electronic systems within structures. Edition 06, 04/30/08.
- IEC 61400-24, Wind turbine generator systems - part 24: lightning protection. Edition 1.0, 07/00/02.

Πιο συγκεκριμένα σε κάθε αιολική εγκαθίσταται θεμελιακή γείωση, η οποία δρα ως ισοδυναμικό πλέγμα, σύμφωνα με το Φ.Ε.Κ. 8/1525/31-12-73 και αποτελείται από ένα ηλεκτρόδιο δακτυλίου και χάλκινα ηλεκτρόδια γείωσης (Ράβδοι 6 m (min.Ø16)). Το ηλεκτρόδιο δακτυλίου περιορίζει τις επικίνδυνες τάσεις επαφής για το προσωπικό που βρίσκεται κοντά στη βάση του πυλώνα, ενώ τα χάλκινα ηλεκτρόδια εξασφαλίζουν σταθερή και χαμηλή αντίσταση γείωσης για ολόκληρο το σύστημα γείωσης. Επιπροσθέτως, πάνω στην άτρακτο και στα πτερύγια κάθε ανεμογεννήτριας υπάρχουν αλεξικέραυνα, τα οποία συνδέονται με τη γεννήτρια, το μετασχηματιστή, τον πίνακα και όλα τα μεταλλικά μέρη της αιολική μηχανής (κατά I.E.C 61024-1). Ο αγωγός που συνδέει όλα τα παραπάνω, καταλήγει στη θεμελιακή γείωση, η οποία είναι η ενιαία γείωση του αιολικού πάρκου.

Κεφάλαιο 5: Νομοθεσία, αδειοδότηση και τεχνοοικονομική ανάλυση αιολικού πάρκου.

5.1. Νομοθεσία για έργα Α.Π.Ε

Στην Ελλάδα οι πρώτες προσπάθειες για την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών άρχισαν το 1985 με τον νόμο για θέματα ηλεκτροπαραγωγής από εναλλακτικές μορφές ενέργειας, ενώ η ουσιαστικότερη προσπάθεια έγινε το 1994 με τη θέσπιση ευνοϊκών ρυθμίσεων για τις Α.Π.Ε. και την κατ' επέκτασιν σημαντική εμφάνιση επενδυτικού ενδιαφέροντος από ιδιώτες. Έκτοτε έγιναν διάφορες ρυθμίσεις από το 2001 έως και το 2006, όπου θεσπίστηκε ο τελευταίος και ευνοϊκότερος νόμος για τις Α.Π.Ε.. Οι παρακάτω νομοθετικές διατάξεις είναι αυτές που αφορούν τις Α.Π.Ε.:

Ν. 2244/94: "Ρύθμιση θεμάτων Ηλεκτροπαραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και από συμβατικά καύσιμα και άλλες διατάξεις"

Ο νόμος 2244/94 καθορίζει το θεσμικό πλαίσιο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (ΑΠΕ) στην Ελλάδα, αλλάζοντας σημαντικά το τοπίο και δίνοντας ισχυρά οικονομικά κίνητρα για την ανάπτυξη των ΑΠΕ μέσω της προσέλκυσης ιδιωτικών κεφαλαίων. Βασική κατεύθυνση του ν. 2244/94 είναι η αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο, η οποία συμβαδίζει με τα μέτρα και τις διατάξεις που ισχύουν σχεδόν σε όλες τις χώρες της Ε.Ε.

Τα κύρια σημεία του ν. 2244/94 μπορούν να συνοψισθούν στα παρακάτω:

- Επιτρέπεται η παραγωγή και διάθεση ηλεκτρικής ενέργειας από ανεξάρτητους παραγωγούς (ΑΠ) εφ' όσον χρησιμοποιούνται ΑΠΕ.
- Επιβάλλεται στη ΔΕΗ η υποχρέωση να αγοράζει την ενέργεια που παράγεται από ανεξάρτητους παραγωγούς.
- Προσφέρονται ιδιαίτερα ελκυστικές και σχετικά σταθερές τιμές στους ΑΠ από ΑΠΕ που συνδέονται με τα τιμολόγια των καταναλωτών.
- Παρέχεται σταθερό επιχειρησιακό περιβάλλον με τη σύναψη μακροχρόνιων (10ετών) συμβολαίων αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Υ.Α. 8295/1995 (ΦΕΚ Β' 385): "Α. Διαδικασίες και δικαιολογητικά που απαιτούνται για την έκδοση των αδειών εγκατάστασης και λειτουργίας σταθμών ηλεκτροπαραγωγής - Β. Καθορισμός γενικών τεχνικών και οικονομικών όρων των συμβάσεων μεταξύ παραγωγών και ΖΕΗ, λεπτομέρειες διαμόρφωσης των τιμολογίων καθώς και όροι διασύνδεσης"

Με την Υπουργική Απόφαση αυτή ορίζονται οι διαδικασίες και τα απαραίτητα δικαιολογητικά που απαιτούνται για την έκδοση:

- Άδειας εγκατάστασης ή επέκτασης λειτουργίας σταθμών ηλεκτρικής ενέργειας
- Άδειες λειτουργίας σταθμών ηλεκτρικής ενέργειας

- Γενικά δικαιολογητικά σταθμών ηλεκτρικής ενέργειας
- Πρόσθετα δικαιολογητικά κατά περίπτωση
- Σύμβαση αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ ΔΕΗ και ανεξάρτητου παραγωγού.
- Καθορισμός γενικών τεχνικών και οικονομικών όρων των συμβάσεων μεταξύ παραγωγών και ΔΕΗ, λεπτομέρειες διαμόρφωσης των τιμολογίων καθώς και όροι διασύνδεσης.

N. 2647/98 (Τεύχος ΦΕΚ Α' 237/22-10/98): «Μεταβίβαση αρμοδιοτήτων στις περιφέρειες και την αυτοδιοίκηση και άλλες διατάξεις».

Με το νόμο αυτό ορίζονται οι αρμοδιότητες που μεταβιβάζονται από την Κεντρική Διοίκηση στις Περιφέρειες και την Αυτοδιοίκηση.

Οι σχετικές με την παραγωγή ενέργειας αρμοδιότητες του Υπουργού Ανάπτυξης που μεταβιβάζονται στις Περιφέρειες περιλαμβάνουν:

- Χορήγηση άδειας εγκατάστασης, λειτουργίας και επέκτασης ή ανανέωσης σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με χρήση ΑΠΕ.
- Χορήγηση άδειας χρήσης νερού σε περιπτώσεις μικρών υδροηλεκτρικών έργων καθώς και χορήγηση ενιαίας άδειας χρήσης νερού και εκτέλεσης έργου αξιοποίησης υδατικών πόρων.
- Εκμίσθωση γεωθερμικού πεδίου χαμηλής ενθαλπίας.
- Επιβολή κυρώσεων σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής.

N. 2773/99: "Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας – Ρύθμιση θεμάτων ενεργειακής πολιτικής και λοιπές διατάξεις"

Ο συγκεκριμένος νόμος καθορίζει το βασικό πλαίσιο ρύθμισης της απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας που άρχισε να ισχύει από τον Φεβρουάριο του 2001 σύμφωνα με την Οδηγία 96/92 της Ευρωπαϊκής Ένωσης και περιλαμβάνει τα εξής:

- Την σύσταση της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ) ως ανεξάρτητης και αυτοτελούς διοικητικής αρχής που εποπτεύεται από τον Υπουργό Ανάπτυξης και τις αρμοδιότητές της.
- Την σύσταση του διαχειριστή του Ηλεκτρικού Συστήματος που θα εποπτεύεται από την ΡΑΕ
- Την απελευθέρωση της παραγωγής και εκμετάλλευσης ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ, Συμπαράγωγή αλλά και από συμβατικά καύσιμα
- Την μετατροπή της ΔΕΗ σε Ανώνυμη Εταιρεία.

N. 2941/01: "Απλοποίηση διαδικασιών αδειοδότησης εταιρειών, αδειοδότησης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, ρύθμιση της Α.Ε. "ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΝΑΥΠΗΓΕΙΑ" και άλλες διατάξεις "

Οι κυριότεροι άξονες αυτού του νόμου είναι:

- Οι εξαιρέσεις, που ισχύουν για μεγάλα έργα υποδομής, επεκτείνονται και στις ΑΠΕ για την εντός δασών και δασικών εκτάσεων για την εγκατάσταση μεγάλων έργων υποδομής δημοσίου συμφέροντος.
- Η εγκατάσταση ηλιακών σταθμών και αιολικών πάρκων δεν απαιτεί έκδοση άδειας οικοδομής με εξαίρεση τα έργα πολιτικού μηχανικού.
- Έργα σύνδεσης σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με χρήση ΑΠΕ με το διασυνδεδεμένο Σύστημα μπορούν να κατασκευάζονται από οποιονδήποτε ενδιαφερόμενο επενδυτή σύμφωνα με τις παρεχόμενες προδιαγραφές από το Διαχειριστή του Συστήματος και των Δικτύων.
- Τα έργα ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ συμπεριλαμβανομένων τη σύνδεση δικτύων, υποσταθμών και υποδομής εν γένει θεωρούνται έργα δημόσιας ωφέλειας.
- Παρέχεται η δυνατότητα έκδοσης κοινής υπουργικής απόφασης με την οποία καθορίζονται ευνοϊκότεροι όροι δόμησης εκτός σχεδίου . Οι αρμόδιες Διευθύνσεις Σχεδιασμού και Ανάπτυξης των οικείων Περιφερειών για την έκδοση αδειών εγκατάστασης και λειτουργίας δρώσες κατά μια έννοια στην αρχή της μίας στάσης (one-stop shop).

Υ.Α. 2000/2002: "Διαδικασία έκδοσης αδειών εγκατάστασης και λειτουργίας σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών και τύποι συμβάσεων αγοραπωλησίας ηλεκτρικής ενέργειας"

Η Υπουργική Απόφαση αυτή καθορίζει τη διαδικασία έκδοσης αδειών εγκατάστασης ή επέκτασης, γενικά δικαιολογητικά, ειδικά δικαιολογητικά, άδειες λειτουργίας και τύποι συμβάσεων αγοραπωλησίας ηλεκτρικής ενέργειας.

Υ.Α. 1726/2003: "Διαδικασία προκαταρκτικής περιβαλλοντικής εκτίμησης και αξιολόγησης, έγκρισης περιβαλλοντικών όρων, καθώς και έγκρισης επέμβασης ή παραχώρησης δάσους ή δασικής έκτασης στα πλαίσια της έκδοσης άδειας εγκατάστασης σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας"

Με τις διατάξεις της ΚΥΑ 1726/18.04.2003 (ΦΕΚ Β' 552), ρυθμίζεται η διαδικασία προκαταρκτικής περιβαλλοντικής εκτίμησης και αξιολόγησης, έγκρισης περιβαλλοντικών όρων και έγκρισης επέμβασης ή παραχώρησης δάσους ή δασικής έκτασης στο πλαίσιο της έκδοσης άδειας εγκατάστασης σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με χρήση Α.Π.Ε. Συγκεκριμένα, ορίζονται οι αρμόδιες υπηρεσίες αδειοδότησης,

καθώς και οι γνωμοδοτούσες υπηρεσίες που συμμετέχουν στη σχετική διαδικασία. Επιπλέον, προβλέπονται τα αντικείμενα των γνωμοδοτήσεων αυτών, η διαδικασία για την έκδοση έγκρισης επέμβασης, οι προθεσμίες εντός των οποίων πρέπει να ενεργούν οι ανωτέρω αρμόδιες υπηρεσίες, καθώς και το περιεχόμενο των σχετικών φακέλων. Τέλος, παρέχεται η δυνατότητα στους ιδιοκτήτες αιολικών πάρκων να μεταβάλουν μέχρι 15% την ισχύ του και να χωροθετούν εκ νέου τις ανεμογεννήτριες χωρίς να απαιτείται τροποποίηση των περιβαλλοντικών όρων ή της άδειας εγκατάστασης

5.2. Αδειοδότηση αιολικού πάρκου

Η διαδικασία αδειοδότησης των αιολικών εγκαταστάσεων εξαρτάται άμεσα από από την ισχύ των αιολικών πάρκων. Έτσι σε χαμηλές έως μεσαίες τιμές ισχύος, η διαδικασία είναι λιγότερο γραφειοκρατική και κατ' επέκτασιν γρηγορότερη σε σχέση με την εγκατάσταση μεγάλης ισχύος αιολικών πάρκων, όπου απαιτούνται περισσότερες και πολυπλοκότερες διαδικασίες. Πιο συγκεκριμένα, η αδειοδοτική διαδικασία των αιολικών πάρκων είναι δυνατόν να διακριθεί σύμφωνα με την ισχύ τους στις εξής κατηγορίες:

- ✓ Αιολικά πάρκα ισχύος έως 20KW
- ✓ Αιολικά πάρκα ισχύος από 20-100KW
- ✓ Αιολικά πάρκα ισχύος από 100KW-2MW
- ✓ Αιολικά πάρκα ισχύος άνω των 2MW

Αιολικά πάρκα ισχύος έως 20KW

Για τα αιολικά πάρκα με ισχύ έως 20KW δεν απαιτείται περιβαλλοντική αδειοδότηση ενώ παράλληλα εξαιρούνται από την έκδοση άδειας παραγωγής, άδειας εγκαταστάσεως και άδειας λειτουργίας, κάτι το οποίο καθιερώθηκε έπειτα από αίτηση προς τη ΡΑΕ.

Αιολικά πάρκα ισχύος από 20-100KW

Οι εγκαταστάσεις με ισχύ από 20KW έως 100KW απαιτούν περιβαλλοντική αδειοδότηση, η οποία περιλαμβάνει τα παρακάτω στάδια. Αρχικά ο ενδιαφερόμενος υποβάλλει αίτηση για διενέργεια Προκαταρκτικής Περιβαλλοντικής Εκτίμησης και Αξιολόγησης (ΠΠΕΑ) η οποία συνοδεύεται από Προμελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΠΠΕ) στη διεύθυνση Περιβάλλοντος Χωροταξίας (3ΠΠΕΧ) της οικείας Περιφέρειας, συνοδευόμενη από την εκδοθείσα απόφαση εξαίρεσης άδειας παραγωγής. Εντός 15 ημερών από τον Γενικό Γραμματέα της Περιφέρειας, η σχετική απόφαση ΠΠΕΑ και εν συνεχεία διαβιβάζεται στο Οικείο Νομαρχιακό Συμβούλιο προκειμένου να ενημερωθούν οι πολίτες. Με την απόφαση αυτή και την επικαιροποιημένη ΠΠΕ ο ενδιαφερόμενος υποβάλλει αίτηση για Έγκριση

Περιβαλλοντικών Όρων (ΕΠΟ) στη διεύθυνση Σχεδιασμού και Ανάπτυξης (ΔΙ.ΣΑ.) της Οικείας Περιφέρειας, η οποία εγκρίνεται μετά από 1.5 μήνες και ενημερώνεται το οικείο Νομαρχιακό Συμβούλιο.

Αιολικά πάρκα ισχύος από 100KW-2MW

Για τις εγκαταστάσεις με ισχύ από 100KW-2MW καταθέτει στη αίτηση στην ΡΑΕ, η οποία προωθεί ένα αντίγραφο στη ΔΙΠΕΧ1 της αντίστοιχης Περιφέρειας. Στην Υπηρεσία της Περιφέρειας ο ενδιαφερόμενος υποβάλλει τα υπόλοιπα δικαιολογητικά για τη διενέργεια ΠΠΕΑ και με το πέρας 45 ημερών η Περιφέρεια διαβιβάζει στη ΡΑΕ ένα θεωρημένο αντίγραφο του φακέλου που περιέχει την ΠΠΕ μαζί με τη σχετική γνωμοδότηση, ώστε να προχωρήσουν οι διαδικασίες για την έκδοση της άδειας παραγωγής. Στη συνέχεια, ο ενδιαφερόμενος υποβάλλει αίτηση για Έγκριση Περιβαλλοντικών Όρων (ΕΠΟ) στη Διεύθυνση Σχεδιασμού και Ανάπτυξης (ΔΙ.ΣΑ.) της Οικείας Περιφέρειας, η οποία εγκρίνεται μετά από 1.5 μήνες και ενημερώνεται σχετικά και το οικείο Νομαρχιακό Συμβούλιο. Ακόμη, ο δικαιούχος πρέπει να έχει ήδη κάνει αίτηση για προσφορά σύνδεσης στο διαχειριστή του συστήματος, ο οποίος πρέπει να εκδώσει την προσφορά σύνδεσης μέσα σε 4 μήνες. Έτσι ο δικαιούχος υπογράφει την Σύμβαση σύνδεσης και πώλησης και προβαίνει σε αίτηση για την έκδοση άδειας λειτουργίας στο Νομάρχη ο οποίος είναι υπεύθυνος για την έκδοση της άδειας εγκατάστασης. Σε ένα τελικό στάδιο μετά την αίτηση του δικαιούχου, κλιμάκιο της υπηρεσίας ή του ΚΑΠΕ ελέγχει την εγκατάσταση και εκδίδει την άδεια λειτουργίας εντός 20 ημερών από τον έλεγχο.

Αιολικά πάρκα ισχύος άνω των 2MW

Η διαδικασία αδειοδότησης εγκαταστάσεων άνω των 2MW είναι παρόμοια με αυτήν της προηγούμενης κατηγορίας με τη διαφορά ότι υπεύθυνος για την έκδοση άδειας εγκατάστασης είναι ο Υπουργός Ανάπτυξης, ο οποίος εκδίδει μέσα 15 ημέρες μετά από έλεγχο των δικαιολογητικών την άδεια εγκατάστασης. η άδεια λειτουργίας εκδίδεται από τον Υπουργό Ανάπτυξης μετά από έλεγχο κλιμακίου του Υπουργείου ή του ΚΑΠΕ.

5.3. Τεχνοοικονομική ανάλυση αιολικού πάρκου

Η τεχνοοικονομική μελέτη ενός αιολικού πάρκου περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

1. Εντοπισμός υποψήφιων τοποθεσιών για την εγκατάσταση του αιολικού πάρκου
2. Μετρήσεις αιολικού δυναμικού-Μετεωρολογικές μετρήσεις
3. Επιλογή ανεμογεννήτριας και χωροθέτηση έργου

4. Κατασκευή έργων υποδομής -Σύνδεση του αιολικού πάρκου στο ηλεκτρικό δίκτυο
5. Οικονομοτεχνική μελέτη
6. Διαδικασία αδειοδότησης αιολικού πάρκου.

1. Εντοπισμός υποψήφιων τοποθεσιών για την εγκατάσταση του αιολικού πάρκου

Αρχικό βήμα της δημιουργίας ενός αιολικού πάρκου είναι η επιλογή του χώρου εγκατάστασης του, ο οποίος θα εξασφαλίζει την οικονομοτεχνική βιωσιμότητα της μελλοντικής εγκατάστασης ενώ παράλληλα θα παρουσιάζει και τη μεγαλύτερη κοινωνική αποδοχή και θα διαβεβαιώνει ότι η εγκατάσταση των ανεμογεννητριών δε θα αλλοιώσει το περιβάλλον και δεν θα προξενήσει προβλήματα στην γενική περιοχή. Οι περιοχές ενδιαφέροντος ανήκουν συνήθως σε περιοχές αιολικής προτεραιότητας (χάρτη αιολικού δυναμικού), ενώ επίσης πρέπει να είναι προσπελάσιμες από τα συνήθη μεταφορικά μέσα και να έχουν πρόσβαση σε λιμάνια ή συγκοινωνιακούς κόμβους. Επιπλέον απαραίτητο είναι η περιοχή εγκατάστασης να βρίσκεται κοντά στο εθνικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να καθίσταται δυνατή η μεταφορά του ρεύματος. Ορισμένοι παράγοντες που συνυπολογίζονται για την επιλογή της θέσης εγκατάστασης είναι οι εξής:

- Υψηλό αιολικό δυναμικό
- Οικονομικές αποδοτική και συμφέρουσα παραγωγή ενέργειας.
- Επιπτώσεις στο περιβάλλον (οπτικοαισθητική επίδραση, επιδράσεις στα πουλιά, ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση, θόρυβος).
- Κανονισμοί και περιορισμοί στη χρήση γης (ιδιοκτησία εδαφικών εκτάσεων)
- Απαιτούμενες ελάχιστες αποστάσεις από διάφορες υποδομές
- Δυνατότητα πραγματοποίησης απαιτούμενων έργων υποδομής
- Ύπαρξη σχετικά ομαλών μετεωρολογικών συνθηκών

Αξίζει να αναφερθεί ότι κατά την διαδικασία επιλογής της θέσης λαμβάνονται υπόψιν οι τοπικοί νόμοι και κανονισμοί, οι οποίοι είναι πιθανό να εμποδίσουν τη χρησιμοποίηση της γης για την εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου. Πιο συγκεκριμένα, οι νόμοι αυτοί σχετίζονται με την προστασία ιστορικών και αρχαιολογικών χώρων και την προστασία του περιβάλλοντος με τη διατήρηση των τοπικών οικοσυστημάτων. Επιπροσθέτως, αποφεύγονται περιοχές με έντονη σεισμικότητα, προβλήματα κατολισθήσεων ή βραχώδεις περιοχές οι οποίες δεν ευνοούν τη μεταφορά και θεμελίωση των αιολικών μηχανών. Η τελική επιλογή της ακριβούς θέσης εγκατάστασης απαιτεί συνήθως μια χρονική περίοδο περίπου 18 με 24 μηνών και τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια σαφής τάση περιορισμού της απαιτούμενης έκστασης μέσω της εγκατάστασης μεγαλύτερων και κατά συνέπεια λιγότερων αιολικών μηχανών είτε με την πυκνότερη διάταξή τους στα αιολικά πάρκα.

2. Μετρήσεις αιολικού δυναμικού-Μετεωρολογικές μετρήσεις

Οι μετεωρολογικές συνθήκες έχουν ιδιαίτερη σημασία τόσο για την επιλογή της θέσεως όσο και για μετέπειτα στάδια της μελέτης.

Ø Η υγρασία και οι συχνές βροχοπτώσεις.

Η παρουσία υψηλής υγρασίας επιταχύνει φαινόμενα οξείδωσης και διάβρωσης των αιολικών μηχανών, ενώ αντίθετα αυξάνει την πυκνότητα του αέρα, η οποία σε συνθήκες κορεσμού δημιουργεί σταγόνες νερού πάνω στα πτερύγια αλλοιώνοντας έτσι την αεροδυναμική τους συμπεριφορά και συμβάλλοντας στην πρόωρη αποκόλληση του οριακού στρώματος και πρόωρη απώλεια στήριξης τους.

Ø Ο παγετός

Η παρουσία πάγου στα διάφορα τμήματα της εγκατάστασης αυξάνει τη στατική και δυναμική καταπόνηση και επίσης καθίσταται δυνατή η εκτόξευση τμημάτων πάγου κατά την περιστροφή των πτερυγίων αλλά και η καταστροφή των ανεμομέτρων ή των συστημάτων ελέγχου της εγκατάστασης.

Ø Το υψόμετρο και η θερμοκρασία σε συνάρτηση με την αποδιδόμενη ισχύ μιας ανεμογεννήτριας.

Ø Η συχνότητα εμφάνισης υπερβολικά ισχυρών ανέμων (>9 Beaufort).

Η μελέτη των διαθέσιμων ανεμολογικών στοιχείων συμβάλλει στην επιλογή κατασκευών οι οποίες είναι ικανές να λειτουργούν σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου και παράλληλα είναι στιβαρές ώστε να επιβιώνουν σε απρόσμενες και δυσμενείς ανεμολογικές συνθήκες.

Ø Η έντονη τύρβη της περιοχής εγκατάστασης

Η παρουσία έντονης τριβής έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή μεταβολή του μέτρου και της διεύθυνσης του ανέμου, συντελώντας έτσι στην κόπωση των υλικών της κατασκευής και στην κατ' επέκτασιν μείωση της διάρκειας ζωής της ανεμογεννήτριας και αύξηση του κόστους συντήρησης της αιολικής εγκατάστασης.

Ø Τα μεταφερόμενα υλικά από τον άνεμο, τα οποία προκαλούν σημαντικά προβλήματα στα διάφορα τμήματα της αιολικής μηχανής.

Ø Η σταθερότητα των πνεόντων ανέμων σε μία περιοχή εξασφαλίζει την αύξηση του χρόνου ζωής της εγκατάστασης και την ομαλότερη λειτουργία της.

Όσον αφορά τις μετρήσεις αιολικού δυναμικού, συνιστούν το σημαντικότερο στάδιο για την ανάπτυξη των αιολικών πάρκων και κάθε μορφής αιολικής εφαρμογής. Ειδικότερα, αποτελούν απαραίτητη προϋπόθεση για την επιλογή της θέσεως ενός αιολικού πάρκου αλλά και της διάταξης των αιολικών μηχανών σε αυτό, προσδιορίζοντας τα ανεμολογικά χαρακτηριστικά μια περιοχής. Έχει ήδη αναφερθεί παραπάνω πως ως αιολικό δυναμικό ορίζεται η ποσότητα ενέργειας ανά μονάδα

χρόνου που είναι δυνατόν να δεσμευτεί ανά μονάδα επιφάνειας, η οποία προσβάλλεται από τον άνεμο και προσδιορίζεται μέσω της ετήσιας κατανομής της ταχύτητας του ανέμου. Η καταλληλότερη επιλογή τοποθεσίας σε σχέση με το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό καθορίζεται από τις εξής παραμέτρους:

- ο Υψηλή μέση ταχύτητα ανέμου
- ο Αιολικό δυναμικό υψηλής ποιότητας (μεγάλη διάρκεια ισχυρών ανέμων και περιορισμένη ύπαρξη περιόδων νηνεμίας)
- ο Απουσία αποφράξεων του ανέμου και υψηλών εμποδίων.

Σύμφωνα με τις παραπάνω παραμέτρους, περιοχές με υψηλό ενδιαφέρον είναι οι κορυφές λείων και κυκλοτερών λόφων με ελαφρές κατωφέρειες και ανοιχτό ορίζοντα καθώς επίσης περιοχές με ανοιχτές πεδιάδες, σε ακρογιαλιές ή στα ανοίγματα των βουνών που δημιουργούν φυσικούς επιταχυντές ανέμου (ρεύματα αέρα). Πέραν του αιολικού δυναμικού, το οποίο είναι διαθέσιμο μέσω του χάρτη αιολικού δυναμικού είναι απαραίτητο να υπολογίζεται το τεχνικά αξιοποιήσιμο αιολικό δυναμικό αλλά και η ακριβής μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του χρόνου με τη βοήθεια της κατανομής Weibull.

3. Επιλογή ανεμογεννήτριας και χωροθέτηση έργου

Σε επόμενο βήμα υλοποιείται ο πλήρης και σωστότερος τεχνικός σχεδιασμός της εγκατάστασης, ο οποίος καθορίζει τον τύπο της ανεμογεννήτριας και τη χωροθέτηση των αιολικών μηχανών του αιολικού πάρκου. Η επιλογή της ανεμογεννήτριας στηρίζεται σε ανεμολογικά δεδομένα και στην τοπογραφία της περιοχής. Ορισμένα από τα κριτήρια επιλογής της αιολικής μηχανής είναι:

- i. η συνολική ονομαστική ισχύ του αιολικού πάρκου
- ii. το μέγεθος και η δυνατότητα μεταφοράς και εγκατάστασής της στην επιλεγείσα θέση
- iii. οι τεχνικές προδιαγραφές και η δυνατότητα εναρμόνισής της με το δίκτυο
- iv. οι οικονομικές προσφορές των εταιριών

Χαρακτηριστικό παράδειγμα επιλογής ανεμογεννήτριας είναι το μοντέλο V82 της Δανέζικης εταιρίας Vestas, το οποίο παρουσιάζει ονομαστική ισχύ εξόδου 1.65 Mw, ύψος πύργου 78 m, διάμετρο ρότορα 82 m και επιφάνεια παραλαβής ισχύος από τα πτερύγια 5.281m².

Εν συνεχεία, υλοποιείται η χωροθέτηση των ανεμογεννητριών του πάρκου, η οποία περιλαμβάνει την επιλογή συγκεκριμένων θέσεων τοποθέτησης των αιολικών μηχανών. Ο αιτούμενος χώρος που θα πρέπει να καταλαμβάνει μια ανεμογεννήτρια έχει οριστεί από υπουργικές αποφάσεις και αντιστοιχεί σε επιφάνεια κύκλου με κέντρο το κέντρο της αιολικής μηχανής και ακτίνα 36 m. Επιπλέον, για τη διαδικασία χωροθέτησης λαμβάνονται υπόψιν όλοι οι παράμετροι που επηρεάζουν την λειτουργία και την απόδοση των ανεμογεννητριών αλλά και οι χωροταξικοί

περιορισμοί των ισχυόντων κανονισμών και διατάξεων για τη χωροθέτηση των αιολικών πάρκων. Αναλυτικότερα, η απόσταση μεταξύ των αιολικών μηχανών πρέπει να ισούται με 2.5 διαμέτρους του δρομέα ώστε να αποφεύγονται φαινόμενα αλληλεπίδρασης που σχετίζονται με τη μείωση της παραγωγής και της διάρκειας ζωής των ανεμογεννητριών. Παράλληλα, εκτιμώνται: α) η απόσταση εντός σειράς μεταξύ των ανεμογεννητριών, β) η απόσταση μεταξύ των σειρών των ανεμογεννητριών και γ) το μέγεθος της περιφράξης της εγκατάστασης, ενώ σε τελικό στάδιο πραγματοποιείται η ενεργειακή μελέτη καθορισμού της αναμενόμενης ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το αιολικό πάρκο.

4. Κατασκευή έργων υποδομής -Σύνδεση του αιολικού πάρκου στο ηλεκτρικό δίκτυο

Τα έργα υποδομής ενός αιολικού πάρκου περιλαμβάνουν κυρίως χωματουργικές εργασίες και έργα πολιτικού μηχανικού όπως: α) εσωτερική οδοποιία, β) πλατείες γύρω από την κάθε ανεμογεννήτρια (0,8 έως 3,0 στρέμματα), γ) κεντρικός οικίσκος ελέγχου (50-120 μ.τ.) και δ) κανάλι υπόγειας καλωδίωσης.

Ø Δρόμοι πρόσβασης και εσωτερική οδοποιία κατά μήκος του αιολικού πάρκου

Ένα από τα βασικά έργα υποδομής είναι η οδοποιία, η οποία περιλαμβάνει τη διαμόρφωση του υπάρχοντος δρόμου ώστε να είναι εύκολα προσπελάσιμος κατά την μεταφορά και ανέγερση του εξοπλισμού ή τη διάνοιξη νέου που θα οδηγεί στον χώρο της κατασκευής. Επίσης, προβλέπεται η διάνοιξη δρόμων με οδόστρωμα από συμπιεσμένο υλικό λατομείου (3A), πάχους 10 cm για την πρόσβαση σε κάθε θέση εγκατάστασης ανεμογεννητριών, στην άκρη των οποίων υπάρχει το κανάλι των υπογείων καλωδίων, σκεπασμένο με υλικά λατομείου.

Ø Εκσκαφές θεμελίων ανεμογεννητριών

Οι εκσκαφές των θεμελίων είναι τετραγωνικής διατομής με ενδεικτικές διαστάσεις 12 x12 μέτρων και παρουσιάζουν ένα βάθος 2.5 μέτρων περίπου. Οι τελικές διαστάσεις των θεμελίων καθορίζονται ακριβώς από τη μελέτη θεμελίωσης των ανεμογεννητριών και τα προϊόντα της εκχωμάτωσης παραμένουν σε μικρή απόσταση ώστε να χρησιμοποιούνται μετά την σκυρόδεση του θεμελίου για την επιχωμάτωση του. Πριν την σκυρόδεση διαμορφώνεται κατάλληλα η κυκλική επιφάνεια για να μην υπάρχει καμία υψομετρική διαφορά, ενώ οι εκσκαφές των βάσεων των ανεμογεννητριών γίνονται σε υγιή και βραχώδη εδάφη, ώστε οι κύριες τάσεις που μεταβιβάζονται στο κυκλικό θεμέλιο της ανεμογεννήτριας να διασφαλίζουν την αντοχή του υλικού.

Ø Εκσκαφές καναλιών καλωδιώσεων μέσης τάσης και σημάτων ελέγχου

Κατά μήκος του εσωτερικού δρόμου του αιολικού πάρκου πραγματοποιούνται εκσκαφές καναλιών καλωδιώσεων μέσης τάσης και σημάτων ελέγχου, όπου

διανοίγονται κανάλια πλάτους 0.7m και βάθους 1.2m, οι οποίες καθορίζονται από τους ηλεκτρολογικούς κανονισμούς και τις οδηγίες της ΔΕΗ.

Ø Επιχωματώσεις - Διαμόρφωση περιβάλλοντος χώρου

Σε επόμενο στάδιο λαμβάνουν χώρα οι απαραίτητες επιχωματώσεις που ορίζονται από τις σχετικές προμελέτες και συνεισφέρουν στην γενικότερη διαμόρφωση του περιβάλλοντα χώρου. Ιδιαίτερα σημαντικό σημείο είναι η επαναφορά στη φυσική-αρχική κατάσταση του χώρου ώστε να μειώνεται στο ελάχιστο η τεχνική παρέμβαση.

Ø Μεταφορά και εγκατάσταση των ανεμογεννητριών

Η μεταφορά των ανεμογεννητριών συντελείται συνήθως με μεγάλα εμπορικά πλοία και εν συνεχεία με ειδικά φορτηγά έως το σημείο εγκατάστασης του αιολικού πάρκου. Ο χρόνος ολοκλήρωσης της διαδικασίας ποικίλλει ανάλογα με το μέγεθος και τον αριθμό των ανεμογεννητριών, το μέσο μεταφοράς τους, την απόσταση από την τοποθεσία εγκατάστασης, τη δυνατότητα πρόσβασης στην περιοχή και άλλες συνθήκες που επηρεάζουν τη μεταφορά (μηχανικές βλάβες, ατυχήματα, κακοκαιρία). Με την άφιξη στο χώρο κατασκευής πραγματοποιείται η ανέγερση της κάθε ανεμογεννήτριας στο κατάλληλο ύψος.

Σε επόμενο στάδιο γίνεται η σύνδεση του αιολικού πάρκου με το ηλεκτρικό δίκτυο, το οποίο λειτουργεί για την Ελλάδα αλλά και την υπόλοιπη Ευρώπη με τριφασικό ρεύμα στη συχνότητα των 50 Hz. Η μεταφορά μεγάλης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας με ελάχιστες απώλειες υλοποιείται μέσω του διασυνδεδεμένου δικτύου υψηλής τάσης και ο τεχνικός εξοπλισμός και το κόστος της σύνδεσης στο δίκτυο προσδιορίζονται από τέσσερις παράγοντες: α) την απόσταση των ανεμογεννητριών από το δίκτυο, β) την τάση και την ικανότητα μεταφοράς του δικτύου, γ) τον έλεγχο της ισχύος και τον ηλεκτρικό εξοπλισμό των ανεμογεννητριών και δ) τις τεχνικές απαιτήσεις της χρησιμότητας για τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούνται παράλληλα με το δίκτυο. Επιπλέον, στα βασικά κριτήρια, τα οποία εξετάζονται προκειμένου να επιτραπεί η σύνδεση νέων εγκαταστάσεων παραγωγής, εντάσσονται τα εξής:

- Επάρκεια δικτύου (γραμμών, μετασχηματιστών κλπ.)
- Συμβολή στη στάθμη βραχυκύκλωσης
- Αργές μεταβολές της τάσης μόνιμης κατάστασης
- Ταχείες μεταβολές της τάσης
- Εκπομπές flicker
- Εκπομπές αρμονικών
- Διαμόρφωση των προστασιών της διασύνδεσης εγκαταστάσεων-δικτύου
- Επίπτωση στη λειτουργία συστημάτων Τηλεχειρισμού Ακουστικής Συχνότητας (ΤΑΣ)

5. Οικονομοτεχνική μελέτη

Σε ένα τελικό στάδιο της κατασκευής ενός αιολικού πάρκου λαμβάνει χώρα η οικονομοτεχνική μελέτη, η οποία αναλύει το κατά πόσο είναι επικερδής η συγκεκριμένη επένδυση, πόσο χρόνο χρειάζεται για να γίνει η απόσβεση του αρχικού κεφαλαίου και ποια θα είναι η καθαρή αξία του έργου. Η Ελληνική και η Ευρωπαϊκή νομοθεσία στοχεύοντας στην ανάπτυξη των Α.Π.Ε. παρέχει αξιόλογες επιδοτήσεις σε ποσοστό μέχρι και 100% (VALOREN), ενώ η κατασκευή ενός αιολικού πάρκου αποτελεί μια ιδιαίτερα προσοδοφόρα επένδυση. Ένα από τα εργαλεία λήψης αποφάσεων που δημιουργήθηκε με την συμβολή μεγάλου αριθμού ειδικών από την κυβέρνηση του Καναδά είναι το λογισμικό Ανάλυσης έργων καθαρής ενέργειας RETScreen International, το οποίο παρέχεται δωρεάν και χρησιμοποιείται ευρέως και σε παγκόσμιο επίπεδο για την εκτίμηση της ενεργειακής παραγωγής και εξοικονόμησης ενέργειας, του υπολογισμού του κόστους κύκλου ζωής, την εκτίμηση μείωσης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την οικονομική ανάλυση διαφόρων τεχνολογιών ενεργειακής απόδοσης και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Στο λογισμικό περιέχονται βάσεις δεδομένων με προϊόντα, το κόστος τους και διάφορα κλιματολογικά δεδομένα, συνοδευόμενα από ένα αναλυτικό online εγχειρίδιο χρήστη. Το Retcreen αποτελείται από λογιστικά φύλλα Excel που περιλαμβάνουν τα εξής στοιχεία:

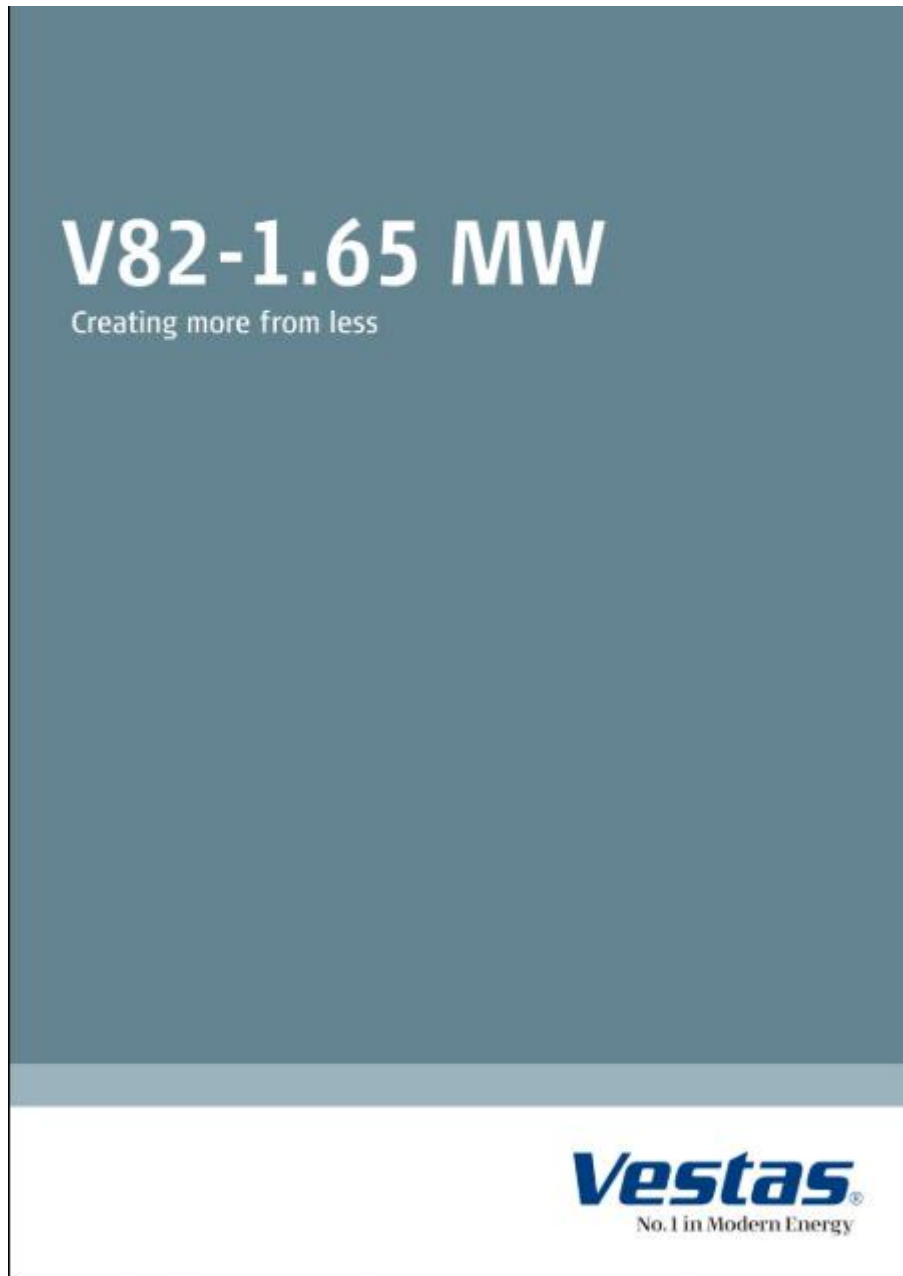
- Εισαγωγή: περιέχει το όνομα και την τοποθεσία του έργου, τον τύπο του και την τεχνολογία που χρησιμοποιείται, καθώς και στοιχεία που αφορούν τις μετεωρολογικές συνθήκες.
- Ενεργειακό μοντέλο: περιλαμβάνει μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής εγκατάστασης και τα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας που πρόκειται να εγκατασταθεί, την ισχύ και το ύψος της, τον αριθμό των ανεμογεννητριών και διάφορους συντελεστές που σχετίζονται με την απόδοση της ανεμογεννήτριας.
- Ανάλυση κόστους: πραγματοποιείται για την εκτίμηση των δαπανών που συνδέονται με τη δημιουργία ενός αιολικού πάρκου (τύπος της ανάλυσης, δαπάνες σχεδιασμού και λειτουργίας του έργου).
- Ανάλυση συνεισφοράς στο φαινόμενο θερμοκηπίου: υπολογίζει διάφορες παράμετροι σχετικά με τα αέρια του θερμοκηπίου και τη μείωσή τους μέσω της χρήσης της αιολικής ενέργειας.
- Οικονομική ανάλυση: εκτιμώνται διάφορες οικονομικές παράμετροι σχετικά με την αιολική ενέργεια που αξιοποιείται και τα οικονομικά οφέλη που απορρέουν από τη χρήση της.
- Ανάλυση επικινδυνότητας: συνεισφέρει στην εκτίμηση της ευαισθησίας σημαντικών οικονομικών δεικτών σε σχέση με βασικές τεχνικές και οικονομικές παραμέτρους.

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία αναλύθηκε πλήρως η λειτουργία των ανεμογεννητριών και κατ' επέκτασιν των αιολικών πάρκων. Στα βασικά συμπεράσματα της εργασίας εντάσσεται η θετική συμβολή της αιολικής ενέργειας στην αναβάθμιση της ποιότητας ζωής των ανθρώπων, στην προστασία του περιβάλλοντος και στη βιώσιμη ανάπτυξη, στη βελτίωση της οικονομίας και παράλληλα υπογραμμίστηκε η αναγκαιότητα χρήσης της σε σχέση με άλλες συμβατικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας. Επιπροσθέτως, αξίζει να αναφερθεί ότι η κατασκευή αιολικών πάρκων στην Ελλάδα καθίσταται μια ιδιαίτερα καλή επενδυτική κίνηση, αφού το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό της χώρας εξασφαλίζει αξιόλογα οικονομικά αποτελέσματα.

Παράρτημα

Το παράρτημα της εργασίας μας περιέχει το τεχνικό φυλλάδιο της ανεμογεννήτριας Vestas V-82.





Optimised for low and medium winds

With its large rotor and powerful generator, the T10 is an excellent performance solution for sites with low and medium wind conditions. The blades use the latest technology to ensure that the rotor captures the maximum power from the prevailing wind, while minimising loads and controlling output. Adaptive blades enhance performance in conditions and allow its internal speed controller to adjust output at 1 or 2 Hz. Together T10 achieves an excellent performance that offers a sustainable performance at a cost-effective price.

Grid compliance

In order to ensure compliance of the turbines at present and in the future, they feature an advanced algorithm able to play an active management role for the T10 specific grid demands, and with the installation of an advanced grid compliance system, the T10 will be fully compliant for the grid. The turbine can run at full capacity during grid outages. Active grid support features full load and pitch system compensation to support power for power regulation and thus help prevent the loss of energy. However, our grid support provides additional active and reactive power regulation to maintain voltage balance in the grid as well as full ride-through in the event of disturbances.

High reliability

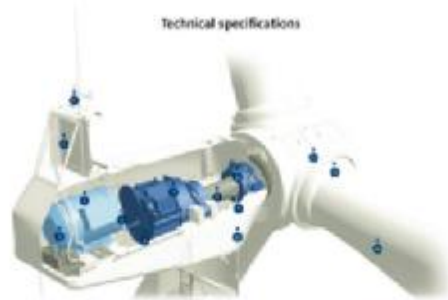
The T10 has been certified by TÜV for meeting the highest standards in the wind industry globally, including design, safety, service and maintenance costs. The turbine has a high degree of operational availability, an advanced pitch system to ensure thorough tested design of pitch drive modules. In addition, more than 1,000 total hours of testing have been conducted on sites with conditions ranging from severe to typical.

Proven Performance

Wind power plants require substantial investments, and the power cost is a major factor. In order to ensure the best and most profitable returns, it is essential to have the best quality energy production, power quality and lowest cost.

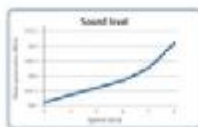
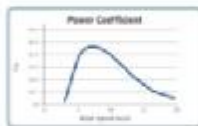
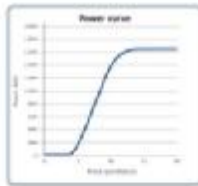
We spend months testing and documenting power performance across all major turbines. We are particularly satisfied for our independent testing organisations to verify the results in a precise and reliable manner. This means that you can expect the wind turbine to deliver the best performance in terms of both cost and quality. See page 8.

Technical specifications



- Tower
- Generator
- Gearbox
- Pitch system
- Pitch drive
- Pitch gear
- Active generator
- Transformer
- Grid connection
- Pitch control
- Pitch controller
- Pitch motor
- Pitch bearing
- Pitch support
- Pitch controller

Figure 1: Tower and nacelle components



Rotor	
Material	FRP
Blade length	47.00 m
Blade diameter	94.00 m
Number of blades	3
Drive	Active design
Pitch system	Full load with 1 Hz control
Pitch range	±90°
Tower	
Height	100 m
Height to nacelle	94 m
Height to hub	98 m
Operational data	
Tip speed ratio	7.5
Rated power	1.0 MW
Rated wind speed	11 m/s
Start speed	3 m/s
Generator	
Type	Active generator with control
Rated power	1.0 MW
Rated voltage	690 V
Gearbox	
Type	Planetary gearbox
Control	
Type	Microprocessor based controller with 20 Hz resolution and digital output for monitoring, digital regulation and communication to SCADA
Weight	
Generator	10 t
Gearbox	10 t
Tower	10 t
Hub	10 t
Pitch system	10 t
Pitch gear	10 t
Pitch motor	10 t
Pitch bearing	10 t
Pitch support	10 t
Pitch controller	10 t
Pitch motor	10 t
Pitch bearing	10 t
Pitch support	10 t
Pitch controller	10 t

Figure 2: Technical specifications

Creating more from less



With the T10 wind turbine, Siemens has created a turbine with a large rotor, active generator and pitch system, which are grid compliant even at lower wind speeds. This means that investments in grid compliance at the turbine level can be avoided.

The T10 is particularly competitive in low wind sites or areas with low and medium winds. It is designed to operate at a tip speed ratio of 7.5, which is lower than the 8.0 tip speed ratio of other turbines. The T10 operates in a wider range of wind speeds, from 3 to 25 m/s.

Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

Charman Stephen, Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003

Shembilli T., Μελέτη ανάπτυξης αιολικού πάρκου στην Κρήτη, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολογίας, Ιούνιος 2010

Αλεξάκης Αλ., Αιολική Ενέργεια, εκδόσεις Μιχ. Σιδέρης, Αθήνα 2002

Βάταλης Α., Αιολική ενέργεια – Μελέτη του αιολικού δυναμικού τεσσάρων περιοχών του νομού Θεσσαλονίκης, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Φυσικής, Θεσσαλονίκη 2013

Βλάχος Ν., Χριστόπουλος Ι., Μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε ένα αιολικό πάρκο, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολογίας, Καβάλα 2012

Γαρίνη Ε., Ανάλυση διαθεσιμότητας και βαθμού χρησιμοποίησης αιολικών συστημάτων, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πάτρα 2012

Γιαννακόπουλος Π., Καταγραφή επιπτώσεων αιολικών πάρκων στο περιβάλλον μέσω ερωτηματολογίων σε ανθρώπους που κατοικούν σε τριγύρω περιοχές που περιβάλλονται από αιολικά πάρκα και από ανθρώπους που κατοικούν σε περιοχές όπου πρόκειται να γίνουν αιολικά πάρκα, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολογίας, Ηράκλειο 2012

Θυμάκης Γ., Τσουνής Δ., Μελέτη αιολικού πάρκου ισχύος 2.4 MV, Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Ηλεκτρολογίας, Αθήνα 2013

Καλδέλλης Ιωάννης Κλεάνθη, Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας, , εκδόσεις Αθ. Σταμούλης, Αθήνα 1999

Κάλφα Μ., Παραγωγή, Μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας, Εκδόσεις Ίων, 1997

Κοζυράκης Γιώργος, Σαραντίδης Γιάννης, Τσαμπάκης Κώστας, Χρηστάκης Δημήτρης κ.α., Εργαστήριο Αιολικής Ενέργειας και Σύνδεσης Αιολικών Συστημάτων ΤΕΙ Κρήτης, τεχνική έκθεση 63/2003(2003)

Μηλιώνης Α.-Γ., Ανάλυση και διαχείριση ρίσκου σε έργα ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Η/Υ, Χανιά 2014

Μπεργελές Γ., Ανεμοκινητήρες, εκδόσεις Συμεών, Αθήνα 1994

Πανίδης Α., Αιολική ενέργεια-Αιολικά πάρκα, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Καβάλας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Μηχανολογίας, Καβάλα 2013

Πελοποννήσιος Ε., Αιολική ενέργεια- Μελέτη και εφαρμογές, Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Ηλεκτρολογίας

Σαουνάτσου Ε., Αιολική ισχύς στην Κρήτη παρούσα κατάσταση και προοπτικές, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά 2010

Χασικίδη Ε.-Φ., Αιολική Ενέργεια σε Ελλάδα και Ευρώπη, Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Διοίκησης & Οικονομίας, Τμήμα Διοίκησης Επιχειρήσεων, Πάτρα 2010

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi “Wind Energy Handbook”, John Wiley & Sons, 1st edition, November 15, 2001.

Πηγές στο διαδίκτυο

Energyworks <http://www.energyworks.gr/gr/50kw.html>

European Wind Energy Association (EWEA) <http://www.ewea.org/>

Global Wind Energy Council (GWEC) <http://www.gwec.net/>

Invonio powering the future <http://medilab.pme.duth.gr/invonio/wind-power.html>

The Reliawind project <http://www.reliawind.eu>

Vestas <http://www.vestas.com/>

Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP) <http://www.wasp.dk/index.htm>

Windpower engineering and development <https://www.windpowerengineering.com>

Wind turbines and the environment: Landscape www.windpower.org

Wind Turbines and Windfarms Database http://www.thewindpower.net/index_en.php

Δημόσια ανοικτά δεδομένα: Υπουργείο Περιβάλλοντος ενέργειας και κλιματικής αλλαγής, Ειδική Γραμματεία Υδάτων: <http://geodata.gov.gr>

Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ) <http://www.eletaen.gr/>

Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΚΑΠΕ) <http://www.cres.gr/>

Online διαδικτυακή εγκυκλοπαίδεια www.wikipedia.org