



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

ΤΡΑΧΑΝΗΣ ΑΝΔΡΕΑΣ

Αριθμός Μητρώου: 07392

ΕΠΟΠΤΗΣ: ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΣΧΟΙΝΑΣ

ΜΑΙΟΣ, 2023

Περίληψη

Αυτή η πτυχιακή παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση της αιολικής ενέργειας και των σύγχρονων ανεμογεννητριών, διερευνώντας την ιστορία, τις τεχνικές πτυχές και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους. Το εισαγωγικό κεφάλαιο καλύπτει τα βασικά της αιολικής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ιστορίας της, του τρόπου λειτουργίας της και των τρεχουσών εφαρμογών, μαζί με σχετικά στατιστικά στοιχεία.

Το δεύτερο κεφάλαιο εστιάζει στη δημιουργία του ανέμου, συμπεριλαμβανομένης της διεύθυνσης του, της ταχύτητας, των ανεμόμετρων και της διακύμανσης της ταχύτητας του λόγω του υψομέτρου. Αυτό το κεφάλαιο παρέχει μια θεωρητική κατανόηση της συμπεριφοράς του ανέμου, η οποία είναι απαραίτητη για το σχεδιασμό και τη λειτουργία των ανεμογεννητριών.

Το τρίτο κεφάλαιο εμβαθύνει στις ιδιαιτερότητες των σύγχρονων ανεμογεννητριών, συμπεριλαμβανομένων των τύπων, των εξαρτημάτων, των μηχανισμών τους και ορισμένων θεωρητικών εννοιών όπως η καμπύλη ισχύος και η κατανομή Weibull.

Το τέταρτο και τελευταίο κεφάλαιο εξετάζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αιολικής ενέργειας και των ανεμογεννητριών, καλύπτοντας θέματα όπως η ηχορύπανση, οι επιπτώσεις στην άγρια ζωή και η οπτική αισθητική. Κατανοώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ανεμογεννητριών, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής, οι μηχανικοί και οι ερευνητές μπορούν να αξιολογήσουν καλύτερα τις δυνατότητές τους ως πηγή ανανεώσιμης ενέργειας.

Συνολικά, η παρούσα πτυχιακή παρέχει μια λεπτομερή και ολοκληρωμένη κατανόηση των σύγχρονων ανεμογεννητριών και των επιπτώσεών τους στο περιβάλλον.

Σημείωμα Συγγραφέα

Ο συγγραφέας βεβαιώνει ότι το περιεχόμενο του παρόντος έργου είναι αποτέλεσμα προσωπικής εργασίας και ότι έχει γίνει η κατάλληλη αναφορά στην εργασία τρίτων, όπου κάτι τέτοιο ήταν απαραίτητο, σύμφωνα με τους κανόνες της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

Abstract

This thesis provides a comprehensive overview of wind energy and modern wind turbines, exploring their history, technical aspects, and environmental impact. The introductory chapter covers the basics of wind energy, including its history, how it works, and current applications, along with relevant statistics.

The second chapter focuses on the creation of wind, including wind direction, speed, anemometers, and the variation of wind speed due to altitude. This chapter provides a theoretical understanding of wind behavior, which is essential to the design and operation of wind turbines.

The third chapter delves into the specifics of modern wind turbines, including their types, parts, mechanisms, and some theoretical concepts such as the power curve and Weibull distribution.

The fourth and final chapter examines the environmental impact of wind energy and wind turbines, covering topics such as noise pollution, wildlife impact, and visual aesthetics. By understanding the environmental impact of wind turbines, policymakers, engineers, and researchers can better evaluate their potential as a source of renewable energy.

Overall, this thesis provides a detailed and comprehensive understanding of modern wind turbines and their impact on the environment.

Περιεχομενα / Contents

Περίληψη.....	2
Abstract.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	5
1.1 Μια πρώτη γνωριμία με την Αιολική Ενέργεια.....	5
1.2 Ιστορική αναδρομή στην Αιολική Ενέργεια.....	6
1.3 Ο ρόλος της Αιολικής Ενέργειας σήμερα.....	11
1.4 Εφαρμογές της αιολικής ενεργείας.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΚΑΤΑΝΟΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ.....	17
2.1 Τι είναι ο άνεμος και πως δημιουργείτε.....	17
2.2 Ταχύτητα του ανέμου και ανεμόμετρα.....	18
2.3 Διεύθυνση του ανέμου.....	20
2.4 Η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου σε σχέση με το ύψος και τον τύπο επιφάνειας.....	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ.....	23
3.1 Τύποι ανεμογεννητριών.....	23
3.2 Δομή ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα.....	26
3.3 Νόμος του Betz.....	52
3.4 Διακυμάνσεις ταχύτητας ανέμου : Διανομή Weibull.....	53
3.5 Θεμελιώδης Εξίσωση Αιολικής Ενέργειας.....	55
3.6 Αποτελεσματικότητα στην εκμετάλλευση αιολικής ενέργειας.....	56
3.7 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας.....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΕΡΙΒΑΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ.....	61
4.1 Θετικές επιπτώσεις.....	61
4.2 Αρνητικές επιπτώσεις.....	64
4.3 Ζητήματα ασφαλείας.....	69
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	72

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

1.1 Μια πρώτη γνωριμία με την Αιολική Ενέργεια

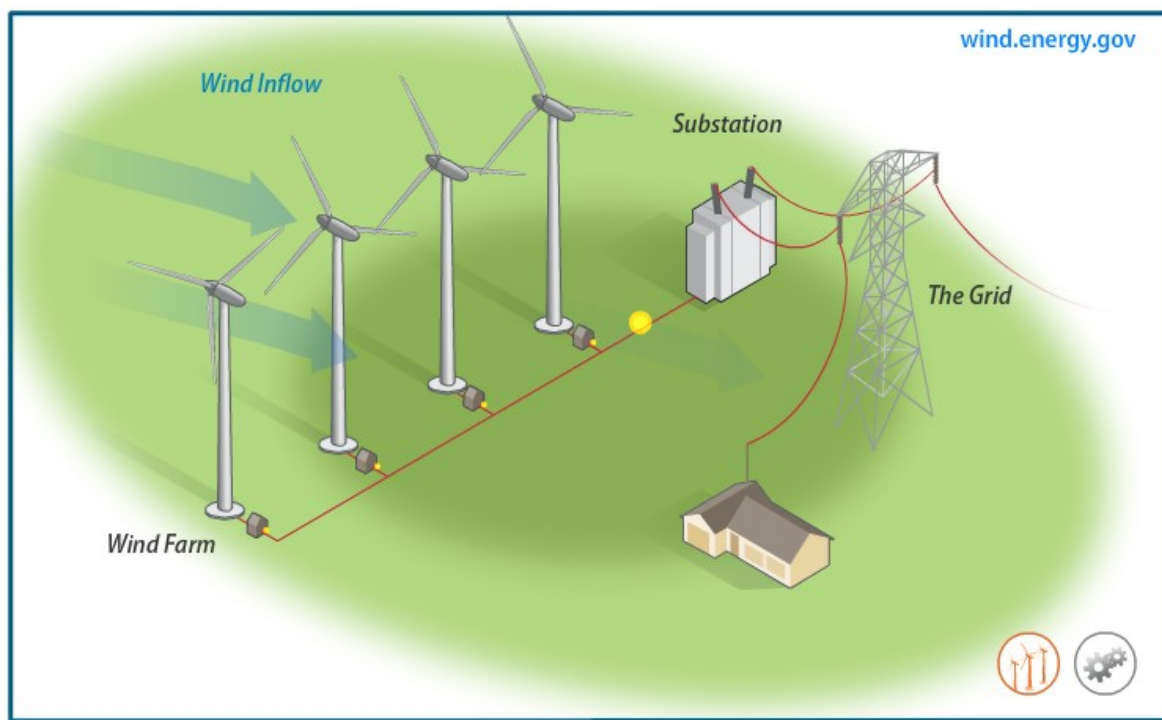
Η αιολική ισχύς ή αιολική ενέργεια περιγράφει την διαδικασία κατά την οποία ο άνεμος χρησιμοποιείται έτσι ώστε να παραχθεί μηχανική ισχύ ή ηλεκτρισμός. Οι ανεμογεννήτριες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε μηχανική. Αυτή η μηχανική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συγκεκριμένες εφαρμογές (όπως άλεση σιτηρών ή άντληση νερού), ή μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική από μια γεννήτρια.



1. Ανεμογεννήτριες. Charles Cook

Για να υπάρξει εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου, η ανεμογεννήτρια χρησιμοποιεί πτερύγια. Ο άνεμος ρέει πάνω από το πτερύγιο δημιουργώντας σε αυτό ύψωση (παρόμοιο φαινόμενο με αυτό που δημιουργείται στα αεροπλάνα), το οποίο με την σειρά του προκαλεί κίνηση στο πτερύγιο. Τα πτερύγια είναι συνδεδεμένα σε έναν κινητήριο άξονα, ο οποίος περιστρέφει μια ηλεκτρική γεννήτρια παράγοντας έτσι ηλεκτρικό ρεύμα. Τέλος, ο ηλεκτρισμός που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες καταλήγει σε υποσταθμό μεταφοράς,

έτσι ώστε να γίνει ανύψωση τάσης και να διανεμηθεί μέσω των γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας στον καταναλωτή.

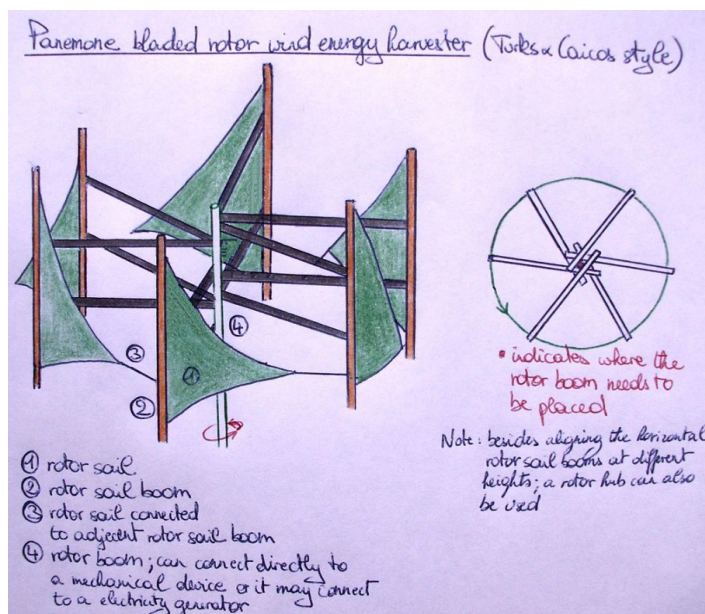


2. Τα στάδια της αιολικής ενέργειας.

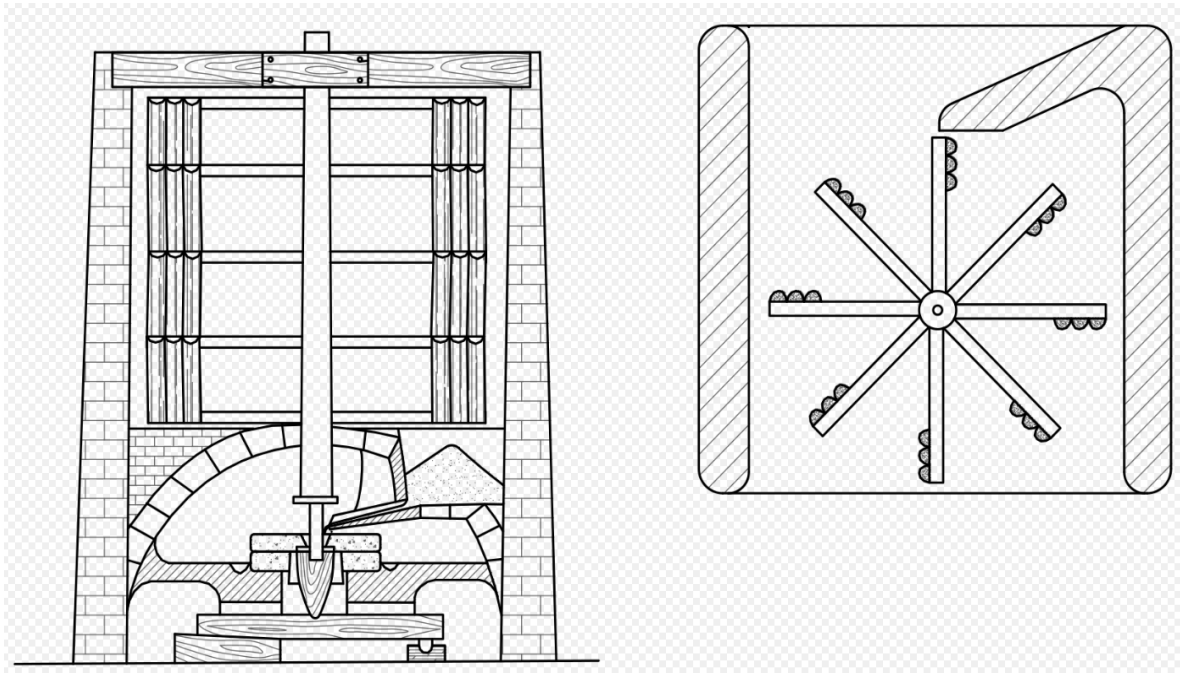
1.2 Ιστορική αναδρομή στην Αιολική Ενέργεια

Η ανθρωπότητα εκμεταλλεύεται τον άνεμο εδώ και πάρα πολλούς αιώνες. Όλοι έχουμε ακούσει ιστορίες με γενναίους ναύτες που καβάλησαν τον άνεμο για να βιώσουν περιπέτειες. Ακόμα και το 5000 π.Χ, πλοία χρησιμοποιούσαν τον άνεμο για να διασχίζουν τον Νείλο. Ο αυτοκράτορας της Βαβυλώνας είχε και αυτός προσπαθήσει να εκμεταλλευτεί τον άνεμο έτσι ώστε να δημιουργήσει ένα σύστημα άρδευσης. Ωστόσο η πιο αξιοσημείωτη πρόοδος σημειώθηκε όταν οι Πέρσες χρησιμοποίησαν τον άνεμο για την άντληση νερού και την άλεση σιτηρών, κάτι που φαίνεται πως ήταν σημείο καμπής για τον άνθρωπο και την προσπάθεια του να χρησιμοποιήσει τον άνεμο για να τροφοδοτεί μηχανήματα και να εξοικονομεί ενέργεια και προσπάθεια.

Αρχαιολόγοι έκαναν μια φανταστική ανακάλυψη όταν βρήκαν τους πρώτους ανεμόμυλους Panemone οι οποίοι είχαν προέλευση από την Περσία και είχαν κατασκευαστεί το 700 – 900 π.Χ. Ένας ανεμόμυλος Panemone είναι ένα είδος ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα. Ουσιαστικά έχει έναν περιστρεφόμενο άξονα τοποθετημένο κατακόρυφα ενώ τα πτερύγια του κινούνται παράλληλα με τον άνεμο. Αντίθετα, ο άξονας μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα δείχνει προς τον άνεμο ενώ τα πτερύγια κινούνται σε ορθή γωνιά ως προς την ώθηση του ανέμου. Τουτέστιν ένας ανεμόμυλος Panemone λειτουργεί εκμεταλλευόμενος το φαινόμενο της οπισθέλκουσας δύναμης (drag), ενώ του οριζόντιου άξονα εκμεταλλευόμενος το φαινόμενο της ύψωσης (lift). Τα πτερύγια μιας Panemone κινούνται από τον άνεμο σε κύκλο για να περιστρέψουν τον κινητήριο άξονα. Για να το πετύχουν αυτό πρέπει να κινούνται με τον άνεμο μόνο ενώ βρίσκονται στη μία πλευρά του κύκλου και να κινούνται ενάντια στον άνεμο στην άλλη πλευρά. Οι συσκευές άνεμο-δέσμησης που βασίζονται στην οπισθέλκουσα επιτυγχάνουν τη μέγιστη απόδοση τους εάν ο συλλέκτης ωθηθεί από τον άνεμο. Επειδή τα πτερύγια δεν λειτουργούν όταν επιστρέφουν στην αντίθετη πλευρά της συσκευής, ο ρότορας στο σχέδιο περσικής Panemone μπορεί να πάρει ενέργεια μόνο από τον άνεμο που χτυπά τη μισή περιοχή του κύκλου. [\[Διάγραμμα\]](#)



3. Το σχέδιο πανεμώνης που χρησιμοποιούσαν οι νησιώτες Turks & Caicos



4. Διάγραμμα περσικού οριζόντιου ανεμόμυλου, ο πρώτος πρακτικός ανεμόμυλος.

Στη Ευρώπη οι πρώτοι ανεμόμυλοι εμφανίζονται κατά τον 12ο αιώνα, η παλαιότερη σίγουρη αναφορά σε ανεμόμυλο χρονολογείται από το 1185, στο Weedley, Yorkshire και περιγράφονται ως post mills (μύλος δοκαριού). Το χαρακτηριστικό που τους ξεχωρίζει είναι ότι ολόκληρο το σώμα που στεγάζει τους μηχανισμούς, βρίσκεται τοποθετημένο σε έναν μόνο κάθετο στύλο που στην κορυφή του υπάρχει ο τροχός με τα πανιά. Ο μηχανισμός θα υπήρχε ή πίσω από τον τροχό στην κορυφή του στύλου ή στην βάση του στύλου. Η αρχαιότερη έκδοση αυτών είναι οι sunk post mills (βυθισμένος μύλος δοκαριού), ο οποίος ήταν κατά ένα κομμάτι του βυθισμένος στο έδαφος έτσι ώστε να αντέχει δυνατούς άνεμους.

Άλλα είδη ανεμόμυλων δοκαριού (post mills) ήταν τα εξής:

- *Hollow Post mill* – Το κύριο σώμα του μύλου είναι κοίλο ώστε να στεγάζονται περιστρεφόμενοι άξονες που μπορούν να τροφοδοτήσουν μηχανήματα.
- *Post mill with roundhouse* – Ανεμόμυλοι που χρησιμοποιούν το σώμα τους ως αποθηκευτικό χώρο.
- *Open trestle post mill* – Ανεμόμυλοι που δεν είναι θαμμένοι στο έδαφος.

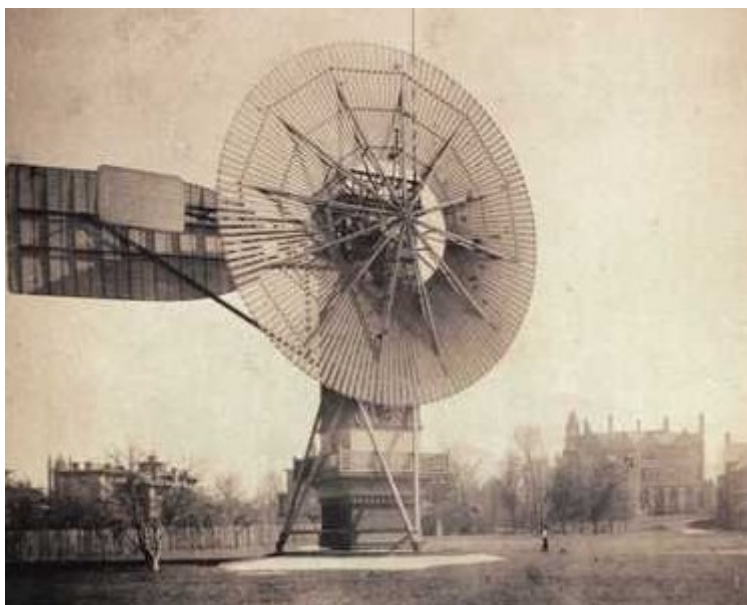


5. *Ανεμόμυλος Brill, ένας μύλος δοκαριού του 17ου αιώνα.*

Ο πρώτος ανεμόμυλος που χρησιμοποιήθηκε έτσι ώστε να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια ήταν του καθηγητή James Blyth του Andreason's College (ο πρόδρομος του Strathclyde University) στην Γλασκόβη το 1887. Ο ανεμόμυλος του Blyth είχε 10 μέτρα ύψος, πτερύγια από караβόπανο και ήταν εγκατεστημένος στην αυλή του εξοχικού του στο Marykirk, Kincardineshire. Τον χρησιμοποιούσε έτσι ώστε να φορτίζει συσσωρευτές, κατασκευασμένους από τον Γάλλο Camille Alphonse Faure, οι οποίοι παρείχαν ρεύμα στο εξοχικό του.

Την ίδια χρονολογία (1887 - 1888) σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μια αρκετά μεγαλύτερη και πιο βαριά μηχανή από την μηχανολογική εταιρία του Charles F. Brush. Η τοποθεσία κατασκευής της ανεμογεννήτριας ήταν το σπίτι του Charles F. Brush και η περίοδος λειτουργίας ήταν από 1888 έως το 1900. Όσον αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας, αποτελούταν από ένα ρότορα με διάμετρο 17 μέτρων που ήταν τοποθετημένος πάνω σε έναν πύργο 18 μέτρων. Αν και μεγάλο με τα σημερινά πρότυπα, το μηχάνημα απέδιδε 12 kW καθώς γύριζε σχετικά αργά αφού είχε 144 λεπίδες.

Η κυριότερη χρήση της ανεμογεννήτριας ήταν ή να φορτίζει μπαταρίες ή για να λειτουργούν έως και 100 λαμπτήρες πυρακτώσεως, τρεις λαμπτήρες τόξου και διάφορους κινητήρες στο εργαστήριο του Brush. Το μηχάνημα τέθηκε σε αχρηστία μετά το 1900 όταν η ηλεκτρική ενέργεια έγινε διαθέσιμη από τους κεντρικούς σταθμούς του Κλίβελαντ και εγκαταλείφθηκε το 1908.



6. Ο εφευρέτης από το Κλίβελαντ Τσαρλς Μπρους κατασκεύασε αυτό το δυναμό αέρα το 1888 στην πίσω αυλή της έπαυλής του στο Κλίβελαντ.

Στην Δανία, μέχρι και το 1908 υπήρχαν 72 ανεμογεννήτριες από 5 kW έως και 25kW. Οι μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες είχαν πύργους 24 μέτρων και ροτορες τεσσάρων πτερυγίων διαμέτρου 23 μέτρων. Το 1957ο Johannes Juul εγκατέστησε μια ανεμογεννήτρια διαμέτρου εικοσιτεσσάρων μέτρων κοντά στο Gedser η οποία λειτουργούσε από το 1957 έως το 1967. Η ανεμογεννήτρια αυτή είχε τρία πτερύγια, ήταν οριζοντίου άξονα και τα πτερύγια της έτσι κατασκευασμένα ώστε σε υψηλής ταχύτητας ανέμους η περιστροφή και η ροπή που εμφανιζόταν να μειώνονται (Stall-regulated), κάτι που σήμαινε μικρότερη παραγωγή ενέργειας.

Το 1931 εφευρέθηκε η ανεμογεννήτρια Darrieus με τον κάθετο άξονα της να παρέχει διαφορετικές σχεδιαστικές αντισταθμίσεις σε σχέση με τη συμβατική ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα. Λόγο του κατακόρυφου προσανατολισμού, μπορούσε να δέχεται τον άνεμο από οποιαδήποτε κατεύθυνση χωρίς να χρειάζονται προσαρμογές και ο βαρύς

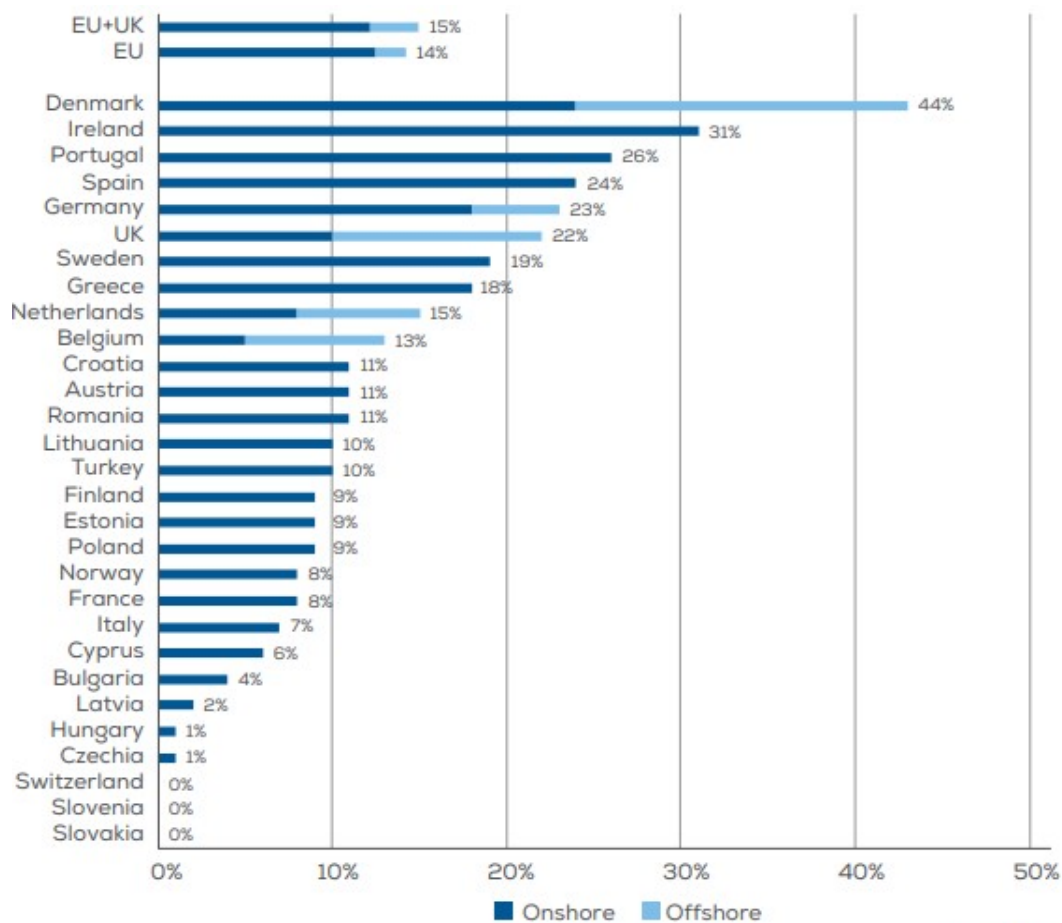
εξοπλισμός της γεννήτριας και του κιβωτίου ταχυτήτων μπορούσε να βρίσκεται στο έδαφος και όχι στην κορυφή του πύργου.

Ο πρόδρομος των σύγχρονων ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα ήταν η WIME D-30 που λειτουργούσε στη Balaklava, κοντά στη Yalta, USSR από το 1931 έως το 1942. Ήταν μια ανεμογεννήτρια των 100 kW με ρότορα τριών πτερυγίων και διάμετρο 30 μέτρα τοποθετημένο επάνω σε πύργο από χαλύβδινο πλέγμα. Τέλος, οι τότε αναφορές έλεγαν πως είχε συντελεστή ετήσιου φορτίου 32% κάτι που δεν απέχει πολύ από τα σημερινά δεδομένα.

Από το 1974 έως τα μέσα των 1980s η κυβέρνηση των Ηνωμένων Πολιτειών συνεργάστηκε με την βιομηχανία για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και την κατασκευή μεγάλων ανεμογεννητριών. Η NASA ανέπτυξε και αυτή ανεμογεννήτριες στο πλαίσιο δημιουργίας μιας μεγάλης βιομηχανίας ανεμογεννητριών, έτσι μαζί με την χρηματοδότηση από το Εθνικό Ίδρυμα Επιστημών και αργότερα από το Υπουργείο Ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών (DOE), τοποθετήθηκαν σε λειτουργία 13 πειραματικές ανεμογεννήτριες. Αυτό το πρόγραμμα σχεδίασης και ανάπτυξης είναι υπεύθυνο για πολλές από τις τεχνολογίες που συναντάμε σήμερα στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες. Κάπως έτσι άνοιξε ο δρόμος για την ευρεία χρήση ανεμογεννητριών, που σε συνάρτηση με την κλιματική αλλαγή και την ανάγκη απεξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα ως πυγή παραγωγής ενέργειας, η αιολική ενεργεία θα γνωρίσει μεγάλη άνθηση και θα κυριαρχήσει στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

1.3 Ο ρόλος της Αιολικής Ενέργειας σήμερα

Η ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας από τα αιολικά έχει δει ραγδαία αύξηση τα τελευταία 30 χρόνια. Η τεχνολογική πρόοδος στον τομέα της αιολικής ενέργειας έχει μειώσει το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο. Επιπλέον, κυβερνητικές απαιτήσεις και τα οικονομικά κίνητρα για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στις Ηνωμένες Πολιτείες, Ευρωπαϊκή Ένωση και άλλες χώρες, έχουν συμβάλει στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας. Στις Ηνωμένες Πολιτείες η συνολική ηλεκτρική ενέργεια από τα αιολικά είδε αύξηση από 6 TWh το 2000 σε 380 TWh το 2021. Το 2021 οι ανεμογεννήτριες ήταν η πυγή του 9.2% από το συνολικά παραγόμενο ρεύμα στις Ηνωμένες Πολιτείες. [1] Αντίστοιχα, στην Ευρώπη και το Ηνωμένο Βασίλειο το 2021 παράχθηκαν 437 TWh που αποτελεί το 15% της συνολικής ενέργειας που καταναλώθηκε. [2]



Source: WindEurope

7. Ποσοστό της μέσης ετήσιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας που καλύπτεται από την αιολική ενέργεια το 2021.

Η αιολική ενέργεια είναι η πλέον κυρίαρχη ανάμεσα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ενδεικτικό είναι ότι στις Ηνωμένες Πολιτείες το μερίδιο της αιολικής ενέργειας σε σχέση με άλλες πηγές Α.Π.Ε ανέρχεται στο 43,2% το οποίο ισούται με 338 TWh για το έτος 2020. [3] Η κατάσταση είναι παρόμοια και στην Ευρώπη καθώς για το 2020 η αιολική ενέργεια κυριάρχησε αποτελώντας το 36% της συνολικής ακάθαρτης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από Α.Π.Ε. [4] Τέλος αξίζει να σημειωθεί πως η Κίνα που αποτελεί την πολυπληθέστερη χώρα στον κόσμο, παρόλο που κυρίαρχη πηγή στα Α.Π.Ε της είναι τα υδροηλεκτρικά, τα τελευταία 6 χρόνια η παραγωγή ηλεκτρισμού από πηγές αιολικής ενέργειας έχει αυξηθεί δραματικά. [5]

1.4 Εφαρμογές της αιολικής ενέργειας

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε περιπτώσεις, όπου μπορούν να παρέχουν το μεγαλύτερο μέρος της απαιτούμενης ενέργειας. Καθώς όλο και περισσότερες ανεμογεννήτριες τοποθετούνται στα συμβατικά δίκτυα, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στον καλύτερο τρόπο αξιοποίησης της ενέργειας που μπορούν να συνεισφέρουν. Κάποιες από τις περιπτώσεις είναι οι εξής: κατανεμημένη παραγωγή, υβριδικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, υπεράκτια αιολική ενέργεια, εγκαταστάσεις σε δύσκολα κλίματα, ειδικού σκοπού εφαρμογές, αποθήκευση ενέργειας και παραγωγή καυσίμων.

- **Κατανεμημένη παραγωγή:** Η κατανεμημένη παραγωγή αναφέρεται σε καταστάσεις στις οποίες οι ανεμογεννήτριες συνδέονται με ένα σύστημα διανομής χαμηλής τάσης. Αυτά τα συστήματα είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε να δέχονται ροή ισχύος προς μια κατεύθυνση. Όταν προσθέτονται μεγάλες ποσότητες από την αιολική παραγωγή, η υπόλοιπη ισχύς από την τοπική παράγωγή μπορεί να γίνει μεταβλητή, και σε κάποιες περιπτώσεις η ενέργεια αυτή μπορεί να είναι αρκετή και να σταλθεί σε άλλη κατεύθυνση. Ενδέχεται να χρειαστούν προσαρμογές στο ηλεκτρικό σύστημα για να πραγματοποιηθεί όλο αυτό.
- **Υβριδικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας:** Πολλές ανεμογεννήτριες συνδέονται όχι σε μεγάλα ηλεκτρικά δίκτυα, αλλά σε μικρά, ανεξάρτητα δίκτυα, στα οποία οι ανεμογεννήτριες μπορεί να αποτελούν ένα μεγάλο μέρος της παραγόμενης ισχύος. Τέτοια συστήματα αναφέρονται ως συστήματα αιολικής ενέργειας / ντίτζελ. Μερικές φορές άλλες ανανεώσιμες πηγές προστίθενται για να συμπληρώσουν την αιολική παραγωγή. Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνουν συμβατική παραγωγή και μια ή περισσότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ονομάζονται γενικότερα υβριδικά συστήματα ισχύος. Η ενσωμάτωση των ανεμογεννητριών σε αυτά τα υβριδικά συστήματα παρουσιάζει κάποια ζητήματα στον σχεδιασμό αυτών των συστημάτων. Οι ανεμογεννήτριες μερικές φορές ενσωματώνονται σε αδύναμα δίκτυα (αυτά στα οποία η τάση ή συχνότητα μπορεί να μην είναι ικανή μόνιμα σταθερή). Για να σταθεροποιηθούν τα δίκτυα αυτά, θα πρέπει να προστεθούν επιπλέον στοιχεία. Πολλές κοινότητες σε απομονωμένες τοποθεσίες, νησιά και αναπτυσσόμενες χώρες είναι συνδεδεμένες με μικρά, ανεξάρτητα ηλεκτρικά δίκτυα που τροφοδοτούνται από γεννήτριες ντίτζελ. Μπορεί να κυμαίνονται σε μέγεθος από

σχετικά μεγάλα νησιωτικά δίκτυα πολλών μεγαβάτ έως συστήματα με χωρητικότητα μερικών κιλοβάτ. Οι ανεμογεννήτριες και άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (συμπεριλαμβανομένης της αιολικής, της ηλιακής ενέργειας, της βιομάζας ή της υδροηλεκτρικής ενέργειας) μπορούν να ενσωματωθούν σε αυτά τα μικρά ηλεκτρικά δίκτυα. Όπως και στα μεγαλύτερα δίκτυα, οι όροι «διείσδυση ανέμου» και «διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας» χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν το μέγεθος του ανέμου ή της ανανεώσιμης ενέργειας στο σύστημα σε σύγκριση με το ονομαστικό φορτίο.

- **Υπεράκτια αιολική ενέργεια:** Όπως υποδηλώνει το όνομα, αναφέρεται στην ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανεμογεννήτριες που εγκαθίστανται υπεράκτια στον ωκεανό (ή σε λίμνες). Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για αυτή την τεχνολογία καθώς υπάρχει έλλειψη σε διαθέσιμη γη με καλό αιολικό δυναμικό, ιδιαίτερα στην Βόρεια Ευρώπη. Οι πρώτες ιδέες των υπεράκτιων ανεμογεννητριών αναπτύχθηκαν από τον Hermann Honnef στη Γερμανία τη δεκαετία του 1930. Η πρώτη πραγματικά υπεράκτια ανεμογεννήτρια εγκαταστάθηκε στη Σουηδία το 1991 και το πρώτο πραγματικά υπεράκτιο πάρκο κατασκευάστηκε το 1992 σε ρηγά νερά στα ανοιχτά της Δανίας κοντά στην πόλη Vindeby. Το 2002 και το 2003, τέθηκαν σε λειτουργία τα πρώτα μεγάλα υπεράκτια αιολικά πάρκα (The Horns Rev και Nysted) τα οποία ήταν και τα δυο στη Δανία με ισχύ πάνω από 100 MW. Η υπεράκτια αιολική ενέργεια έχει αρκετά υποσχόμενα χαρακτηριστικά όπως μεγαλύτερες διαθέσιμες περιοχές για χωροθέτηση μεγάλων έργων, γενικά υψηλότερες ταχύτητες ανέμου σε σύγκριση με τοποθεσίες στην ξηρά, τα πάρκα μπορούν να βρίσκονται σε κοντινές αποστάσεις με πόλεις και κέντρα φόρτωσης. Υπάρχουν όμως και αρκετές προκλήσεις, όπως το υψηλό κόστος λόγω της ανάγκης για εξειδικευμένα πλοία εγκατάστασης και εξοπλισμό, δυσκολότερες συνθήκες εργασίας, πιο δύσκολες και δαπανηρές διαδικασίες εγκατάστασης καθώς και την ανάγκη για ειδικά μέτρα πρόληψης κατά της διάβρωσης.
- **Λειτουργία σε δύσκολα κλίματα:** Η λειτουργία σε δύσκολα κλίματα επιβάλλει ειδικούς σχεδιασμούς στις ανεμογεννήτριες. Τα δύσκολα κλίματα περιλαμβάνουν αυτά με ασυνήθιστα ακραία ισχυρούς ανέμους, υψηλή υγρασία, πολύ υψηλές ή χαμηλές θερμοκρασίες και αστραπές. Οι υψηλές θερμοκρασίες και η υγρασία σε

θερμά κλίματα προκαλούν μια σειρά προβλημάτων. Η υψηλή θερμοκρασία μπορεί να αραιώσει τα λιπαντικά, να υποβαθμίσει την λειτουργία των ηλεκτρονικών και να επηρεάσει την κίνηση σε μηχανικά συστήματα που διαστέλλονται με την θερμότητα. Προβλήματα υγρασίας μπορεί να απαιτούν τη χρήση αποξηραντικών, αφυγραντήρων και βελτιωμένων συστημάτων στεγανοποίησης. Όλα αυτά τα προβλήματα μπορούν να επιλυθούν με ειδικούς σχεδιασμούς στην ανεμογεννήτρια και πρέπει να προβλέπονται πριν γίνει η εγκατάσταση. Η λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες επιφέρει την ανάγκη για ειδικούς σχεδιασμούς στις ανεμογεννήτριες που επρόκειτο να εγκατασταθούν σε τέτοια κλίματα. Η εμπειρία έχει δείξει ότι οι τοποθεσίες με κρύο καιρό μπορούν να επιβάλουν σημαντικές απαιτήσεις στον σχεδιασμό και την λειτουργία της ανεμογεννήτριας λόγω του πάγου που σχηματίζεται στην ανεμογεννήτρια, των ιδιοτήτων των υλικών σε χαμηλές θερμοκρασίες, τον μόνιμο πάγο και το χιόνι.

- **Ειδικές εφαρμογές:** Η αιολική ενέργεια έχει χρησιμοποιηθεί ιστορικά για ένα ευρύ φάσμα ειδικών εφαρμογών, που κυμαίνονται από άλεση σιτηρών μέχρι το πριόνισμα ξύλου. Μέχρι πρόσφατα τουλάχιστον τέσσερις ειδικές εφαρμογές έχουν χρησιμοποιηθεί ή διερευνηθεί. Αυτές περιλαμβάνουν την άντληση νερού, αφαλάτωση, θέρμανση και παραγωγή πάγου. Υπάρχουν εκατομμύρια άνθρωποι σε όλον τον κόσμο που δεν έχουν πρόσβαση σε νερό για τις ανάγκες τους. Σε πολλές από αυτές τις περιπτώσεις, το νερό είναι διαθέσιμο σε πηγάδια ή υδροφορείς, αλλά πρέπει να αντλείται από αυτές τις πηγές για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Ο άνεμος χρησιμοποιείται για την άντληση του νερού για εκατοντάδες χρόνια και εξακολουθεί να χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα. Σε πολλές τοποθεσίες υπάρχει υφάλμυρο ή αλμυρό νερό που θα μπορούσε να μετατραπεί σε πόσιμο νερό με αφαλάτωση και να αποτελέσει μια λύση στα εκατομμύρια ανθρώπων που δεν έχουν πρόσβαση σε πόσιμο νερό. Η αφαλάτωση είναι μια ενεργοβόρα διαδικασία και συχνά δεν τροφοδοτείται από συμβατικές πηγές ενέργειας. Σε αυτές τις καταστάσεις, η αιολική ενέργεια είναι μια εύλογη λύση. Η αιολική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση χώρων, ζεστό νερό ή άλλους παρόμοιους σκοπούς. Μια εκδοχή της ιδέας αυτής, η οποία ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970, ήταν γνωστή ως Ανεμόφουρνος. Σε αυτή την διάταξη, χρησιμοποιήθηκε μια ειδικά σχεδιασμένη ανεμογεννήτρια για την παροχή θέρμανσης

σε μια κατοικία. Η ηλεκτρική ενέργεια της ανεμογεννήτριας διαχεόταν σε αντιστάσεις θερμαντήρων, οι οποίες βρίσκονταν σε μια δεξαμενή με νερό. Το ζεστό νερό κυκλοφορούσε από τη δεξαμενή στο υπόλοιπο σπίτι. Σκοπός της εφαρμογής ήταν η απευθείας σύνδεση των αντιστάσεων με την ανεμογεννήτρια και όχι μέσω του ηλεκτρικού δικτύου. Μια παραλλαγή της έννοιας της θέρμανσης μέσω ανέμου χρησιμοποιείται πλέον ευρέως και ιδιαίτερα σε υβριδικά συστήματα ισχύος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, χρησιμοποιείται μια συμβατική ανεμογεννήτρια για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και για την παροχή θέρμανσης χώρου ή ζεστού νερού. Η διαδικασία της θέρμανσης πραγματοποιείται συνήθως με κάποιο είδος θερμικής αποθήκευσης. Όταν υπάρχει περίσσεια ενέργεια από την ανεμογεννήτρια, μέρος αυτής χρησιμοποιείται για θερμική αποθήκευση. Όταν απαιτήσουμε θερμότητα για κάποια χρήση στην κατοικία τότε η θερμότητα αυτή λαμβάνεται είτε απευθείας από την ανεμογεννήτρια (εάν υπάρχει διαθέσιμη ενέργεια) είτε λαμβάνεται από την θερμική αποθήκη. Σε αυτά τα συστήματα, η θερμότητα συνήθως αποθηκεύεται είτε στο νερό είτε σε κεραμικά μέσα.

- **Αποθήκευση ενέργειας:** Η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να διαδραματίσει πολύ σημαντικό ρόλο στα συστήματα αιολικής ενέργειας, ιδιαίτερα σε αυτά που ο άνεμος πρέπει να παρέχει ένα μεγάλο κομμάτι από την ενέργεια που απαιτείται. Η αποθήκευση ενέργειας μπορεί να βοηθήσει για να ξεπεραστούν οι αναντιστοιχίες μεταξύ της διαθεσιμότητας αιολικής ενέργειας και της απαίτησης για ενέργεια. Επί του παρόντος, το πιο κοινό μέσο αποθήκευσης για την παραγωγή από την αιολική ενέργεια είναι μπαταρίες. Η αποθήκευση ενέργειας σε μπαταρίες είναι πολύ συνηθισμένη σε μικρότερα υβριδικά συστήματα ισχύος και χρησιμοποιείται περιστασιακά σε μεγαλύτερα. Οι μπαταρίες έχουν αποδειχθεί ένα δημοφιλές μέσο αποθήκευσης ενέργειας, κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους και των ευκολιών που προσφέρουν. Τα συστήματα αποθήκευσης με μπαταρίες είναι αρθρωτά και έτσι πολλές μπαταρίες μπορούν να αποθηκεύσουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας. Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος είναι πιο διαδεδομένες, αν και περιστασιακά χρησιμοποιούνται και μπαταρίες νικελίου - καδμίου. Οι μπαταρίες είναι συσκευές DC, έτσι, η χρησιμοποίηση της ενέργειας που έχουν αποθηκευμένη σε AC συστήματα απαιτεί μετατροπέα ισχύος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : ΚΑΤΑΝΟΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

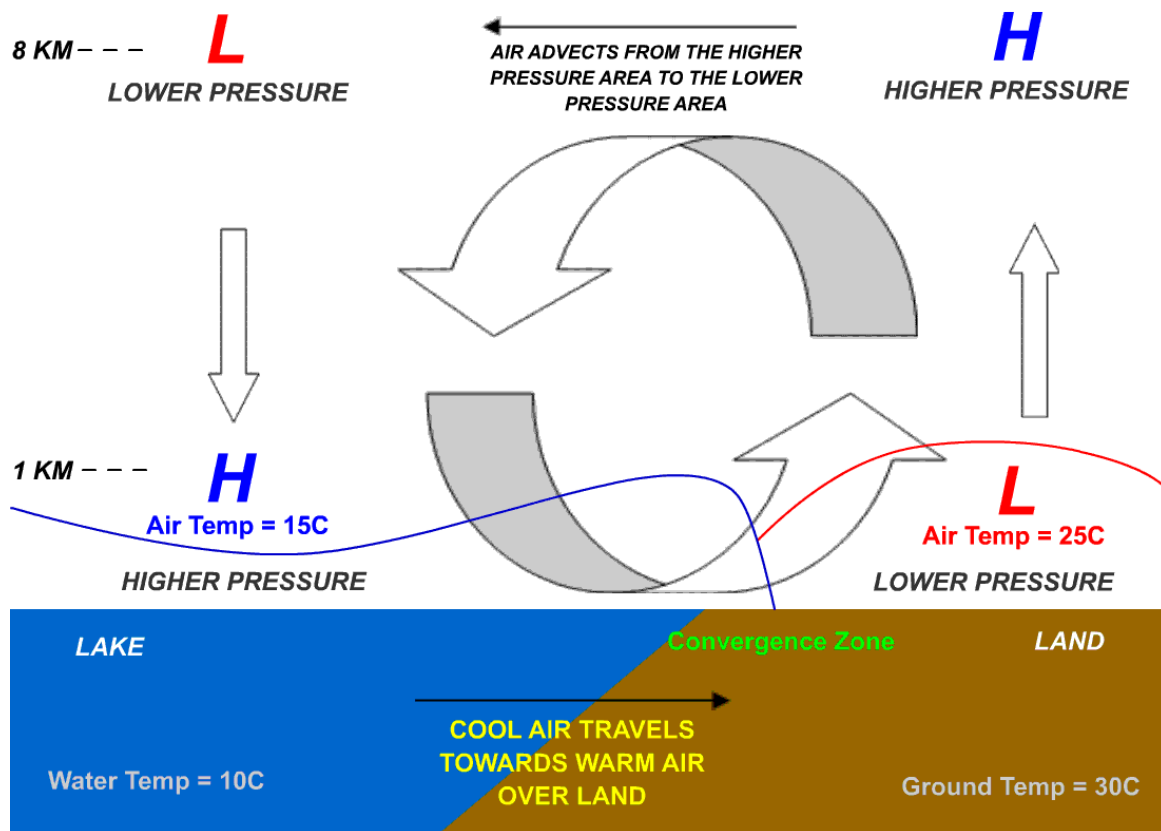
2.1 Τι είναι ο άνεμος και πως δημιουργείτε

Ως άνεμο ονομάζουμε όποια αναίσθητη «οριζόντια κίνηση» του αέρα. Η όποια αισθητή «κατακόρυφη κίνηση» του αέρα ονομάζεται ρεύμα, αν είναι από κάτω προς τα επάνω λέγεται ανοδικό ρεύμα, ενώ αν είναι από επάνω προς τα κάτω λέγεται καθοδικό ρεύμα. Αιτία της δημιουργίας του ανέμου είναι ότι οι αέριες μάζες της ατμόσφαιρας που περιβάλλουν την Γη βρίσκονται σε συνεχή «οριζόντια» και «κατακόρυφη» κίνηση.

Η αιτία που αυτές οι αέριες μάζες βρίσκονται σε συνεχή κίνηση είναι η θερμοκρασία. Όταν τα αέρια ζεσταίνονται τα άτομα και τα μόρια που τα απαρτίζουν κινούνται πιο γρήγορα, απλώνονται και ανεβαίνουν. Γιαυτό και ο ατμός που βγαίνει από μια κατσαρόλα με βραστό νερό πηγαίνει προς τα επάνω. Αντίθετα, όταν ο αέρας είναι κρύος τα μόρια κινούνται αργά και βρίσκονται πιο κοντά μεταξύ τους. Ο ήλιος ζεσταίνει τον αέρα αλλά το κάνει άνισα. Επειδή ο ήλιος χτυπά διαφορετικά μέρη της γης σε διαφορετικές γωνίες και επειδή η Γη έχει ωκεανούς, βουνά και άλλα χαρακτηριστικά, ορισμένα μέρη είναι θερμότερα από άλλα. Έτσι δημιουργούνται θύλακες ζεστού και κρύου αέρα.

Από την στιγμή που τα αέρια συμπεριφέρονται διαφορετικά σε διαφορετικές θερμοκρασίες δημιουργούνται και θύλακες χαμηλής και υψηλής πίεσης. Η πίεση εξαρτάτε από την θερμοκρασία, έτσι όταν έχουμε υψηλή θερμοκρασία έχουμε και χαμηλή πίεση δηλαδή τα μόρια του αέρα είναι πιο αραιά μεταξύ τους. Αφού δημιουργηθούν αυτές οι συνθήκες τα αέρια μετακινούνται από περιοχές υψηλής πίεσης σε περιοχές χαμηλής πίεσης. Όσο μεγαλύτερη είναι διάφορα ανάμεσα στις πιέσεις τόσο πιο γρήγορα ο αέρας μετακινείται. Αυτή η μετακίνηση αερίων είναι ο άνεμος που εμείς καταλαβαίνουμε.

Το φαινόμενο της διάχυσης (diffusion) είναι ο λόγος που τα μόρια αερίων μετακινούνται από περιοχές υψηλής πίεσης σε περιοχές χαμηλής. Η διάχυση είναι η “καθαρή” κίνηση του οτιδήποτε (άτομα, ιόντα, μόρια, ενέργεια), γενικά από μια περιοχή υψηλής συγκέντρωσης σε μια περιοχή χαμηλότερης συγκέντρωσης με σκοπό την εξισορρόπηση τους.



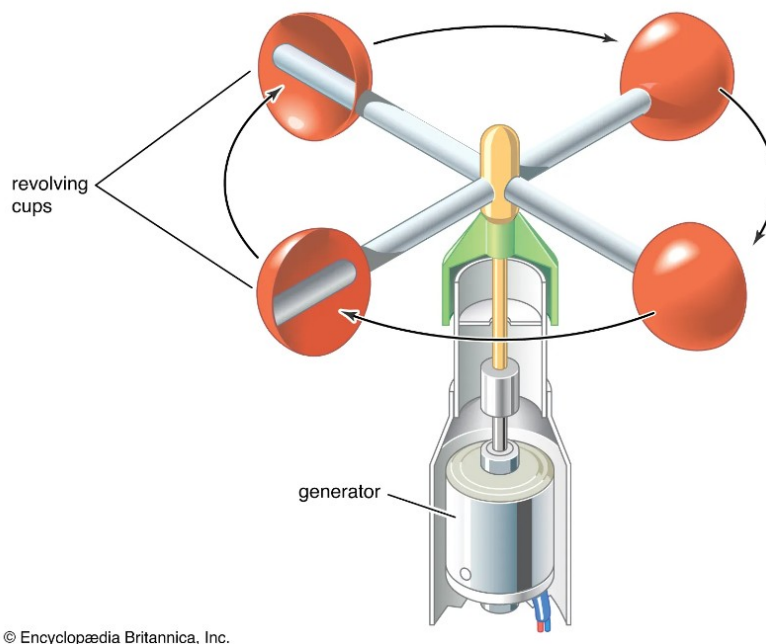
8. Πως δημιουργείτε ο άνεμος?

2.2 Ταχύτητα του ανέμου και ανεμόμετρα

Η ένταση του ανέμου είναι η ταχύτητα με την οποία τα μόρια αερίων που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα μεταβαίνουν από σημεία υψηλής πίεσης σε σημεία χαμηλότερης πίεσης. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, όσο μεγαλύτερη είναι διαφορά στα σημεία χαμηλής και υψηλής πίεσης τόσο πιο μεγαλύτερη ένταση θα έχει ο άνεμος που δημιουργείτε. Άλλοι παράμετροι που επηρεάζουν την ταχύτητα του ανέμου είναι τα κύματα Rossby και οι τοπικές καιρικές συνθήκες. Τα κύματα Rossby είναι ισχυροί άνεμοι στην άνω τροπόσφαιρα. Αυτά λειτουργούν σε παγκόσμια κλίμακα και μετακινούνται από την Δύση στην Ανατολή. Τα κύματα Rossby είναι από μόνα τους μια διαφορετική ταχύτητα από αυτή που βιώνουμε εμείς στην κάτω τροπόσφαιρα. Οι καιρικές συνθήκες αποτελούν ρόλο κλειδί

στην ταχύτητα του ανέμου καθώς ο σχηματισμός τυφώνων, μουσώνων και κυκλώνων μπορούν να επηρεάσουν δραστικά την ένταση του ανέμου.

Για την ταχύτητα του ανέμου χρησιμοποιείται ως μονάδα μέτρησης τα μέτρα ανά δευτερόλεπτο (m/s) που ανήκει στο σύστημα SI, το οποίο συστήνει και ο Παγκόσμιος Μετεωρολογικός Οργανισμός. Η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου γίνεται από μια συσκευή που ονομάζεται ανεμόμετρο και αποτελείται από μια κάθετη κολόνα και τρία ή τέσσερα κοίλα κύπελα που καταγράφουν την οριζόντια κίνηση των σωματιδίων του αέρα.



9. Ανεμόμετρο.

Η παλαιότερη γνωστή ύπαρξη ανεμόμετρου ήταν από τον Ιταλό αρχιτέκτονα και συγγραφέα Leon Battista Alberti το 1450 μΧ. Το ανεμόμετρο έχει αλλάξει ελάχιστα από τότε που εφευρέθηκε. Στους επόμενους αιώνες πολλοί άλλοι ανέπτυξαν δικές τους εκδοχές με κάποιους να πιστώνονται εσφαλμένα την εφεύρεση του. Το 1846 ο Thomas Romney Robinson βελτίωσε το σχέδιο χρησιμοποιώντας τέσσερα ημισφαιρικά κύπελα και μηχανικούς τροχούς. Το 1926, ο Καναδός μετεωρολόγος John Patterson ανέπτυξε ένα ανεμόμετρο τριών ημισφαιρικών κυπέλων, το οποίο βελτιώθηκε από τους Brevoort και Joiner το 1935. Το 1991, ο Derek Weston πρόσθεσε την ικανότητα μέτρησης της κατεύθυνσης του ανέμου. Στον απλό τύπο ανεμόμετρου που είχε τέσσερα ημισφαιρικά κύπελα τοποθετημένα σε έναν κάθετο

άξονα, η ροή του αέρα σε οποιαδήποτε κατεύθυνση έστρεψε τον άξονα με ρυθμό περίπου ανάλογο με την ταχύτητα του άνεμου. Ως εκ τούτου, η μέτρηση των στροφών του άξονα σε ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα παρήγαγε μια τιμή ανάλογη με τη μέση ταχύτητα ανέμου για ένα ευρύ φάσμα ταχυτήτων. Τα ανεμόμετρα τριών ημισφαιρικών κυπέλων που αναπτύχθηκαν από τον John Patterson και τα επόμενα χρόνια βελτιώθηκαν, σήμερα αποτελούν το βιομηχανικό πρότυπο για μελέτες και αξιολογήσεις αιολικών πόρων.

Άλλα είδη ανεμόμετρων :

- Ανεμόμετρα πτερυγίων – Μπορούν να χαρακτηριστούν και ως μικροί ανεμόμυλοι, καθώς σε αντίθεση με τα κλασσικά ανεμόμετρα, σε αυτά ο άξονας τους πρέπει να είναι παράλληλος με τον άνεμο.
- Ανεμόμετρο θερμαινόμενου σύρματος - Καθώς η ηλεκτρική αντίσταση των περισσότερων μετάλλων εξαρτάται από τη θερμοκρασία του μετάλλου, μπορεί να επιτευχθεί μια σχέση μεταξύ της αντίστασης του σύρματος και της ταχύτητας του αέρα.
- Υπερηχητικά ανεμόμετρα - Τα υπερηχητικά ανεμόμετρα, χρησιμοποιούν υπερηχητικά κύματα για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου.

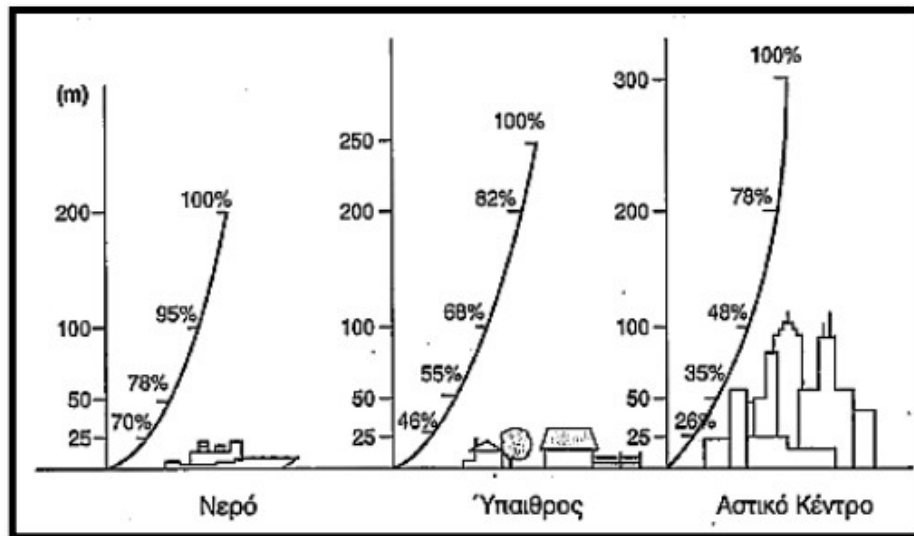
2.3 Διεύθυνση του ανέμου

Η διεύθυνση του ανέμου μεταβάλλεται με τον χρόνο και χαρακτηρίζεται από το σημείο του ορίζοντα απ' όπου πνέει ο άνεμος και όχι προς τα που πνέει ο άνεμος. Εκφράζεται δε είτε σε μοίρες (αρχής γενομένης από τον γήινο μαγνητικό Βορρά), είτε με σύμβολα ανεμολογίου. Οι άνεμοι χαρακτηρίζονται με πολλά ονόματα ανάλογα τον τόπο, την ένταση και την διεύθυνση τους. Στην Ελλάδα οι άνεμοι ανάλογα με την διεύθυνση προέλευσης τους φέρουν δυο ονόματα ένα επίσημο και ένα κοινό. Η διεύθυνση του ανέμου υπολογίζετε μέσω των ανεμοδεικτών, ένα όργανο που είναι απλό τόσο στην λειτουργία του όσο και στην κατασκευή του. Το όργανο αυτό αποτελείτε από έναν κατακόρυφο άξονα όπου πάνω σε αυτόν είναι τοποθετημένος και περιστρέφεται ένας σχηματικά ασύμμετρος οριζόντιος άξονας. Καθώς ο άνεμος ασκεί δύναμη στον ανεμοδείκτη αυτός στρέφεται προς την διεύθυνση του ανέμου.

Διεύθυνση	Επίσημο	Κοινό	Δ.Σ Διεθνές όνομα
B (000°)	Βόρειος	Τραμουντάνα, Βοριάς	N North
BA (045°)	Μέσης	Γραίγος	NE Northeast
A (090°)	Απηλιώτης	Λεβάντες	E East
NA (135°)	Εύρος	Σιρόκος	SE Southeast
N (180°)	Νότιος	Όστρια, Νοτιάς	S South
NΔ (225°)	Λίβας	Γαρμπής	SW Southwest
Δ (270°)	Ζέφυρος	Πουνέντες	W West
BΔ (315°)	Σκίρων	Μαΐστρος	NW Northwest

2.4 Η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου σε σχέση με το ύψος και τον τύπο επιφάνειας.

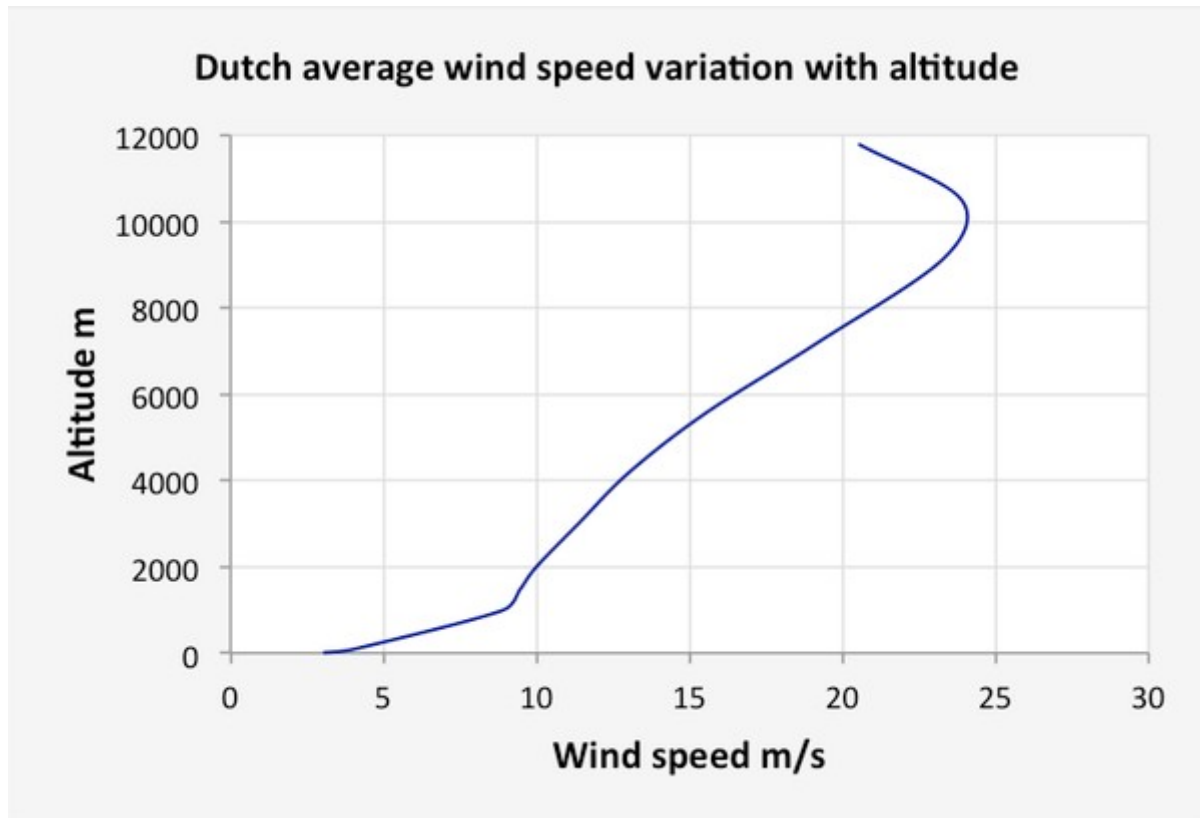
Οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν ιδανικά όταν βρίσκονται εκτεθειμένες σε ανέμους με σχετικά υψηλή αλλά σταθερή ένταση. Είναι γνωστό πως για τα πρώτα 100 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους, η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να επηρεασθεί σημαντικά από την μορφολογία της επιφάνειας του. Ανάλογα με το είδος της επιφάνειας του εδάφους, αυξάνεται η μειώνετε η τριβή του αέρα με αυτό (friction coefficient). Στην ύπαιθρο και σε αστικά μέρη όπου ο αέρας συναντά εμπόδια, η τριβή είναι μεγαλύτερη και η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος που τελειώνουν τα εμπόδια απότομη και στην συνέχεια φυσιολογική. Αντίθετα, στην επιφάνεια του νερού επειδή αυτή είναι λεία, ο άνεμος δεν συναντά υψηλή τριβή και η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου ανά το ύψος είναι η προβλεπόμενη. Κατά την εγκατάσταση ανεμογεννητριών ο συντελεστής τριβής παίζει σημαντικό ρόλο καθώς οι μεγάλες διαφορές της ταχύτητας ανά το ύψος θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αυξημένο θόρυβο ή και σε πλήρη αστοχία του πτερύγιου.



10. Επίδραση τραχύτητας στην ταχύτητα του ανέμου (Καλδελλης, 2005)

Όταν αναζητούμε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου τότε μεταβαίνουμε σε μεγαλύτερα υψόμετρα μιας και όσο πιο ψηλά πηγαίνουμε τόσο πιο ταχύτερους και σταθερότερους ανέμους βρίσκουμε. Το πρόβλημα που εμφανίζεται στα μεγαλύτερα υψόμετρα είναι ότι εκεί λόγω της ατμοσφαιρικής πίεσης τα μόρια του αέρα δεν τόσο πυκνά όσο σε χαμηλότερα υψόμετρα, με αποτέλεσμα η απόδοση του ανέμου να είναι μικρότερη, κάτι που έχει άμεση επίδραση στην παραγόμενη ισχύ της ανεμογεννήτριας. Με βάση αυτή την λογική οι ανεμογεννήτριες θα έπρεπε να τοποθετούνται όσο πιο κοντά στο επίπεδο της θάλασσας, καθώς εκεί συναντάτε η ιδανική ατμοσφαιρική πίεση. Στην πραγματικότητα όμως, αν κοιτάξουμε τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζετε η πυκνότητα ισχύος του ανέμου καταλαβαίνουμε πως η ταχύτητα του ανέμου είναι με διαφορά η πιο σημαντική παράμετρος.

$$\text{Wind Power Density} = 0.5 * \rho * w^3 \left(\frac{W}{m^2} \right)$$



11. Διακύμανση ταχύτητας ανέμου με το υψόμετρο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

3.1 Τύποι ανεμογεννητριών

Ο πιο διαδεδομένος τύπος ανεμογεννητριών σήμερα είναι αυτός του οριζοντίου άξονα (HAWT). Αυτές οι ανεμογεννήτριες αποτελούνται από έναν πύργο που το ύψος του μπορεί να φτάσει και τα 160 μέτρα (το μέσο ύψος τους σήμερα είναι 90 μέτρα). Ο πύργος από το εσωτερικό του προσφέρει πρόσβαση στην κορυφή του, εκεί όπου στηρίζετε ο τριών πτερυγίων ρότορας (σε μορφή έλικα) μαζί με τον άξονα που κινεί την ηλεκτρική γεννήτρια. Οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται σε αιολικά πάρκα για την εμπορική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνήθως οριζοντίου άξονα με τρία πτερύγια. Οι λεπίδες είναι συνήθως λευκές ώστε να είναι ορατές κατά τη διάρκεια της ημέρας από τα αεροσκάφη και έχουν μήκος από 20 έως 80 μέτρα.



12. Ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα (HAWT).

Ο άλλος τύπος ανεμογεννητριών είναι αυτός του κάθετου άξονα (VAWT), που όπως υποδεικνύει και η ονομασία τους ο κύριος άξονας του ρότορα είναι τοποθετημένος κατακόρυφα. Σε αυτόν τον τύπο ανεμογεννητριών, η ηλεκτρική γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στο έδαφος, κάτι που επιτρέπει την απευθείας μετάδοση της κίνησης του ρότορα στο επίγειο κιβώτιο ταχυτήτων, βελτιώνοντας έτσι την πρόσβαση για συντήρηση.



13. Η ψηλότερη ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα στον κόσμο, στο Cap-Chat του Κεμπέκ

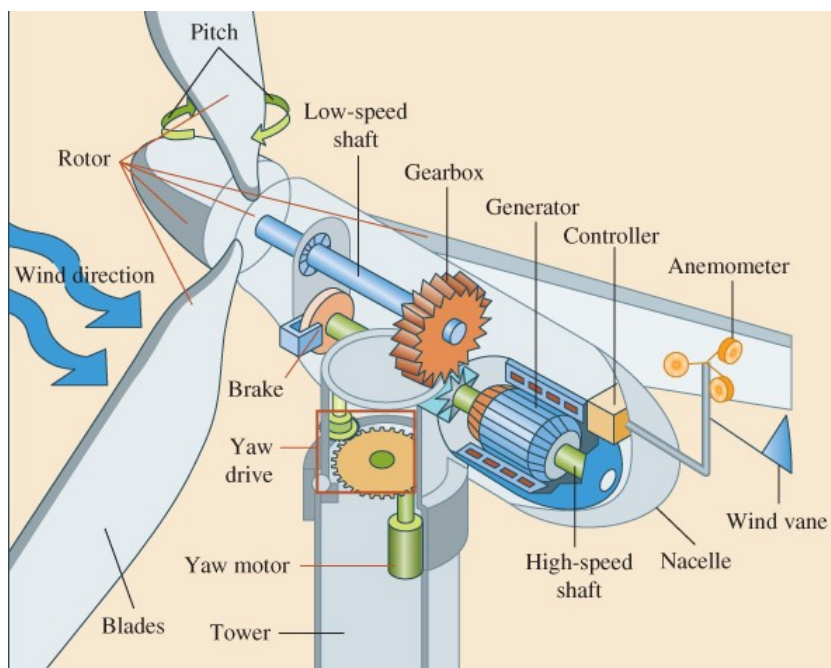
Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα χωρίζονται σε δυο βασικούς τύπους, την Darrieus και την Savonius. Ο στρόβιλος στις ανεμογεννήτριες Darrieus αποτελείται από κυρτά πτερύγια τοποθετημένα σε έναν περιστρεφόμενο άξονα η πλαίσιο. Η καμπυλότητα των λεπίδων επιτρέπει στο πτερύγιο να τεντώνεται μόνο όταν βρίσκετε σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής. Αυτό το σχέδιο ανεμογεννήτριας κατοχυρώθηκε από τον Georges Jean Marie Darrieus, έναν Γάλλο αεροναυπηγό μηχανικό. Ο στρόβιλος Savonius είναι ένας από τους απλούστερους στρόβιλους. Αεροδυναμικά είναι μια συσκευή που λειτουργεί με το φαινόμενο της οπισθέλκουσας δύναμης και αποτελείται από δυο η τρεις κουτάλες. Κοιτάζοντας τον ρότορα από πάνω προς τα κάτω μοιάζει με το γράμμα “S”. [6] Λόγο της καμπυλότητας τους οι κουτάλες έχουν λιγότερη αντίσταση όταν κινούνται αντίθετα από τον άνεμο παρά όταν κινούνται με την φορά του. Επειδή είναι συσκευές τύπου οπισθέλκουσας δύναμης, οι ανεμογεννήτριες Savonius αντλούν πολύ λιγότερη ισχύ από τον άνεμο σε σχέση με άλλες ανεμογεννήτριες παρόμοιου μεγέθους.



14. Ανεμογεννήτρια Savonius

3.2 Δομή ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα

Μια ανεμογεννήτρια οριζοντίου άξονα αποτελείτε από πολλά και σύνθετα εξαρτήματα. Τα υλικά από τα οποία κατασκευάζονται τα μέρη μιας ανεμογεννήτριας είναι το ατσάλι που χρησιμοποιείτε στην κατασκευή του πύργου, κύριου πλαισίου, άξονες, γρανάζια, κιβώτια ταχυτήτων, καθώς και τον οπλισμό στο σκυρόδεμα. Ο χαλκός που έχει εξαιρετική ηλεκτρική αγωγιμότητα χρησιμοποιείτε σχεδόν σε όλο τον ηλεκτρικό εξοπλισμό μιας ανεμογεννήτριας και αποτελεί το σημαντικότερο μέρος του βάρους της ηλεκτρικής γεννήτριας. Το σκυρόδεμα που χρησιμοποιείτε συχνά για τα θεμέλια ανεμογεννητριών ενώ μερικές φορές έχει χρησιμοποιηθεί και για την κατασκευή πύργων. Τέλος χρησιμοποιούνται και σύνθετα υλικά που είναι το κύριο υλικό στην κατασκευή των πτερυγίων αλλά και σε άλλα μέρη της μηχανής, όπως το κάλυμμα της ατράκτου. Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ανεμογεννητριών περιλαμβάνουν αυτά που βασίζονται σε υαλοίνα, ανθρακονήματα και ξύλο και έχουν ως συνδετικά πολυεστέρα, εποξική ρητίνη και βινυλεστέρα. Τα κύρια πλεονεκτήματα των συνθετικών υλικών είναι η ευκολία τους να κατασκευαστούν στο επιθυμητό αεροδυναμικό σχήμα, η υψηλή αντοχή και ακαμψία τους, καθώς και η ανθεκτικότητά τους στην διάβρωση.



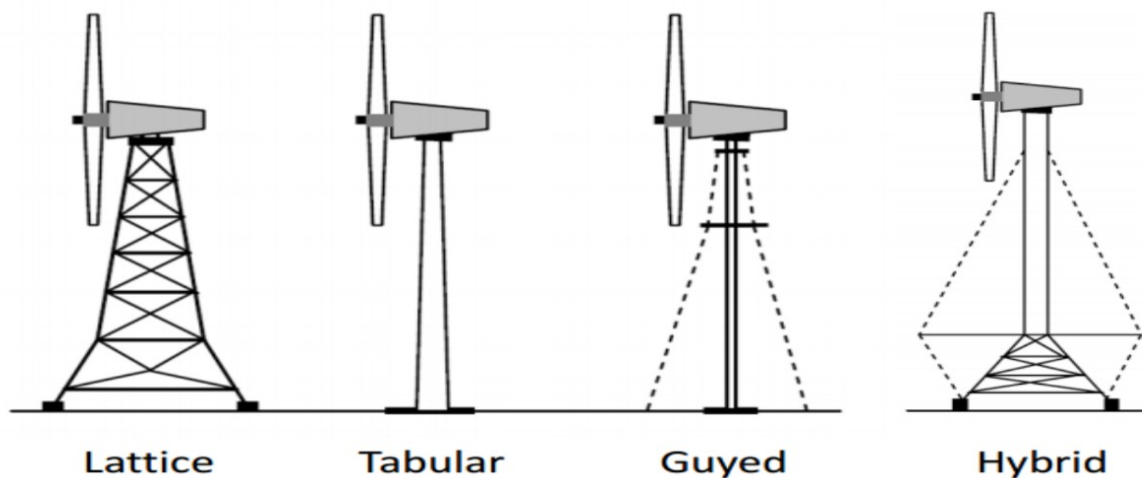
15. Δομή ανεμογεννήτριας

Πύργος (Tower)

Οι πύργοι είναι στηρίγματα για την ανύψωση του κύριου τμήματος της τουρμπίνας στον αέρα. Ένας πύργος είναι τουλάχιστον όσο υψηλή είναι η διάμετρος του ρότορα. Για μικρότερο ρότορα ο πύργος μπορεί να είναι πολύ υψηλότερος από αυτόν. Γενικά, το ύψος του πύργου δεν πρέπει να είναι μικρότερο από 24 m γιατί η ταχύτητα του ανέμου γίνεται μικρότερη και ασταθής. Υπάρχουν τρία είδη πύργων:

- Πύργος με δικτυωτό πλέγμα (Truss tower)
- Σωληνοειδής πύργος (Tubular tower)
- Πύργος δοκαριού (Guyed tower)

Μέχρι και τα 1980s οι πύργοι δικτυωτού πλέγματος χρησιμοποιούνταν περισσότερο στις κατασκευές ανεμογεννητριών. Από τα 80s μέχρι σήμερα όμως οι σωληνοειδής πύργοι έχουν επικρατήσει, καθώς σε σχέση με τους δικτυωτού πλέγματος έχουν πολύ λιγότερες ενώσεις με βίδες, οι οποίες χρειάζεται να ρυθμίζονται και να ελέγχονται τακτικά. Επίσης παρέχουν μια προστατευμένη περιοχή ώστε να είναι εφικτή η πρόσβαση στην κορυφή.



16. Τύποι πύργων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα υλικά κατασκευής ενός πύργου είναι κυρίως το ατσάλι αν και μερικές φορές χρησιμοποιείτε σκυρόδεμα. Όταν το υλικό είναι χάλυβας τότε είναι συνήθως γαλβανισμένο ή βαμμένο για να το προστατεύει από την διάβρωση.

Ένας πύργος μπορεί αντιμετωπίσει δυο τύπους φορτίου: (1) Σταθερό και (2) Δυναμικό. Τα σταθερά φορτία προκύπτουν κυρίως από την αεροδυναμικά παραγόμενη ώθηση και ροπή. Το βάρος του ίδιου του πύργου είναι ένα σημαντικό φορτίο. Τα δυναμικά φορτία είναι πολύ σημαντικά ιδιαίτερα σε ευλύγιστους και πολύ ευλύγιστους πύργους. Ένας δύσκαμπτος πύργος είναι αυτός του οποίου η θεμελιώδης φυσική συχνότητα είναι μεγαλύτερη από την συχνότητα που περνάει το περύγιο. Ένας ευλύγιστος πύργος έχει θεμελιώδης φυσική συχνότητα μεταξύ της συχνότητας που περνάει η λεπίδα και αυτής του ρότορα. Ο πολύ ευλύγιστος πύργος έχει συχνότητα κάτω από αυτή του περάσματος του περυγίου και του ρότορα. Στους ευλύγιστους και τους πολύ ευλύγιστους πύργους κατά την εκκίνηση και τον τερματισμό της ανεμογεννήτριας παρουσιάζονται δονήσεις συχνότητας διαφορετικής από αυτή που είναι κατασκευασμένος ο πύργος, δημιουργώντας έτσι προβλήματα αξιοπιστίας σε βάθος χρόνου. Ο πύργος πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε η φυσική του συχνότητα να μην συμπίπτει με τις συχνότητες διέγερσης του στροβίλου (δηλαδή την συχνότητα του ρότορα ή την συχνότητα που περνάει το περύγιο). Επιπροσθέτως η συχνότητες διέγερσης δεν θα πρέπει να είναι εντός του 5% της φυσικής συχνότητας του πύργου κατά την διάρκεια παρατεταμένης λειτουργίας. Σχεδόν όλες οι ανεμογεννήτριες πρέπει να σκαφαλώνονται περιστασιακά για επιθεώρηση ή συντήρηση. Γιαυτό τον λόγο πρέπει να υπάρχει πρόβλεψη για ασφαλή αναρρίχηση κατά τον σχεδιασμό του πύργου, που θα περιλαμβάνει σκάλα και συστημα ασφαλείας σε περίπτωση πτώσης.



17. Κατεβαίνοντας μια σκάλα των 300 ποδιών

Η κορυφή του πύργου παρέχει την διεπαφή για την σύνδεση του κυρίου πλαισίου της ανεμογεννήτριας με τον πύργο. Το σχήμα της κορυφής του πύργου εξαρτάτε σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο του πύργου και συνήθως κατασκευάζετε από χυτό χάλυβα.

Θεμέλια (Foundations)

Τα θεμέλια μιας ανεμογεννήτριας θα πρέπει να είναι επαρκή έτσι ώστε αυτή να διατηρείται όρθια και σταθερή κάτω από τις πιο ακραίες συνθήκες. Στις περισσότερες τοποθεσίες τα θεμέλια κατασκευάζονται από ενισχυμένο σκυρόδεμα. Σε περίπτωση που η ανεμογεννήτρια εγκατασταθεί σε βραχώδη τοποθεσία, τότε τα θεμέλια της αποτελούνται από ράβδους τοποθετημένες βαθιά μέσα στον βράχο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα επίθεμα από σκυρόδεμα για την παροχή μιας επίπεδης επιφανείας ώστε να τοποθετηθεί ο πύργος.

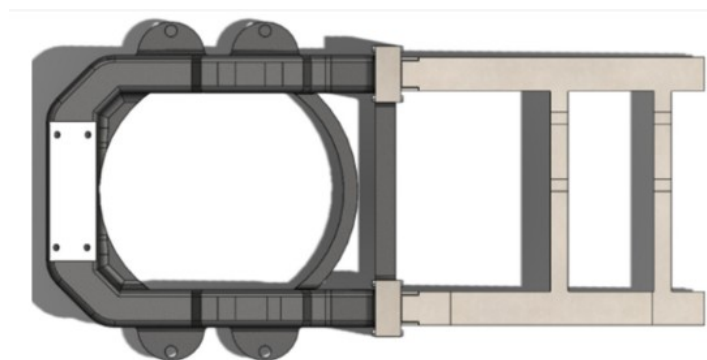
Άτρακτος (Nacelle)

Το κουβούκλιο ή άτρακτος σε μια ανεμογεννήτρια είναι το περίβλημα στο οποίο στεγάζονται τα κύρια εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας (εκτός του ρότορα). Περιλαμβάνει το κύριο πλαίσιο και το κάλυμμα της άτρακτου. Η άτρακτος παρέχει προστασία στα διάφορα εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας και κυρίως στα ηλεκτρομηχανικά που επηρεάζονται όταν είναι εκτεθειμένα σε βροχή, ήλιο, χιόνι και πάγο. Τα υλικά από τα οποία κατασκευάζετε η άτρακτος είναι ελαφρύ, όπως η υαλοΐνα. Σε μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες η άτρακτος είναι επαρκούς μεγέθους έτσι ώστε να μπορεί να φιλοξενήσει προσωπικό για επιθεώρηση ή συντήρηση μηχανημάτων. Σε μικρές και μεσαίου μεγέθους ανεμογεννήτριες μια ξεχωριστή άτρακτος συνδέετε με το κύριο πλαίσιο, με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει άμεση πρόσβαση στα μηχανήματα που φιλοξενεί.

Κύριο πλαίσιο (Main frame / Bedplate)

Το κύριο πλαίσιο είναι το δομικό στοιχείο στο οποίο είναι συνδεδεμένα το κιβώτιο ταχυτήτων, η γεννήτρια και τα φρένα. Είναι μια στιβαρή και άκαμπτη δομή που φιλοξενεί αυτά τα εξαρτήματα. Παρέχει επίσης ένα σημείο στερέωσης για το σύστημα προσανατολισμού της ανεμογεννήτριας. Όσον αφορά τους τύπους κύριου πλαισίου, αυτοί χωρίζονται σε δύο. Στην πρώτη περίπτωση το κύριο πλαίσιο είναι ένα εντελώς ξεχωριστό

εξάρτημα ενώ στην δεύτερη περίπτωση είναι μέρος του ενσωματωμένου κιβωτίου ταχυτήτων. Όταν το κύριο πλαίσιο (όταν αυτό είναι ξεχωριστό) είναι ένα άκαμπτο εξάρτημα που δημιουργείτε μέσω χύτευσης ή συγκόλλησης. Οπές και άλλα σημεία στερέωσης παρέχονται σε κατάλληλες θέσεις για προσθήκη εξαρτημάτων. Όταν το κύριο πλαίσιο αποτελεί κομμάτι του ενσωματωμένου κιβωτίου ταχυτήτων τότε η θήκη είναι φτιαγμένη τόσο παχιά όσο χρειάζεται για να μπορεί να αντέχει τα απαιτούμενα φορτία. Όπως και με το ξεχωριστό κύριο πλαίσιο, παρέχονται σημεία στερέωσης για την ασφάλιση των άλλων αντικειμένων. Το κύριο πλαίσιο πρέπει να μεταδίδει τα φορτία από τον ρότορα και όλα τα φορτία αντίδρασης από την γεννήτρια και τα φρένα στον πύργο. Πρέπει επίσης να είναι αρκετά σταθερό και άκαμπτο ώστε να μην επιτρέπει καμιά σχετική κίνηση μεταξύ των ρουλεμάν στήριξης του ρότορα, του κιβωτίου ταχυτήτων, τη γεννήτρια και το φρένο.



18. Κύριο πλαίσιο

Πτερύγια (Blades)

Από το σύνολο των στοιχείων που αποτελούν τον ρότορα μιας ανεμογεννήτριας, τα πτερύγια αποτελούν το πιο θεμελιώδες στοιχείο του, αφού χάρις αυτά μετατρέπετε η δύναμη του ανέμου στην ροπή που απαιτείτε για την παραγωγή χρήσιμης ισχύος.

Κατα την κατασκευή των πτερυγίων, τα κυριότερα ζητήματα μπορούν να υποπέσουν στα δυο πιο βασικά από αυτά: 1) Την αεροδυναμική επίδοση και την 2) δομική αντοχή. Μαζί με αυτά υπάρχει και η ανάγκη για μείωση της ενέργειας που απαιτεί μια ανεμογεννήτρια κατά την διάρκεια του κύκλου ζωής της. Πράγμα που σημαίνει ότι όχι μόνο το κόστος της ανεμογεννήτριας θα πρέπει να διατηρηθεί σε χαμηλά επίπεδα, αλλά το κόστος λειτουργίας και συντήρησης θα πρέπει να διατηρηθεί χαμηλά επίσης.

Τα κυριότερα ζητήματα στον σχεδιασμό πτερύγιων είναι τα ακόλουθα:

- αεροδυναμική απόδοση
- δομική αντοχή
- υλικά λεπίδων
- ανακυκλωσιμότητα
- κατασκευή λεπίδων
- υγεία και ασφάλεια των εργαζομένων
- μείωση θορύβου
- παρακολούθηση κατάστασης/υγείας
- ρίζες λεπίδας και προσάρτηση πλήμνης
- επιλογές παθητικού ελέγχου ή έξυπνων λεπίδων
- δικαστικά έξοδα

Το συνολικό μέγεθος της περιοχής σάρωσης του ρότορα, και επομένως το μήκος των πτερυγίων, σχετίζεται άμεσα με την σχεδιαστικά ονομαστική ισχύ και την ονομαστική ταχύτητα ανέμου. Κατά τον σχεδιασμό όταν το tip speed ratio (TSR) είναι υψηλό οδηγεί σε πτερύγια μικρότερης στερεότητας άρα και μικρότερης επιφάνειας, που τα κάνει πιο ελαφριά και πιο οικονομικά. Η υψηλή ταχύτητα του ρότορα ωφελεί και το σύστημα μετάδοσης της κίνησης. Από την άλλη πλευρά όταν έχουμε υψηλό TSR τότε έχουμε και δυνατό θόρυβο. Επειδή τα πτερύγια είναι λεπτότερα, οι πιέσεις που εμφανίζονται σε αυτά τείνουν να είναι μεγαλύτερες. Λεπτότερα πτερύγια σημαίνει και μεγαλύτερη ευκαμψία, που μπορεί να αποτελέσει πλεονέκτημα αλλά τα λεπτότερα πτερύγια μπορούν επίσης να παρουσιάσουν κραδασμούς και ακραίες παραμορφώσεις που μπορούν να οδηγήσουν σε σύγκρουση πτερυγίου και πύργου.

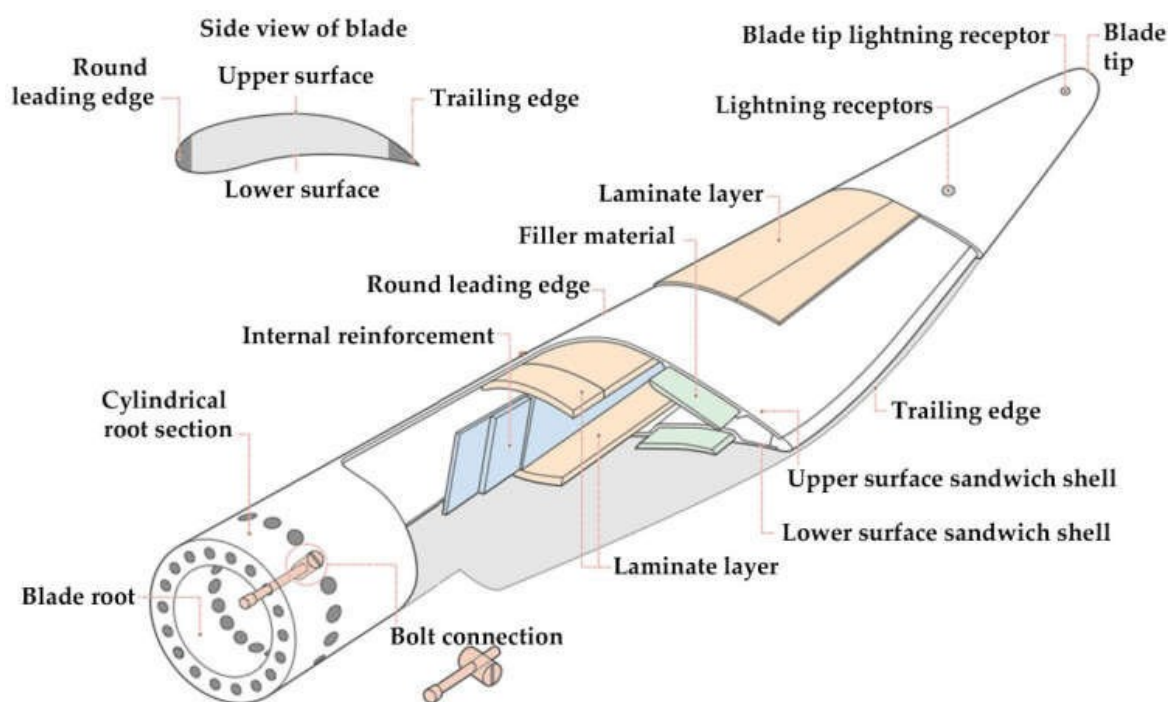
$$TSR = \frac{\text{tip speed of blade}}{\text{wind speed}}$$

Με τις υπάρχουσες τεχνικές κατασκευής ανεμογεννητριών, είναι γενικά πιο ωφέλιμο να κατασκευάζονται ροτορες με όσο το δυνατόν λιγότερα πτερύγια. Αυτό οφείλετε κυρίως στο σταθερό κόστος κατασκευής των πτερυγίων. Επιπλέον, όταν έχουμε περισσότερα

πτερύγια (για μια δεδομένη στερεότητα) τότε αυτά θα είναι λιγότερο άκαμπτα με αποτέλεσμα να δέχονται υψηλότερα φορτία στην ρίζα τους.

Αυτή την χρονική στιγμή όλες οι ανεμογεννήτριες αποτελούνται είτε από τρία είτε από δυο πτερύγια. Οι ανεμογεννήτριες με δυο πτερύγια, έχουν ιστορικά χαμηλότερη στερεότητα από αυτές με τρία πτερύγια, κάτι που τους δίνει ένα υποτιθέμενο πλεονέκτημα καθώς έτσι είναι πιο οικονομικές.

Το εξωτερικό σχήμα των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας βασίζεται στην αεροδυναμική αλλά η εσωτερική αρχιτεκτονική καθορίζεται με βάση την αντοχή. Η δομή του πτερυγίου πρέπει να είναι αρκετά ισχυρή τόσο για να αντέχει τα ακραία φορτία όσο και για να επιβιώνει πολλούς κύκλους κόπωσης. Επίσης το πτερύγιο δεν θα πρέπει να αποκλίνει πέρα από ένα επιτρεπόμενο σημείο όταν αυτό βρίσκεται υπό φορτίο. Προκειμένου το πτερύγιο να έχει αρκετή αντοχή, ιδιαίτερα στο σημείο κοντά στην ρίζα του, τα εσωτερικά του τμήματα είναι σχετικά χοντρά. Καθώς οι λεπίδες γίνονται όλο και μεγαλύτερες, οι χορδές κοντά στην βάση τους μεγαλώνουν και αυτές, αυτό έχει προκαλέσει ορισμένα προβλήματα, μεταξύ άλλων στη μεταφορά.



19. Τα τυπικά μέρη του πτερυγίου μιας ανεμογεννήτριας.

Ιστορικά, τα πτερύγια των ανεμογεννητριών κατασκευάζονταν από ξύλο το οποίο μερικές φορές καλυπτόταν από ύφασμα. Μέχρι και τα μέσα του 20ου αιώνα τα πτερύγια κατασκευάζονταν από χάλυβα. Από την δεκαετία του 1970 και έπειτα τα περισσότερα πτερύγια για ανεμογεννήτριες έχουν κατασκευαστεί από σύνθετα υλικά. Τα πιο κοινά σύνθετα υλικά που χρησιμοποιούνται αποτελούνται από υαλοΐνα σε πολυεστερική ρητίνη. Έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί ελάσματα εστέρα και ξύλου-εποξειδικού υλικού. Κάποιες ανεμογεννήτριες έχουν χρησιμοποιήσει αλουμίνιο για την κατασκευή πτερυγίων. Η επιλογή του αλουμινίου είναι ιδιαίτερα δημοφιλής στις ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα (VAWT) αλλά όχι στις οριζοντίου άξονα (HAWT). Μια σημαντική ανησυχία είναι η ανακυκλωσιμότητα των πτερυγίων. Όσο περισσότερες ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται και καθώς οι παλαιότερες αντικαθιστώνται με καινούργιες το πρόβλημα της απόρριψης των πτερυγίων ως σκουπίδια αλλά και της εξασφάλισης πρώτων υλών για την κατασκευή τους θα γίνει πιο σημαντικό. Ένας τρόπος για να αντιμετωπιστούν σε κάποιο βαθμό και τα δυο προβλήματα είναι η κατασκευή των πτερυγίων από ανακυκλώσιμα υλικά.

Τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας, με την πάροδο του χρόνου μπορούν να υποστούν διάφορους τύπους ζημιάς. Ιδανικά, θα πρέπει να ελέγχονται περιοδικά αλλά στην πράξη είναι δύσκολο να γίνει ενδελεχής έλεγχος, ειδικά στο εσωτερικό τους. Ένας τρόπος αντιμετώπισης αυτού του ζητήματος είναι μέσω παρακολούθησης της κατάστασης και υγείας τους. Σε αυτή την τεχνική, αισθητήρες ενσωματώνονται στα πτερύγια κατά την διάρκεια κατασκευής τους. Οι αισθητήρες μετά ενσωματώνονται με το σύστημα παρακολούθησης, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ειδοποιήσει τους χειριστές ότι είναι απαραίτητο να γίνουν επισκευές.

Τα πτερύγια συνδέονται στον άξονα μέσω της ρίζας τους, η οποία αποτελεί το άκρο του πτερυγίου κοντά στον άξονα. Η ρίζα αντιμετωπίζει τα υψηλότερα φορτία και είναι το σημείο σύνδεσης μεταξύ του άξονα και του πτερυγίου. Προκειμένου να μειωθούν οι καταπονήσεις, η ριζά κατασκευάζεται όσο το δυνατόν πιο χοντρή. Η σύνδεση της ρίζας και του άξονα έχει αποδειχθεί ότι είναι δύσκολη καθώς υπάρχουν ανομοιότητες στις ιδιότητες και στις ακαμψίες των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένα τα πτερύγια, ο άξονας και οι συνδέσεις. Τα μεταβλητά φορτία συμβάλουν επίσης στο πρόβλημα.

Ρότορας (Hub)

Ο ρότορας της ανεμογεννήτριας είναι το εξάρτημα που συνδέει τα πτερύγια με τον κύριο άξονα και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία μιας ανεμογεννήτριας. Ο ρότορας πρέπει να αντέχει και να μεταδίδει όλα τα φορτία που δημιουργούνται από τα πτερύγια. Οι ρότορες κατασκευάζονται από χάλυβα είτε χυτό είτε με συγκόλληση. Οι ρότορες διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με την σχεδιαστική φιλοσοφία της ανεμογεννήτριας.

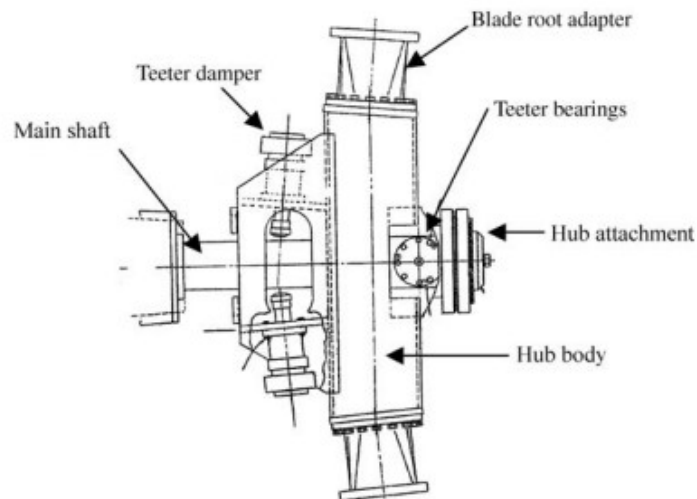


20. Εγκατάσταση ρότορα ανεμογεννήτριας

Σχεδιαστικά, υπάρχουν τρεις τύποι ρότορα που εφαρμόζονται σε σύγχρονες ανεμογεννήτριες οριζοντίου άξονα: 1) άκαμπτοι ρότορες, 2) teetering ρότορες. 3) ρότορες για αρθρωτά πτερύγια.

- **1) Άκαμπτοι ρότορες (Rigid hubs):** Οι άκαμπτοι ροτορες όπως υπονοεί και το όνομα τους, έχουν όλα τα κύρια μέρη τους καθορισμένα σε σχέση με τον κύριο άξονα. Είναι το πιο συνηθισμένο σχέδιο και είναι σχεδόν καθολικά για μηχανές με τρεις (ή περισσότερες) λεπίδες. Ένας άκαμπτος ρότορας θα πρέπει να είναι αρκετά ισχυρός έτσι ώστε να αντέχει φορτία που μπορεί να εμφανιστούν λόγω αεροδυναμικής ή λόγω της περιστροφής (yaw system). Ένας ρότορας σε μια ανεμογεννήτρια με σύστημα ελέγχου κλίσης πτερυγίων (pitch control system) πρέπει να παρέχει ρουλεμάν για τις ρίζες των πτερυγίων, ένα μέσο για την ασφάλιση των πτερυγίων έναντι κάθε κίνησης εκτός από το pitching. Ο ρότορας πρέπει να στερεωθεί στον κύριο άξονα με τέτοιον τρόπο ώστε να μην γλιστρά ή περιστρέφεται.

- **2) Teetering ρότορες (Teetering hubs):** Αυτός ο τύπος ρότορα χρησιμοποιείται σχεδόν σε όλες τις ανεμογεννήτριες με δυο πτερύγια. Αυτό οφείλετε στο γεγονός ότι μπορεί να μειώσει τα φορτία αεροδυναμικών ανισορροπιών καθώς και φορτία που δημιουργούνται λόγω της περιστροφής του ρότορα ή του συστήματος προσανατολισμού (yaw system). Θεωρούνται αρκετά περίπλοκοι σε σχέση με τους άκαμπτους ροτορες. Αποτελούνται από τουλάχιστον δυο κύρια μέρη (το κύριο σώμα του ρότορα και ένα ζευγάρι πείρους στήριξης) μαζί με ρουλεμάν και αποσβεστήρες. Το κύριο σώμα του ρότορα είναι κατασκευασμένο από χαλύβδινη συγκόλληση και σε κάθε άκρο υπάρχουν τα σημεία στερέωσης των πτερυγίων.



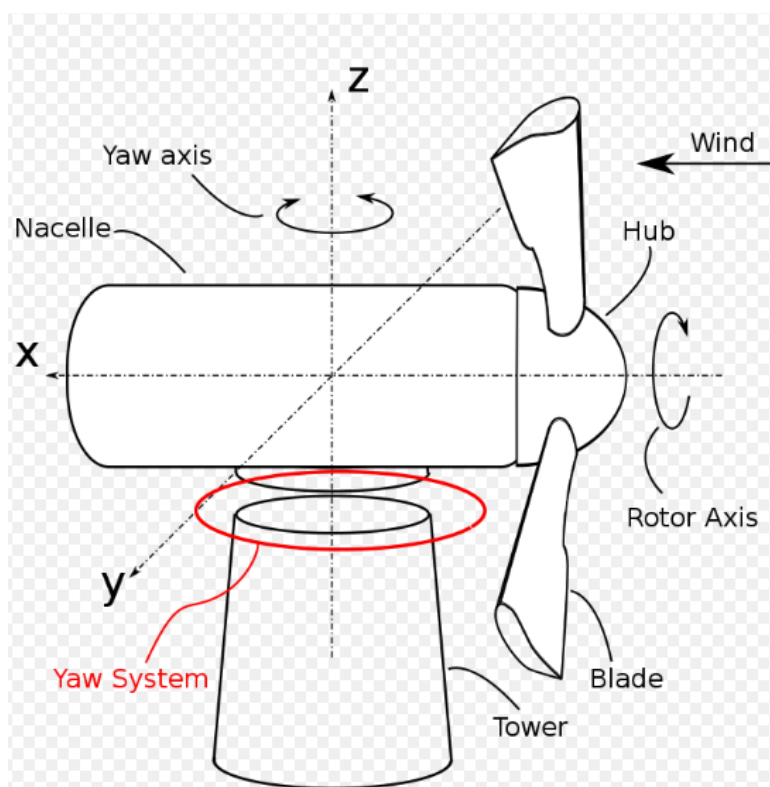
21. Teetering ρότορας

- **3) Ρότορες για αρθρωτά πτερύγια (Hinged hubs):** Ένας αρθρωτός ρότορας είναι, κατά κάποιο τρόπο, μια διασταύρωση ενός άκαμπτου ρότορα και ενός teetering ρότορα. Ουσιαστικά είναι ένας άκαμπτος ρότορας με «μεντεσέδες» για τα πτερύγια. Όπως και στον teetering ρότορα έτσι και σε αυτόν πρέπει να υπάρχουν ρουλεμάν στους μεντεσέδες. Στους teetering ροτορες τα δυο τείνουν να ισορροπούν το ένα το άλλο, επομένως η έλλειψη φυγόκεντρης ακαμψίας όταν λειτουργεί σε χαμηλές στροφές δεν αποτελεί σημαντικό πρόβλημα. Αυτό δεν ισχύει για τον αρθρωτό ρότορα, γιατί πρέπει να υπάρχει κάποιος μηχανισμός που να εμποδίζει τα πτερύγια από το να πέφτουν όταν ο ρότορας βρίσκεται σε χαμηλή ταχύτητα περιστροφής. Ένας τέτοιος μηχανισμός θα μπορούσε να περιλαμβάνει ελατήρια και αποσβεστήρες.

Σύστημα προσανατολισμού (Yaw system)

Το σύστημα προσανατολισμού σε μια ανεμογεννήτρια έχει ως σκοπό την ολοκληρωτική περιστροφή της ατράκτου και του ρότορα γύρω από τον άξονα του πύργου. Αυτός ο μηχανισμός παρέχει ορισμένα πλεονεκτήματα που κάνουν την ανεμογεννήτρια όλο και περισσότερο ανταγωνιστική σε σχέση με άλλους συμβατικούς σταθμούς παράγωγης ηλεκτρικής ενέργειας.

- Περισσότερη εκμεταλλεύσιμη ενέργεια, στρέφοντας την περιοχή σάρωσης του ρότορα στην κατεύθυνση του ανέμου, μεγιστοποιώντας έτσι την ισχύ εισόδου της ανεμογεννήτριας.
- Μείωση του δομικού φορτίου αφήνοντας την άτρακτο να περιστρέφεται παθητικά. Αυτό οδηγεί στο να σχεδιάζονται συστήματα προσανατολισμού χαμηλότερων φορτίων. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνετε μείωση στο κόστος κατασκευής στο ίδιο το σύστημα καθώς και μείωση στην συντήρηση και κατανάλωση ενέργειας.



22. Το σύστημα προσανατολισμού βρίσκεται μεταξύ της ατράκτου της ανεμογεννήτριας και του πύργου.

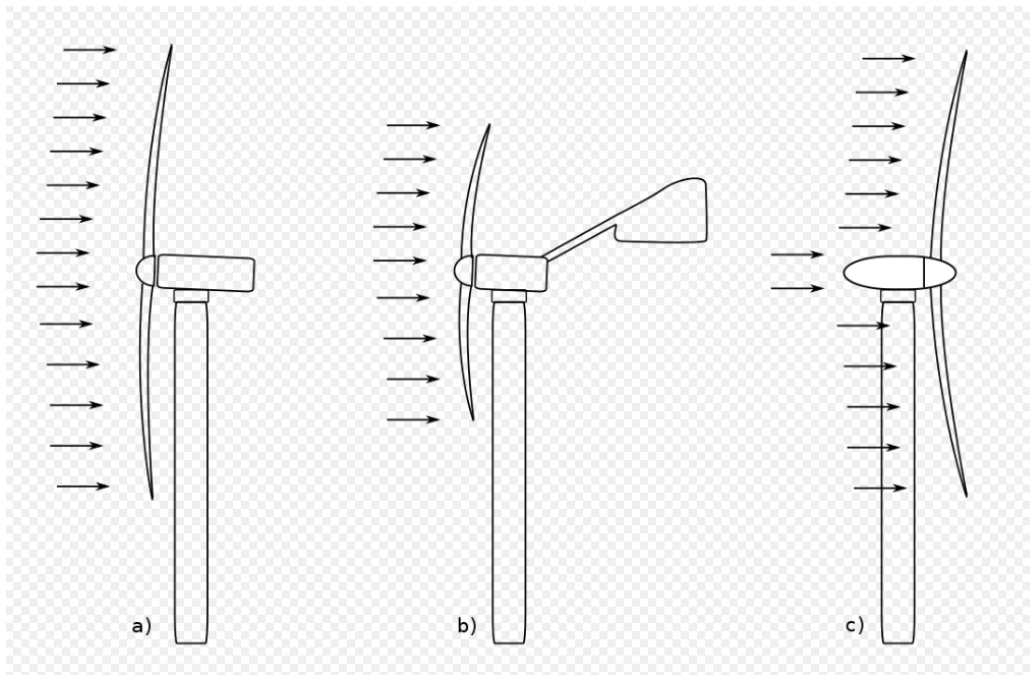
Τα συστήματα προσανατολισμού χωρίζονται σε δυο βασικούς τύπους: 1) Στα ενεργά συστήματα προσανατολισμού (Active Yaw Systems) και στα 2) παθητικά συστήματα προσανατολισμού (Passive Yaw Systems).

Τα συστήματα ενεργού προσανατολισμού είναι εξοπλισμένα με ένα είδος συσκευής παράγωγης ροπής, που είναι ικανή να περιστρέφει την άτρακτο της ανεμογεννήτριας γύρω από τον άξονα του πύργου με βάση τα σήματα που δέχεται από αισθητήρες κατεύθυνσης ανέμου ή χειροκίνητης ενεργοποίησης. Τα συστήματα ενεργού προσανατολισμού θεωρούνται πως είναι η τελευταία λέξη της τεχνολογίας για όλες τις σύγχρονες ανεμογεννήτριες μεσαίου και μεγάλου μεγέθους. Τα διάφορα εξαρτήματα των σύγχρονων συστημάτων ενεργού προσανατολισμού ποικίλλουν ανάλογα με τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά τους, αλλά όλα περιλαμβάνουν ένα ρουλεμάν σύνδεσης μεταξύ ατράκτου και πύργου (yaw bearing), ένα μέσο ενεργής μεταβολής του προσανατολισμού του ρότορα (yaw drive), ένα μέσο περιορισμού της περιστροφής της ατράκτου (yaw brake) και ένα σύστημα ελέγχου που να επεξεργάζεται τα σήματα από αισθητήρες κατεύθυνσης ανέμου (wind vanes) και να δίνει τις κατάλληλες εντολές στους μηχανισμούς ενεργοποίησης.

Τα συστήματα παθητικού προσανατολισμού χρησιμοποιούν την δύναμη του ανέμου για να προσαρμόσουν τον προσανατολισμό του ρότορα στην κατεύθυνση του ανέμου. Στην απλούστερη μορφή τους, αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν ρουλεμάν που συνδέουν τον πύργο με την άτρακτο καθώς και ένα πτερύγιο-ουρά (tail fin) τοποθετημένο στην άτρακτο το οποίο είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να περιστρέφει την άτρακτο και τον ρότορα στην κατεύθυνση του ανέμου, αφού ασκηθεί σε αυτό μια «διορθωτική» ροπή. Επομένως, η ισχύς του ανέμου είναι υπεύθυνη για την περιστροφή του ρότορα και τον προσανατολισμό της ατράκτου. Εναλλακτικά, σε ανεμογεννήτριες που λειτουργούν προσήνεμα (downwind) δεν χρειάζεται να έχουν πτερύγιο στην άτρακτο, αφού ο ίδιος ο ρότορας είναι ικανός να προσανατολίζει την άτρακτο στο άνεμο. Σε περίπτωση λοξών ανέμων, η «πίεση του ανέμου» στην περιοχή σάρωσης προκαλεί μια ροπή εκτροπής γύρω από τον άξονα του πύργου και προσανατολίζει τον ρότορα.

Το ουραίο πτερύγιο χρησιμοποιείται συνήθως για μικρές ανεμογεννήτριες, καθώς προσφέρει μια χαμηλού κόστους και αξιόπιστη λύση. Ωστόσο, δεν είναι σε θέση να αντεπεξέλθει στις υψηλές ροπές που απαιτούνται για την εκτροπή της ατράκτου μιας

μεγάλης ανεμογεννήτριας. Τα παθητικά συστήματα εκτροπής πρέπει να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε η άτρακτος να μην ακολουθεί τις ξαφνικές αλλαγές στην κατεύθυνση του ανέμου, προκειμένου να αποφευχθούν υψηλά γυροσκοπικά φορτία.



23. α) ανεμογεννήτρια εξοπλισμένη με σύστημα ενεργού εκτροπής, β) Ανεμογεννήτρια με σύστημα παθητικής εκτροπής, γ) Προσήμεμη ανεμογεννήτρια εξοπλισμένη με σύστημα παθητικής εκτροπής.

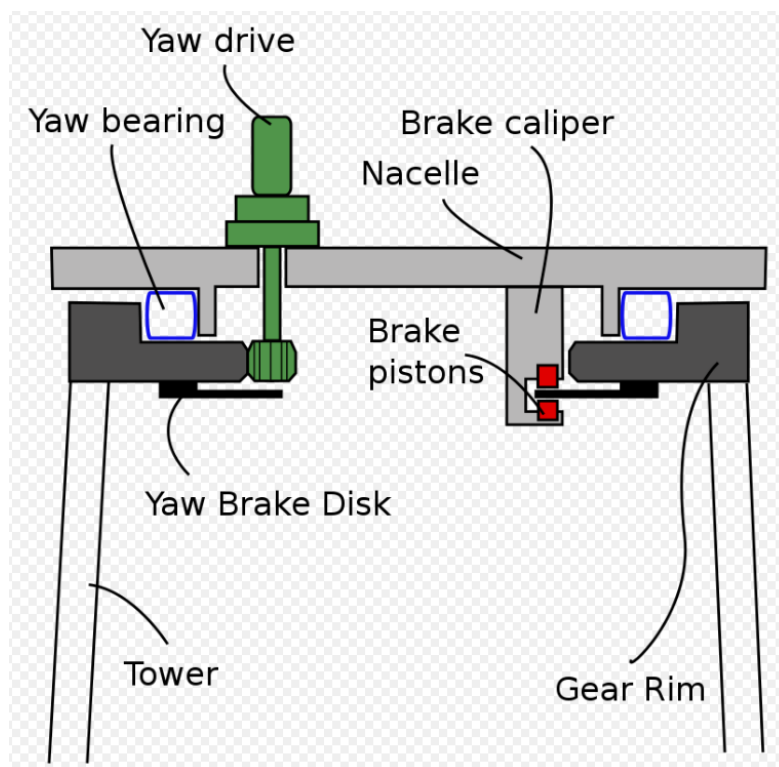
Οι πιο συνηθισμένοι τύποι συστημάτων ενεργού προσανατολισμού είναι:

- Roller yaw bearing – Electric yaw drive – Brake
- Roller yaw bearing – Hydraulic yaw drive
- Gliding yaw bearing – Electric yaw drive
- Gliding yaw bearing – Hydraulic yaw drive

Οι πιο συνηθισμένοι τύποι συστημάτων παθητικού προσανατολισμού είναι:

- Roller bearing (ελεύθερο σύστημα): Η άτρακτος είναι τοποθετημένη σε ρουλεμάν και περιστρέφεται ελεύθερα προς κάθε κατεύθυνση. Ο προσανατολισμός γίνεται από το περύγιο η τον ρότορα (για downwind).

- Roller bearing – Brake (ημιαυτόματο σύστημα): Η άτρακτος είναι τοποθετημένη σε ρουλεμάν και περιστρέφεται ελεύθερα προς κάθε κατεύθυνση, αλλά όταν επιτευχθεί ο απαραίτητος προσανατολισμός, ένα φρένο ακινητοποιεί την άτρακτο. Αυτό αποτρέπει τους ανεξέλεγκτους κραδασμούς και τα γυροσκοπικά φορτία.
- Gliding bearing /brake (παθητικό σύστημα): Η άτρακτος είναι τοποθετημένη σε ρουλεμάν ολίσθησης και περιστρέφεται ελεύθερα προς κάθε κατεύθυνση. Η εγγενής τριβή του ρουλεμάν ολίσθησης επιτυγχάνει έναν σχεδόν ενεργό τρόπο λειτουργίας.



24. Τα κύρια συστατικά ενός τυπικού συστήματος εκτροπής που βρίσκονται στις περισσότερες σύγχρονες μεσαίες ή μεγάλες ανεμογεννήτριες.

Επιλογές αεροδυναμικού ελέγχου (Aerodynamic Control Options)

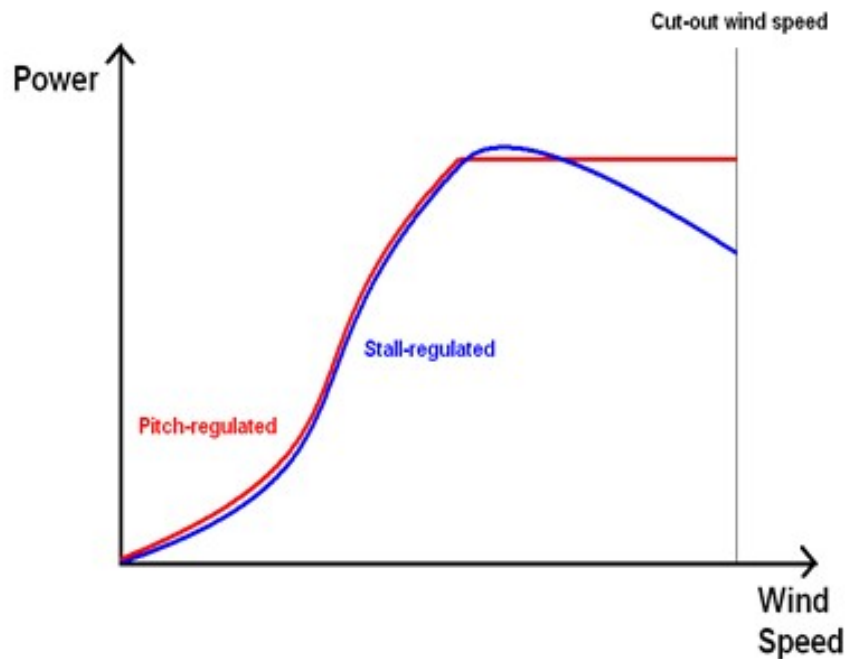
Οι ανεμογεννήτριες έχουν σχεδιαστεί για να αντέχουν (σε στάση) ακραίους ανέμους. Αυτό σημαίνει ότι μπορούν να επιβιώσουν και από μια δυνατή καταιγίδα, αλλά μόνο όταν δεν περιστρέφονται. Δεν έχουν σχεδιαστεί για ακραίες περιστροφικές ροπές ή ταχύτητες. Σε πολύ μεγάλες αεροδυναμικές ροπές ή ταχύτητες περιστροφής, οι δυνάμεις στα πτερύγια και

σε άλλα μέρη της ανεμογεννήτριας είναι τεράστιες και κυριολεκτικά θα μπορούσαν την καταστρέψουν. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο σχεδιάζονται πάντα με ταχύτητα αποκοπής, πάνω από την οποία τα φρένα θα επιβραδύνουν τον στρόβιλο μέχρι να σταματήσει. Ωστόσο, υπάρχει ένα εύρος ταχυτήτων του ανέμου πριν από την ταχύτητα αποκοπής, που οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν διάφορες στρατηγικές ενεργητικού και παθητικού ελέγχου για να αντιμετωπίσουν υψηλές ταχύτητες ανέμου που διαφορετικά θα αποτελούσαν απειλή για τις ανεμογεννήτριες. Αυτές οι στρατηγικές ή μέθοδοι ελέγχου μπορούν να ταξινομηθούν ως ρύθμιση γωνίας πτερυγίων (Pitch-regulated) και παθητικής επιβράδυνσης (stall-regulated).

Οι ανεμογεννήτριες με δυνατότητα ρύθμισης της γωνιάς των πτερυγίων τους, έχουν ένα ενεργό σύστημα έλεγχου που μπορεί να μεταβάλει την γωνιά (γυρίζει το πτερύγιο γύρω από τον άξονα του) των πτερυγίων του ρότορα ώστε να μειώσει την ροπή που παράγεται σε μια ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας και να ελαττώσει την ταχύτητα σε ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας. Αυτός ο τύπος ελέγχου χρησιμοποιείται συνήθως μόνο για υψηλές ταχύτητες ανέμου (συνήθως πάνω από την ονομαστική ταχύτητα), κατά τις οποίες οι υψηλές ταχύτητες περιστροφής και οι αεροδυναμικές ροπές μπορούν να βλάψουν τον εξοπλισμό. Όταν η ταχύτητα του ανέμου γίνεται πολύ υψηλή (πάνω από την ονομαστική ισχύ), τα πτερύγια θα αλλάξουν κλίση έτσι ώστε να υπάρχει λιγότερη ανύψωση και περισσότερη οπισθέλκουσα λόγω του αυξανόμενου διαχωρισμού της ροής του ανέμου κατά μήκος του πτερυγίου. Αυτό θα επιβραδύνει την ταχύτητα του ρότορα ή τη ροπή που μεταφέρεται στον άξονα, έτσι ώστε η ταχύτητα περιστροφής να διατηρείται σταθερή κάτω από ένα καθορισμένο όριο. Οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούν την παραπάνω μέθοδο παράγουν αυξανόμενη ισχύ μέχρι την ονομαστική ταχύτητα ανέμου, πέρα από την οποία παρατηρείται σταθερή ισχύς μέχρι μια ταχύτητα διακοπής (όπου η ρύθμιση της γωνιάς δεν είναι πλέον σε θέση να περιορίσει την ταχύτητα περιστροφής ή άλλες δυνάμεις όπως αναταράξεις, ριπές και δομικούς κραδασμούς).

Από την άλλη πλευρά οι ανεμογεννήτριες παθητικής επιβράδυνσης έχουν τα πτερύγια τους σχεδιασμένα έτσι ώστε όταν οι ταχύτητες του ανέμου είναι υψηλές, η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα ή η αεροδυναμική ροπή, και επομένως η παράγωγή ισχύος, να μειώνεται με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου πάνω από ένα συγκεκριμένο όριο (συνήθως όχι το ίδιο με την ονομαστική ταχύτητα ανέμου). Τα πτερύγια είναι σχεδιασμένα

έτσι ώστε να έχουν χειρότερη απόδοση (από άποψη εξόρυξης ενέργειας) σε υψηλές ταχύτητες ανέμου για την προστασία της ανεμογεννήτριας χωρίς την ανάγκη ενεργών ελέγχων. Το όφελος αυτού του τύπου ανεμογεννητριών έναντι της ρύθμισης γωνιάς βασίζεται στο μικρότερο κόστος κατασκευής, καθώς και τη λιγότερη συντήρηση που σχετίζεται με κινούμενα μέρη.

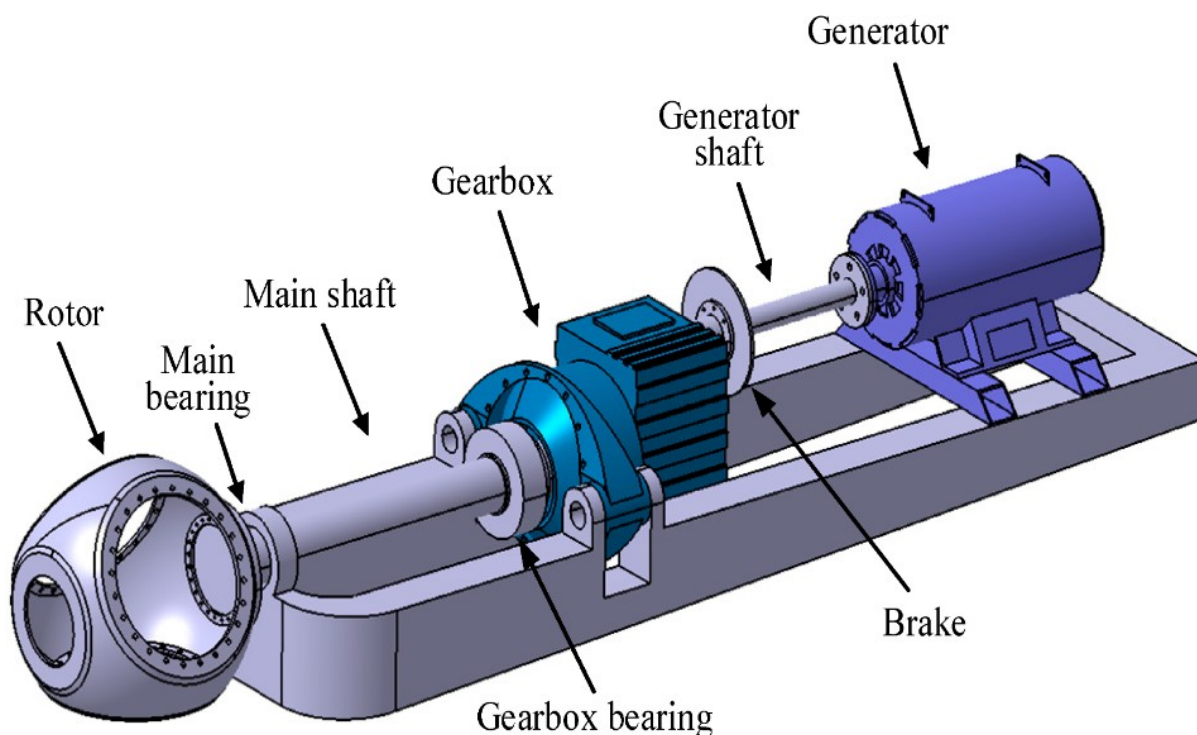


25. Η διαφορά μεταξύ ανεμογεννητριών με ρύθμιση γωνιάς και παθητικής επιβράδυνσης

Η διάφορα λοιπόν, μεταξύ ανεμογεννήτριας με δυνατότητα ρύθμισης γωνιάς πτερυγίων και ανεμογεννήτριας παθητικής επιβράδυνσης, είναι κυρίως αισθητή στις υψηλές ταχύτητες ανέμου. Στην μια περίπτωση η λειτουργία βασίζεται στον αεροδυναμικό σχεδιασμό των πτερυγίων για τον έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής του ρότορα, ενώ την άλλη περίπτωση χρησιμοποιείτε ένα ενεργό συστημα ρύθμισης της γωνιάς των πτερυγίων. Αυτό επιτρέπει στα Pitch-regulated συστήματα να έχουν σταθερή ισχύ εξόδου όταν βρίσκονται πάνω από την ονομαστική ταχύτητα ανέμου, ένα τα stall-regulated συστήματα δεν είναι σε θέση να διατηρήσει σταθερή ισχύ εξόδου σε ισχυρούς ανέμους.

Σύστημα μετάδοσης κίνησης (Drivetrain)

Ένα πλήρες σύστημα μετάδοσης κίνησης ανεμογεννητριών αποτελείται από όλα τα περιστρεφόμενα εξαρτήματα: ρότορα, κύριος άξονας, συνδέσμους, κιβώτιο ταχυτήτων, φρένα και γεννήτρια.



26. Σύστημα μετάδοσης κίνησης της ανεμογεννήτριας

Κύριος άξονας (Main shaft)

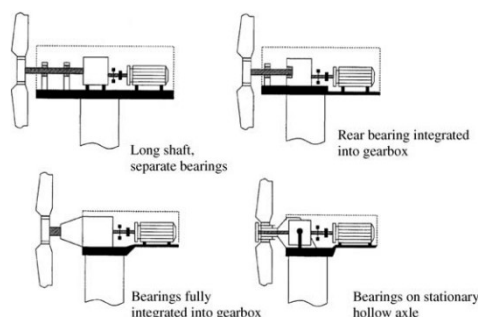
Κάθε ανεμογεννήτρια έχει έναν κύριο άξονα, που μερικές φορές αναφέρεται και ως άξονας χαμηλής ταχύτητας. Ο κύριος άξονας είναι το κύριο περιστρεφόμενο στοιχείο, που προβλέπει τη μεταφορά της ροπής από τον ρότορα στο υπόλοιπο σύστημα μετάδοσης. Υποστηρίζει επίσης το βάρος του ρότορα. Από την άλλη ο κύριος άξονας υποστηρίζεται από ρουλεμάν τα οποία μεταφέρουν τα φορτία αντίδρασης στο κύριο πλαίσιο της ανεμογεννήτριας. Ανάλογα τον σχεδιασμό του κιβωτίου ταχυτήτων, ο κύριος άξονας και / ή τα ρουλεμάν μπορούν να βρίσκονται ενσωματωμένα σε αυτό ή εντελώς ξεχωριστά από αυτό. Λαμβάνοντας υπόψη τον συνδυασμό φορτίων ροπής και κάμψης, ο κύριος άξονας είναι συνήθως κατασκευασμένος από χάλυβα.

Συζευκτήρες (Couplings)

Οι συζευκτήρες ή σύνδεσμοι είναι στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση μεταξύ δυο αξόνων με σκοπό την μετάδοση ροπής μεταξύ τους, αλλά μπορεί να έχουν και άλλη λειτουργία. Μερικές φορές είναι καλό να μειώνονται οι διακυμάνσεις της ροπής στον κύριο άξονα πριν μετατραπεί η ισχύς σε ηλεκτρική. Ένας σύνδεσμος κατάλληλου σχεδιασμού μπορεί να υπηρετήσει αυτόν τον ρόλο.. Μια τυπική χρήση των συνδέσμων σε ανεμογεννήτριες είναι η σύνδεση μεταξύ της γεννήτριας και του άξονα υψηλής ταχύτητας του κιβωτίου ταχυτήτων. Οι σύνδεσμοι αποτελούνται από δυο κύρια κομμάτια, το ένα από τα οποία συνδέεται σε κάθε άξονα. Τα δυο αυτά μέρη συνδέονται μεταξύ τους με μπουλόνια.

Ρουλεμάν (Bearings)

Τα ρουλεμάν χρησιμοποιούνται για την μείωση της τριβής μεταξύ δυο επιφανειών που υφίστανται κίνηση (συνήθως αυτή η κίνηση είναι περιστροφική). Υπάρχουν πολλές εφαρμογές των ρουλεμάν σε ανεμογεννήτριες, όπως το ότι βρίσκονται στην βάση του κύριου άξονα, σε κιβώτια ταχυτήτων, γεννήτριες, συστήματα προσανατολισμού, συστήματα αλλαγής γωνιάς πτερυγίου. Τα ρουλεμάν με σφαιρίδια (Ball bearings) χρησιμοποιούνται ευρέως σε εξαρτήματα ανεμογεννητριών. Αποτελούνται από τέσσερα μέρη: έναν εσωτερικό δακτύλιο, έναν εξωτερικό δακτύλιο, τις μπάλες και το κλουβί. Τα σφαιρίδια κινούνται σε καμπυλόγραμμες αυλακώσεις μέσα στα δακτυλίδια. Το κλουβί κρατά τις μπάλες και τις εμποδίζει να αγγίζουν η μια την άλλη. Τα σφαιρίδια του ρουλεμάν κατασκευάζονται σε διάφορους τύπους. Μπορεί να είναι σχεδιασμένα για να δέχονται αξονικά φορτία ή ακτινικά φορτία. Σε γενικές γραμμές, οι πιο σημαντικοί παράγοντες στο σχεδιασμό ενός ρουλεμάν είναι τα φορτία που θα βιώνει και ο αριθμός των περιστροφών που αναμένεται να επιβιώσει.



27. Επιλογές κύριου άξονα

Κιβώτιο ταχυτήτων (Gearbox)

Τα περισσότερα συστήματα μετάδοσης κίνησης σε ανεμογεννήτριες περιλαμβάνουν κιβώτιο ταχυτήτων για την αύξηση της ταχύτητας του άξονα εισόδου προς την γεννήτρια. Ο λόγος που απαιτείται αύξηση της ταχύτητας προκύπτει από τις χαμηλές στροφές που περιστρέφεται ο ρότορας σε σχέση με αυτές που απαιτούνται για να λειτουργήσει σωστά μια ηλεκτρική γεννήτρια. Οι ροτορες μικρών ανεμογεννητριών περιστρέφονται με ταχύτητες μερικών εκατοντάδων στροφών αν λεπτό (rpm), ενώ οι μεγάλες ανεμογεννήτριες περιστρέφονται ακόμα πιο αργά. Οι περισσότερες συμβατικές ηλεκτρικές γεννήτριες περιστρέφονται στις 1800 στροφές (60Hz) ή 1500 στροφές (50Hz). Ορισμένα κιβώτια ταχυτήτων εκτελούν και άλλες λειτουργίες εκτός από την αύξηση της ταχύτητας, όπως η υποστήριξη του ρουλεμάν του κύριου άξονα. Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι ένα από τα πιο βαριά και ακριβά εξαρτήματα σε μια ανεμογεννήτρια, που συνήθως σχεδιάζεται και παρέχεται από διαφορετικό κατασκευαστή από αυτόν που κατασκευάζει την ανεμογεννήτρια. Λόγω των συνθηκών λειτουργίας που βιώνει μια ανεμογεννήτρια, τα κιβώτια ταχυτήτων είναι αρκετά διαφορετικά από αυτά που χρησιμοποιούνται σε άλλες εφαρμογές. Είναι επιτακτική ανάγκη να υπάρχει πλήρη κατανόηση του κιβωτίου ταχυτήτων από τον σχεδιαστή της ανεμογεννήτριας όπως και το να υπάρχει επαρκής γνώση από τον σχεδιαστή του κιβωτίου για το πώς λειτουργεί η ανεμογεννήτρια. Η εμπειρία έχει δείξει ότι τα κακοσχεδιασμένα κιβώτια ταχυτήτων είναι βασική πηγή προβλημάτων στις ανεμογεννήτριες.

Όλα τα κιβώτια ταχυτήτων έχουν κάποιες ομοιότητες: αποτελούνται από μέρη που μεταδίδουν ροπή, όπως άξονες και γρανάζια, στοιχειά μηχανής όπως ρουλεμάν και δομικά στοιχειά όπως την θήκη. Στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχει ένας άξονας εισόδου και ένας άξονας εξόδου αλλά υπάρχει και περίπτωση με πολλαπλούς άξονες εξόδου συνδεδεμένους σε πολλαπλές γεννήτριες.

Υπάρχουν δυο βασικοί τύποι κιβωτίων ταχυτήτων που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ανεμογεννητριών:

- Κιβώτια ταχυτήτων παράλληλου άξονα
- Πλανητικά κιβώτια ταχυτήτων.

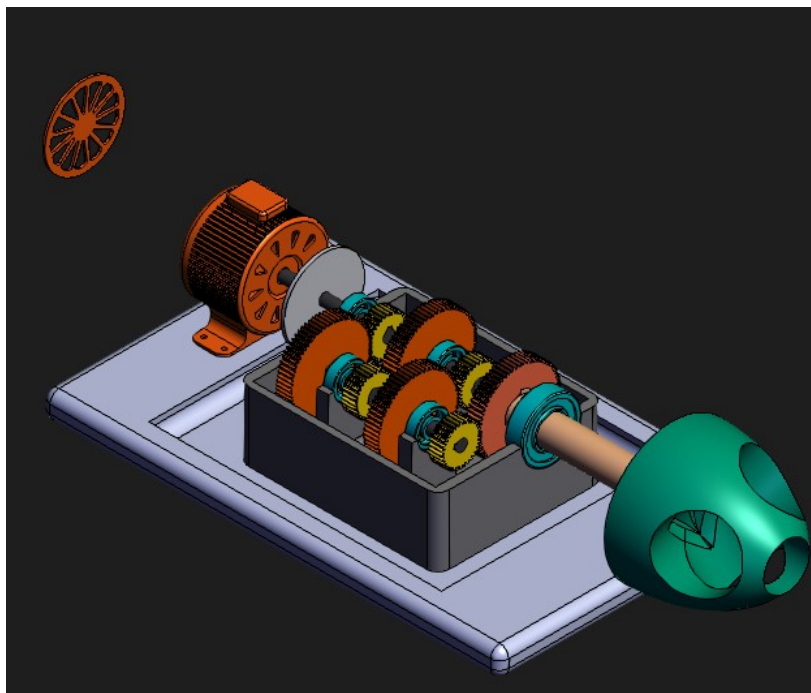
Στα κιβώτια ταχυτήτων παράλληλου άξονα, ο υψηλής ταχύτητας άξονας είναι παράλληλος στον άξονα χαμηλής ταχύτητας. Οι δυο αυτοί άξονες υποστηρίζονται από ρουλεμάν που είναι τοποθετημένα στην θήκη. Σε ένα κιβώτιο ταχυτήτων ενός σταδίου (single stage) υπάρχουν δυο άξονες, ο χαμηλής ταχύτητας και ο υψηλής ταχύτητας, όπου και οι δυο άξονες περνούν μέσα από την θήκη. Ο ένας από τους δυο είναι συνδεδεμένος στον κύριο άξονα ή τον ρότορα και ο άλλος με την γεννήτρια. Σε κάθε άξονα υπάρχουν δυο γρανάζια διαφορετικού μεγέθους με το ένα στον άξονα χαμηλής ταχύτητας να είναι το μεγαλύτερο από τα δυο.

Τα πλανητικά κιβώτια ταχυτήτων έχουν πολλές σημαντικές διαφορές από τα κιβώτια παράλληλου άξονα. Πιο συγκεκριμένα, οι άξονες εισόδου και εξόδου είναι ομοαξονική. Επιπλέον, υπάρχουν πολλά ζεύγη δοντιών (από τα γρανάζια) που εμπλέκονται ανά πάσα στιγμή με αποτέλεσμα τα φορτία σε κάθε γρανάζι να μειώνεται. Αυτό κάνει τα πλανητικά κιβώτια ταχυτήτων σχετικά ελαφριά και συμπαγή. Στα πλανητικά κιβώτια ταχυτήτων, ένας άξονας χαμηλής ταχύτητας, που υποστηρίζεται από ρουλεμάν στην θήκη είναι άκαμπτα συνδεδεμένος με έναν πλανητικό φορέα. Ο φορέας αυτός έχει τρία πανομοιότυπα μικρά γρανάζια, γνωστά ως πλανήτες, τα οποία είναι τοποθετημένα σε κοντούς άξονες, ρουλεμάν και κινούνται ελεύθερα. Αυτοί οι πλανήτες συνεργάζονται με ένα γρανάζι δακτυλίου μεγάλης διαμέτρου και ένα μικρο γρανάζι που αποκαλείται ήλιος. Όταν ο χαμηλής ταχύτητας άξονας και ο φορέας περιστραφεί, τότε η δικτύωση των πλανητών στο γρανάζι δακτυλίου τείνει να περιστρέφει τους πλανήτες με μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτή που κινείται ο φορέας. Η δικτύωση των πλανητών με τον ήλιο τείνει να περιστρέφει τον ίδιο τον ήλιο όπου αυτός με την σειρά του περιστρέφει τον άξονα υψηλής ταχύτητας.

Τα φορτία που πρέπει να αντέξει το κιβώτιο ταχυτήτων οφείλονται κυρίως σε αυτά που επιβάλλει ο ρότορας. Αυτά περιλαμβάνουν τη ροπή του κύριου άξονα και μπορεί να περιλαμβάνουν το βάρος του ρότορα και διάφορα δυναμικά φορτία, ανάλογα τον βαθμό ενσωμάτωσης του κιβωτίου ταχυτήτων με τον κύριο άξονα και τα ρουλεμάν. Φορτία επιβάλλονται επίσης και από την γεννήτρια, τόσο κατά την λειτουργία όσο και κατά την εκκίνηση, καθώς και με οποιοδήποτε μηχανικό φρένο που βρίσκεται στην πλευρά υψηλής ταχύτητας του κιβωτίου ταχυτήτων.

Τα κιβώτια ταχυτήτων μπορεί να είναι πηγή θορύβου. Η ποσότητα του θορύβου είναι μια συνάρτηση μεταξύ κάποιων πραγμάτων, όπως τον τύπο κιβωτίου, τα υλικά από τα οποία

έχουν κατασκευαστεί τα γρανάζια και το πως αυτά έχουν κοπεί. Ο σχεδιασμός κιβωτίων ταχυτήτων για ελάχιστη παραγωγή θορύβου είναι επί του παρόντος ένας τομέας ενδιαφέροντος. Τέλος, η αξιοπιστία αποτελεί βασικό στοιχείο στο σχεδιασμό ενός κιβωτίου ταχυτήτων. Η διαδικασία σχεδίασης πρέπει να είναι λεπτομερής και προσεκτική, έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι τελικό προϊόν είναι επαρκώς αξιόπιστο. Απαιτεί στενή συνεργασία μεταξύ του σχεδιαστή του στροβίλου και του σχεδιαστή κιβωτίων ταχυτήτων.



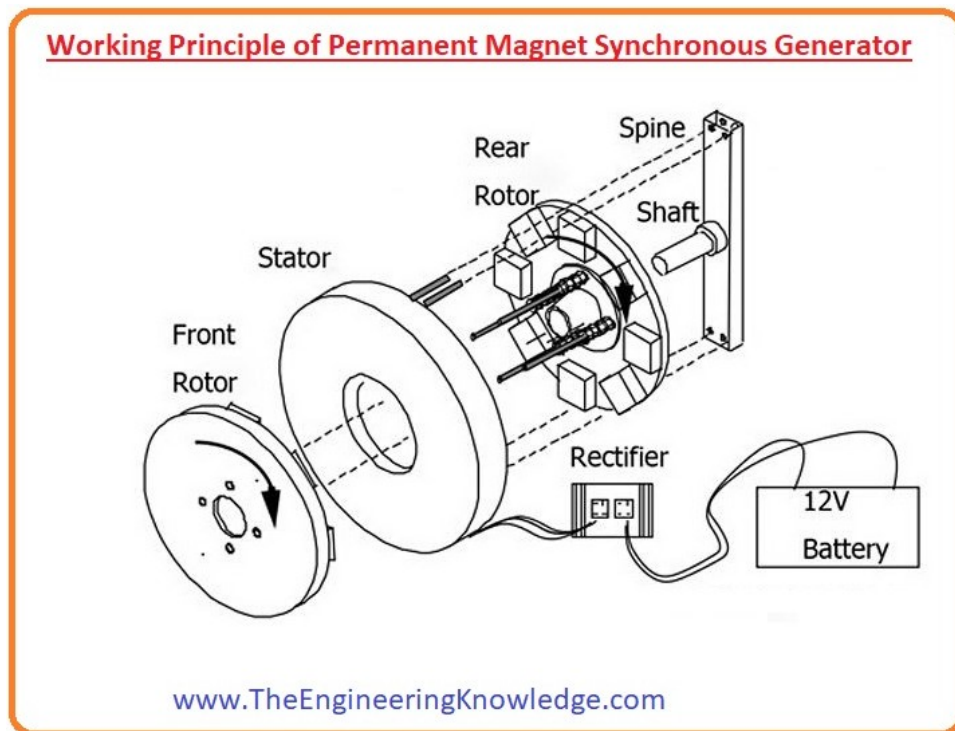
28. Κιβώτιο ταχυτήτων ανεμογεννήτριας

Ηλεκτρική γεννήτρια (Electric generator)

Ένας ιστορικά σημαντικός τύπος ηλεκτρικής μηχανής για εφαρμογές ανεμογεννητριών είναι η γεννήτρια συνεχούς ρεύματος (DC) παράλληλης διέγερσης ή αυτοδιέγερσης, που κάποτε χρησιμοποιούνταν σε μικρές γεννήτριες που φόρτιζαν μπαταρίες. Σε αυτές τις γεννήτριες το τύλιγμα διέγερσης είναι τον στάτη και το τύλιγμα του σπλισμού στον ρότορα. Το ηλεκτρικό πεδίο δημιουργείται από ρεύματα που περνούν μέσα από το τύλιγμα διέγερσης που είναι παράλληλο προς το τύλιγμα του σπλισμού. Το παραγόμενο ρεύμα περνάει από εξαρτήματα ηλεκτρονικών ισχύος ώστε να γίνει συνεχές. Σε αυτές τις γεννήτριες, το ρεύμα διέγερσης και επομένως το μαγνητικό πεδίο αυξάνεται με την ταχύτητα λειτουργίας (μέχρι ένα σημείο). Η τάση στον σπλισμό και η ηλεκτρική ροπή επίσης

αυξάνονται με την ταχύτητα. Η πραγματική ταχύτητα της ανεμογεννήτριας καθορίζεται από την ισορροπία μεταξύ της ροπής από τον ρότορα της ανεμογεννήτριας και την ηλεκτρική ροπή. Τέτοιου είδους γεννήτριες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται σπάνια σήμερα λόγω του υψηλού κόστους και της συντήρησης που απαιτούν.

Ένας τύπος ηλεκτρικής μηχανής που χρησιμοποιείται πιο συχνά σε εφαρμογές ανεμογεννητριών είναι η γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη, που είναι η πλέον δημοφιλής επιλογή για τις περισσότερες μικρές ανεμογεννήτριες (μέχρι τουλάχιστον 10 kW) και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες. Σε αυτές τις γεννήτριες, μόνιμοι μαγνήτες παρέχουν το μαγνητικό πεδίο, επομένως δεν υπάρχει ανάγκη για τύλιγμα διέγερσης ή παροχή ρεύματος στο τύλιγμα διέγερσης. Σε ένα παράδειγμα, οι μαγνήτες ενσωματώνονται κατακευθιάν σε έναν κυλινδρικό ρότορα από χυτό αλουμίνιο. Η ισχύς λαμβάνεται από τον σταθερό σπλισμό οπότε δεν υπάρχει ανάγκη για επιπλέον εξαρτήματα κάνοντας έτσι την κατασκευή της γεννήτριας αρκετά απλή, και ανθεκτική.



29. Σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη

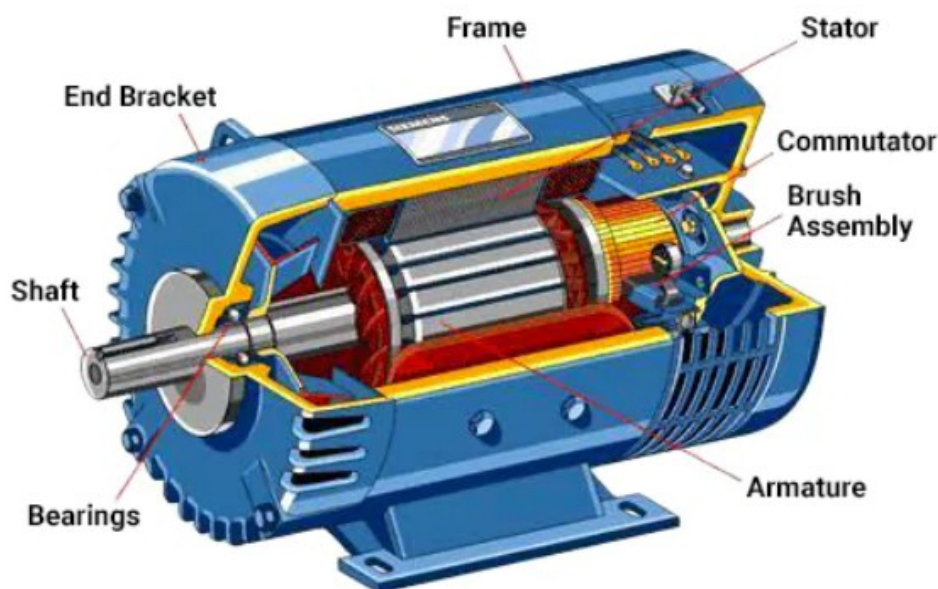
Υπάρχουν τουλάχιστον άλλοι δυο τύποι γεννητριών που μπορούν να ληφθούν υπόψη για ανεμογεννήτριες: 1) Γεννήτριες άμεσης μετάδοσης, 2) Γεννήτριες μαγνητικής αντίστασης με μεταγωγή.

Οι γεννήτριες άμεσης μετάδοσης είναι ουσιαστικά σύγχρονες μηχανές ειδικής σχεδίασης. Η κύρια διάφορα σε σχέση με τις τυπικές μηχανές είναι ότι έχουν κατασκευαστεί με αρκετούς πόλους έτσι ώστε να επιτρέπουν στον ρότορα της γεννήτριας να κινείται με την ίδια ταχύτητα που κινείται και ο ρότορας της ανεμογεννήτριας. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη για κιβώτιο ταχυτήτων. Λόγω του μεγάλου αριθμού πόλων, η διάμετρος της γεννήτριας είναι σχετικά μεγάλη. Οι γεννήτριες απευθείας μετάδοσης χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος.

Οι γεννήτριες μαγνητικής αντίστασης με μεταγωγή χρησιμοποιούν έναν ρότορα με τους πόλους να προεξέχουν. Όταν παρέχεται ρεύμα στο τύλιγμα του στάτη, η μαγνητική αντίσταση του ρότορα δημιουργεί μια δύναμη που τείνει να ευθυγραμμίσει τον πόλο του ρότορα με τον κοντινότερο πόλο του στάτη. Για να διατηρηθεί η περιστροφή, ένα ηλεκτρονικό σύστημα έλεγχου αλλάζει τις περιελίξεις των διαδοχικών πόλων του στάτη με την σειρά έτσι ώστε το μαγνητικό πεδίο του στάτη να «οδηγεί» τον πόλο του ρότορα, τραβώντας τον προς τα εμπρός. Αυτό το είδος γεννητριών που αναπτύσσεται επί του παρόντος, προορίζεται για χρήση με ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος. Τέλος, λόγω της απλής κατασκευής τους είναι πιο οικονομικές καθώς χρειάζονται λιγότερη συντήρηση.

Κατασκευάστηκα η γεννήτρια αποτελείται από διάφορα εξαρτήματα. Ο στάτης κατασκευάζεται συνήθως από χάλυβα. Στο εμπόριο το περίβλημα διατίθεται σε τυπικά μεγέθη. Οι περιελίξεις του οπλισμού και της διέγερσης είναι από χάλκινο σύρμα, τοποθετημένο σε υποδοχές. Το σύρμα δεν είναι μόνο μονωμένο, αλλά προστίθεται επιπλέον μόνωση για την προστασία των περιελίξεων από το περιβάλλον και την σταθεροποίηση τους. Χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι μόνωσης ανάλογα με την εφαρμογή. Το εξωτερικό μέρος της γεννήτριας προορίζεται για την προστασία του εσωτερικού από βροχή, σκόνη, κ.λπ. Χρησιμοποιούνται συνήθως δυο σχέδια: 1) Ανοιχτό στεγανό και 2) εντελώς κλειστό, με ανεμιστήρα (TEFC). Ο ανοιχτός σχεδιασμός με στεγανοποίηση έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές ανεμογεννήτριες, επειδή είναι μια λιγότερη δαπανηρή λύση και υποτίθεται ότι η άτρακτος προστατεύει την γεννήτρια από το περιβάλλον. Σε πολλές περιπτώσεις όμως

φαίνεται ότι η πρόσθετη προστασία που παρέχει ένα σχέδιο TEFC μπορεί να αξίζει το κόστος.



30. Τα βασικά μέρη μιας γεννήτριας

Φρένα (Brakes)

Σχεδόν όλες οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν μηχανικό φρένο κάπου στο σύστημα μετάδοσης κίνησης. Ένα τέτοιο φρένο συνήθως περιλαμβάνεται με ένα αεροδυναμικό φρένο. Υπάρχουν περιπτώσεις που για ορισμένα σχέδια ανεμογεννητριών απαιτούνται δυο ανεξάρτητα συστήματα πέδησης, ένα από τα οποία συνήθως είναι αεροδυναμικό και το άλλο βρίσκεται στο σύστημα μετάδοσης κίνησης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το μηχανικό φρένο είναι ικανό να σταματήσει τον ρότορα. Σε άλλες περιπτώσεις, το μηχανικό φρένο χρησιμοποιείται για στάθμευση, δηλαδή εμποδίζει τον ρότορα να περιστραφεί όταν η ανεμογεννήτρια δεν λειτουργεί. Τα φρένα για στάθμευση τείνουν να χρησιμοποιούνται όλο και λιγότερο στις νέες ανεμογεννήτριες. Γενικά τέτοια ελαφριά φρένα θα χρησιμοποιούνται μόνο σε ανεμογεννήτριες με πτερύγια ελεγχόμενης κλίσης.

Υπάρχουν δυο τύποι μηχανικών φρένων που χρησιμοποιούνται συνήθως σε ανεμογεννήτριες: 1) Δισκόφρενα και 2) φρένα με συμπλέκτη.

Το δισκόφρενο λειτουργεί με παρόμοιο τρόπο με αυτό ενός αυτοκινήτου. Ένας ατσάλενιος δίσκος είναι άκαμπτα στερεωμένος στον άξονα που πρόκειται να φρενάρει. Κατα το φρενάρισμα ενεργοποιείται υδραυλικά η δαγκάνα και πιέζει τα τακάκια των φρένων πάνω στο δίσκο. Η δύναμη που προκύπτει δημιουργεί μια αντίθετη ροπή στην κίνηση του δίσκου, επιβραδύνοντας έτσι τον ρότορα.

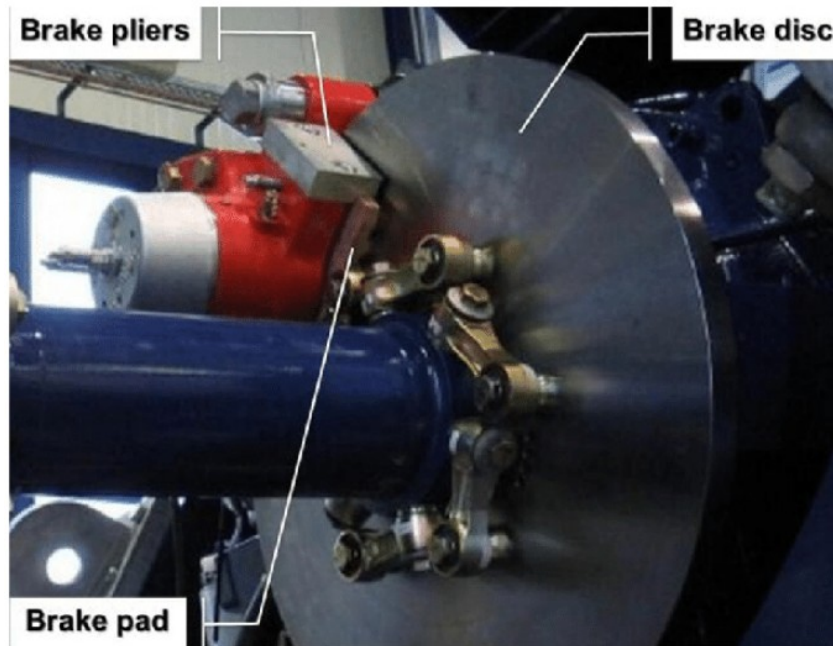
Τα φρένα τύπου συμπλέκτη αποτελούνται από τουλάχιστον μια πλάκα πίεσης και έναν δίσκο τριβής. Η ενεργοποίηση των φρένων συμπλέκτη γίνεται συνήθως μέσω ελατηρίων, οπότε είναι ασφαλή σε αστοχίες από τον σχεδιασμό τους. Τα φρένα απελευθερώνονται από πεπιεσμένο αέρα ή υδραυλικό υγρό.

Ένας άλλος λιγότερο κοινός, τύπος φρένων βασίζεται σε ηλεκτρισμό και είναι γνωστός ως «δυναμικό» φρένο. Η βασική αρχή λειτουργίας είναι η τροφοδοσία ρεύματος σε μια τράπεζα αντιστάσεων αφού αποσυνδεθεί η γεννήτρια από το ηλεκτρικό δίκτυο. Αυτό δημιουργεί ένα φορτίο στη γεννήτρια, και ως εκ τούτου ροπή στον ρότορα, με αποτέλεσμα την επιβράδυνση του.

Τα μηχανικά φρένα μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε σημείο στο σύστημα μετάδοσης κίνησης. Για παράδειγμα, μπορεί να βρίσκονται είτε στην πλευρά χαμηλής ταχύτητας είτε στην υψηλής ταχύτητας του κιβωτίου ταχυτήτων. Εάν βρίσκονται στην πλευρά υψηλής ταχύτητας, μπορούν να τοποθετηθούν και στις δυο πλευρές της γεννήτριας. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι εάν τα φρένα βρίσκονται στην πλευρά χαμηλής ταχύτητας, θα πρέπει να ασκήσουν πολύ μεγαλύτερη ροπή από ότι αν βρισκότουσαν στην πλευρά υψηλής ταχύτητας. Από την άλλη, εάν το φρένο είναι στην πλευρά της υψηλής ταχύτητας, θα το κάνει να ενεργεί μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων αυξάνοντας έτσι την φθορά του. Επιπλέον, σε περίπτωση αστοχίας του κιβωτίου ταχυτήτων, το φρένο στην πλευρά της υψηλής ταχύτητας μπορεί να αποτύχει στην επιβράδυνση του ρότορα.

Ένα φρένο που προορίζεται να σταματήσει έναν ρότορα θα πρέπει να εφαρμόζει κατευθείαν ροπή και να φτάνει στην μέγιστη εντός λίγων δευτερολέπτων. Ο επιλεγμένος χρόνος αύξησης της ροπής είναι μια ισορροπία μεταξύ στιγμιαίας και αργής εφαρμογής της ροπής ανάλογα με την επιτάχυνση του ρότορα και της θερμοκρασίας των φρένων κατά την διάρκεια της επιβράδυνσης. Κανονικά, ολόκληρη η διαδικασία πέδησης, από την ενεργοποίηση των φρένων μέχρι την πλήρη ακινητοποίηση του ρότορα θα πρέπει να ολοκληρώνεται σε λιγότερο από 5 δευτερόλεπτα. Η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του

φρένου είναι ένας σημαντικός παράγοντας. Πρώτα από όλα, το φρένο πρέπει να απορροφά όλη την κινητική ενέργεια του ρότορα όταν αυτός περιστρέφεται με την μέγιστη ταχύτητα του. Πρέπει επίσης να μπορεί να απορροφά οποιαδήποτε πρόσθετη ενέργεια που θα μπορούσε να αποκτήσει ο ρότορας κατά την περίοδο στάσης του.



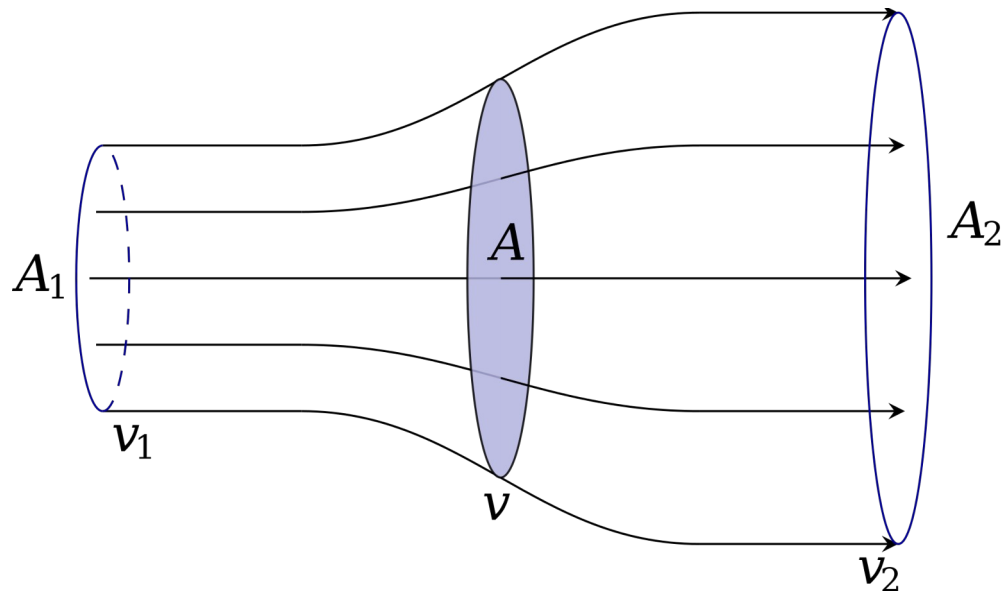
31. Δοκιμαστής φρένων ανεμογεννητριών

3.3 Νόμος του Betz

Ο νόμος του Betz υποδεικνύει τη μέγιστη ισχύ που μπορεί να εξαχθεί από τον άνεμο, ανεξάρτητα από το σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας. Εκδόθηκε το 1919 από τον Γερμανό φυσικό Άλμπερτ Μπέτς. Σύμφωνα με το νόμο του Betz, καμία ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να εκμεταλλευτεί περισσότερο από το $16/27$ (59,3%) της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Ο συντελεστής $16/27$ (0,593) είναι γνωστός ως συντελεστής Betz. Οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά δίκτυα επιτυγχάνουν το 75 – 80% του ορίου Betz όταν βρίσκονται σε μέγιστη απόδοση.

Οι ανεμογεννήτριες λειτουργούν με το να επιβραδύνουν τον διερχόμενο άνεμο με σκοπό την εξαγωγή ενέργειας. Εάν μια ανεμογεννήτρια ήταν 100% αποδοτική, τότε όλος ο άνεμος θα έπρεπε να σταματάει όταν έρχεται σε επαφή με την ανεμογεννήτρια, κάτι που δεν είναι δυνατό. Προκειμένου να σταματήσει εντελώς ο άνεμος, ο αέρας δεν θα απομακρυνόταν

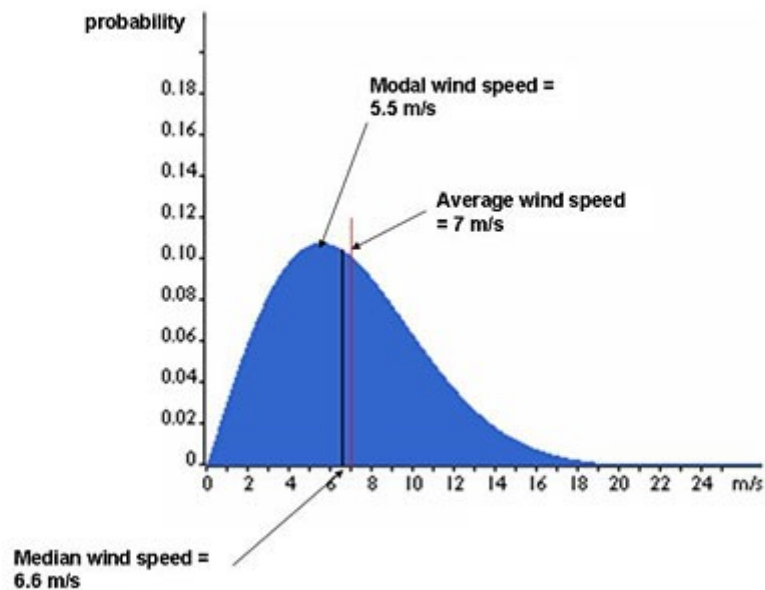
από το πίσω μέρος της ανεμογεννήτριας, κάτι που θα εμπόδιζε την είσοδο περαιτέρω αέρα και θα προκαλούσε διακοπή της περιστροφής της ανεμογεννήτριας.



32. Σχηματική ροή ρευστού μέσω ενός δισκοειδούς ενεργοποιητή. Για ένα ρευστό σταθερής πυκνότητας, το εμβαδόν της διατομής ποικίλλει αντιστρόφως ανάλογα με την ταχύτητα.

3.4 Διακυμάνσεις ταχύτητας ανέμου : Διανομή Weibull

Είναι πολύ σημαντικό για την αιολική βιομηχανία να μπορεί να περιγράψει τη διακύμανση των ταχυτήτων του ανέμου. Οι σχεδιαστές των ανεμογεννητριών χρειάζονται αυτή τη πληροφορία έτσι ώστε να βελτιστοποιήσουν τον σχεδιασμό και να ελαχιστοποιηθεί το κόστος παραγωγής. Εάν μετριάσουμε τις ταχύτητες του ανέμου κατά διάρκεια ενός έτους σε μια περιοχή, θα παρατηρήσουμε ότι οι ισχυροί άνεμοι είναι σπάνιοι, ενώ οι μέτριας και χαμηλής έντασης αρκετά συνηθισμένοι. Η διακύμανση του ανέμου σε μια τυπική τοποθεσία περιγράφεται συνήθως χρησιμοποιώντας τη λεγόμενη κατανομή Weibull. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα η μέση ταχύτητα του ανέμου στην συγκεκριμένη τοποθεσία είναι 7 μέτρα ανά δευτερόλεπτο και το σχήμα της καμπύλης καθορίζεται από τη παράμετρο σχήματος.



33. Κατανομή Weibull για παράμετρο σχήματος 2.

Στην πραγματικότητα αυτό το γράφημα μας δείχνει την κατανομή πυκνότητας πιθανότητας. Η περιοχή κάτω από την καμπύλη είναι 1, αφού η πιθανότητα ο άνεμος να φυσά με κάποια ταχύτητα συμπεριλαμβανομένου του μηδενός πρέπει να είναι 100%. Το μισό της μπλε περιοχής βρίσκεται στα αριστερά της κάθετης μαύρης γραμμής στα 6,6 m/s. Το 6,6 m/s ονομάζεται διάμεσος της κατανομής και αυτό σημαίνει ότι τις μισές φορές θα φυσάει λιγότερο από 6,6 μέτρα ανά δευτερόλεπτο και τις άλλες μισές θα φυσάει περισσότερο από 6,6 μέτρα ανά δευτερόλεπτο. Η κόκκινη γραμμή απεικονίζει τη μέση ταχύτητα του ανέμου που είναι στα 7 m/s. Η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι στην πραγματικότητα ο μέσος όρος των παρατηρήσεων που θα λάβουμε σε αυτή την τοποθεσία. Όπως παρατηρούμε η κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου είναι λοξή δηλαδή μη συμμετρική. Κάποιες φορές θα έχουμε πολύ υψηλές ταχύτητες άνεμου, άλλα θα είναι πολύ σπάνιες. Οι ταχύτητες άνεμου στα 5,5 m/s, από την άλλη, είναι οι πιο συνηθισμένες. Η τιμή των 5,5 μέτρων ανά δευτερόλεπτο ονομάζεται τυπική τιμή της κατανομής. Αν πολλαπλασιάσουμε κάθε μικροσκοπικό διάστημα ταχύτητας ανέμου με την πιθανότητα να πάρουμε τη συγκεκριμένη ταχύτητα ανέμου και τα αθροίσουμε όλα, θα έχουμε τη μέση ταχύτητα άνεμου.

Η στατιστική κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου ποικίλλει από μέρος σε μέρος σε όλο τον κόσμο, ανάλογα με τις τοπικές κλιματικές συνθήκες, την περιοχή και την επιφάνεια. Η κατανομή Weibull μπορεί επομένως να ποικίλλει, τόσο στο σχήμα της όσο και στη μέση τιμή της. Εάν η παράμετρος σχήματος είναι ακριβώς 2, όπως στο παραπάνω γράφημα, τότε η κατανομή είναι γνωστή ως κατανομή Rayleigh. Οι κατασκευαστές ανεμογεννητριών συχνά δίνουν τα στοιχεία απόδοσης για της μηχανές αυτές χρησιμοποιώντας τη διανομή Rayleigh.

3.5 Θεμελιώδης Εξίσωση Αιολικής Ενέργειας

Η θεμελιώδης εξίσωση της αιολικής ενέργειας απαντά στο πιο βασικό ποσοτικό ερώτημα – πόση ενέργεια έχει ο άνεμος. Αρχικά πρέπει να διαχωρίσουμε τις έννοιες της ισχύς και της ενέργειας. Η ισχύς είναι ρυθμός της παραγόμενης ενέργειας ανά μονάδα χρόνου, άρα η ισχύς του ανέμου είναι ο ρυθμός της ροής του ανέμου μέσα από ένα “παράθυρο”. Η αιολική ενέργεια εξαρτάται από:

- Ποσότητα αέρα (ο όγκος του αέρα)
- Η ταχύτητα του ανέμου (το μέγεθος της ταχύτητας του)
- Μάζα του αέρα (που σχετίζεται με τον όγκο μέσω της πυκνότητας)

Η αιολική ισχύς ποσοτικοποιεί την αιολική ενέργεια που ρέει μέσω μιας περιοχής ενδιαφέροντος ανά μονάδα χρόνου.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3$$

Όπου: P : ισχύς του ανέμου μέσω μιας περιοχής ενδιαφέροντος.

ρ : η πυκνότητα του ανέμου (1,225 kg/m³ στο επίπεδο της θάλασσας)

A : επιφάνεια σάρωσης (m²)

U^3 : η ταχύτητα του ανέμου (m/s)

Είναι σύνηθες να κανονικοποιείται η ισχύς του ανέμου διαιρώντας με την περιοχή ενδιαφέροντος για συγκεκριμένη ροή ισχύος. Αυτό οδηγεί στον ορισμό της κινητικής ροής αιολικής ενέργειας, γνωστή και ως πυκνότητα αιολικής ενέργειας (Wind Power Density).

$$WPD = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^3$$

3.6 Αποτελεσματικότητα στην εκμετάλλευση αιολικής ενέργειας.

Θεμελιωδώς, η ενέργεια που εξάγουμε από τον άνεμο δεν είναι σε μέγιστη απόδοση και ποσοτικοποιείται από τον συντελεστή ισχύος (Power Coefficient). Η διαδικασία μετατροπής ενέργειας που μετατρέπει την αιολική ενέργεια σε ηλεκτρική περνά από τρία κύρια στάδια, τα οποία μπορούν να χαρακτηριστούν ως αεροδυναμικά, μηχανικά και ηλεκτρικά βήματα μετατροπής. Σε κάθε βήμα χάνεται λίγη ενέργεια και η τελική ηλεκτρική ισχύς είναι πάντα μικρότερη από την συνολική αιολική ισχύ που ξεκινήσαμε. Σαν αεροδυναμική απόδοση συγκαταλέγεται η ικανότητα των πτερυγίων στην μετατροπή της δύναμης του ανέμου σε περιστρεφόμενη κίνηση (μέγιστο CP = όριο Betz = 59%). Η μηχανική αποδοτικότητα επικεντρώνεται κυρίως στον κύριο άξονα και το κιβώτιο ταχυτήτων που αλλάζει την ταχύτητα περιστροφής. Οι απώλειες αυτές λαμβάνουν μέρος κυρίως στα μεγάλα ρουλεμάν που υποστηρίζουν τον κύριο άξονα και είναι απώλειες τριβής. Το τελευταίο βήμα στην μετατροπή της ενέργειας συμβαίνει στην ηλεκτρική γεννήτρια. Σε αυτό το σημείο το ρεύμα θα είναι συνεχές ή εναλλασσόμενο (ανάλογα την εφαρμογή). Για να γίνει αυτό το ρεύμα διαθέσιμο στο δίκτυο θα πρέπει να είναι σε συχνότητα 60Hz / 50Hz (ανάλογα με την χώρα) και αυτό επιτυγχάνεται με τα ηλεκτρονικά ισχύος. Τόσο η γεννήτρια όσο και τα ηλεκτρονικά ισχύος συνεισφέρουν στην απώλεια ενέργειας.

$$CP = \frac{P_{electrical}}{P_{wind}} = \eta_b \cdot \eta_m \cdot \eta_e$$

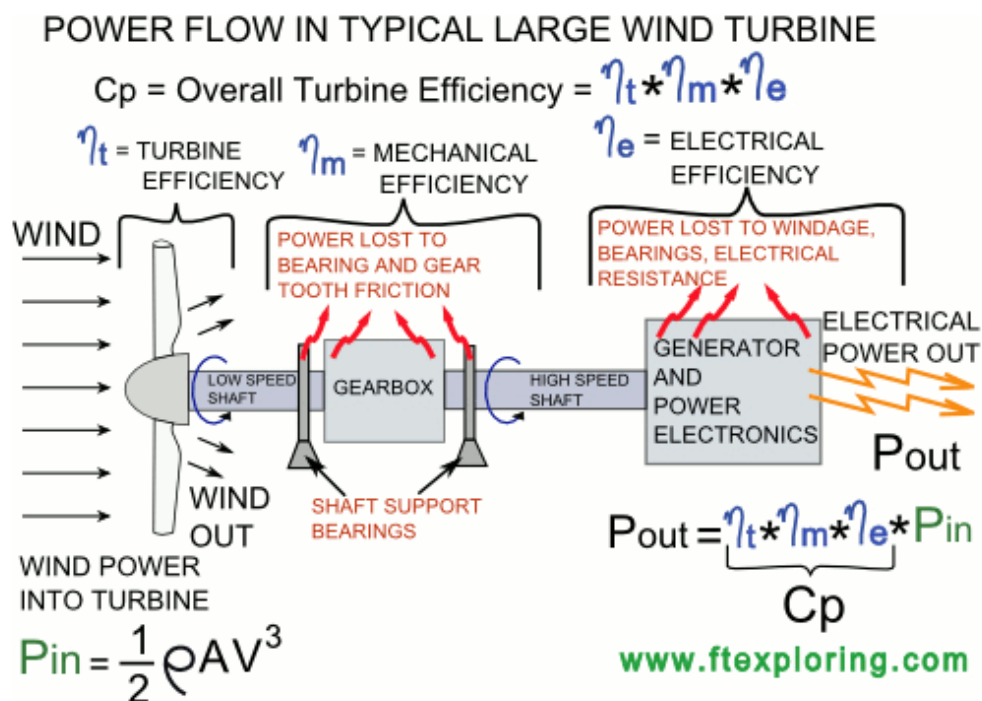
Όπου: η_b : Αεροδυναμική απόδοση πτερυγίων

η_m : Μηχανική απόδοση

η_e : Ηλεκτρική απόδοση

Άρα η πραγματικά εκμεταλλεύσιμη ισχύς είναι:

$$P_{electrical} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot U^3 \cdot C_p$$



34. Η ροή ισχύος σε μια τυπική ανεμογεννήτρια.

Η οποία ισχύς είναι πάντα μικρότερη από την ισχύ του ανέμου. Μια άλλη βασική μέτρηση για την απόδοση της αιολικής ενέργειας είναι ο συντελεστής χωρητικότητας (Capacity Factor) ποσοτικοποιώντας την εγκατεστημένη παραγωγική χωρητικότητα που πραγματικά παράγει ενέργεια. Ο CF είναι ο λόγος της πραγματικά παραγόμενης ενέργειας προς την ενέργεια που θα μπορούσε δυνητικά να παραχθεί από το σύστημα σε ιδανικές περιβαλλοντικές συνθήκες $CF = E_{actual} / E_{ideal}$. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ενέργεια είναι το γινόμενο του χρονικού ρυθμού της, τότε αυτός ο λόγος της ενέργειας είναι ίσος με την

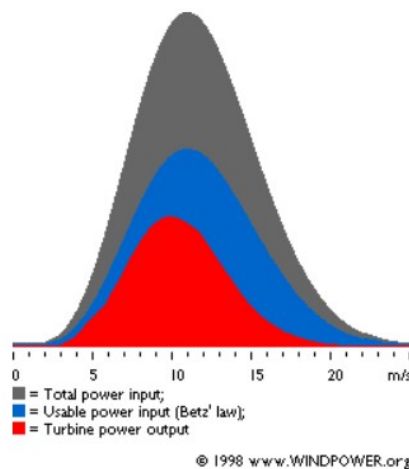
μέση ισχύ P_m προς την ονομαστική ισχύ P_N . Ισοδύναμα, το CF μπορεί να θεωρηθεί ως το κλάσμα του χρόνου κατά το οποίο η ανεμογεννήτρια λειτουργούσε με ονομαστική ισχύ (ονομαστική χωρητικότητα), σε σχέση με το συνολικό χρόνο (για ένα έτος).

$$CF = \frac{E_{actual}}{E_{ideal}} = \frac{time \cdot P_m}{time \cdot P_N} = \frac{E_{actual}}{time \cdot P_N} = \frac{E_{actual} / P_N}{time} = \frac{time_{effective}}{time}$$

Επομένως, η συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας μπορεί να υπολογιστεί πολλαπλασιάζοντας την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας με την χρονική διάρκεια ενός έτους και τον CF.

$$E_{actual} = P_N \cdot time_{effective} = P_N \cdot time \cdot CF$$

Μια τυπική τιμή CF για ένα οικονομικά βιώσιμο έργο είναι 30%, φτάνοντας και το 50% σε περιοχές με πολύ καλό αιολικό δυναμικό. Ο CF βασίζεται στα χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας αλλά και του σημείου που αυτή θα τοποθετηθεί. Ενσωματώνοντας την καμπύλη ισχύος και την διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου έχουμε την πραγματική παραγωγή.

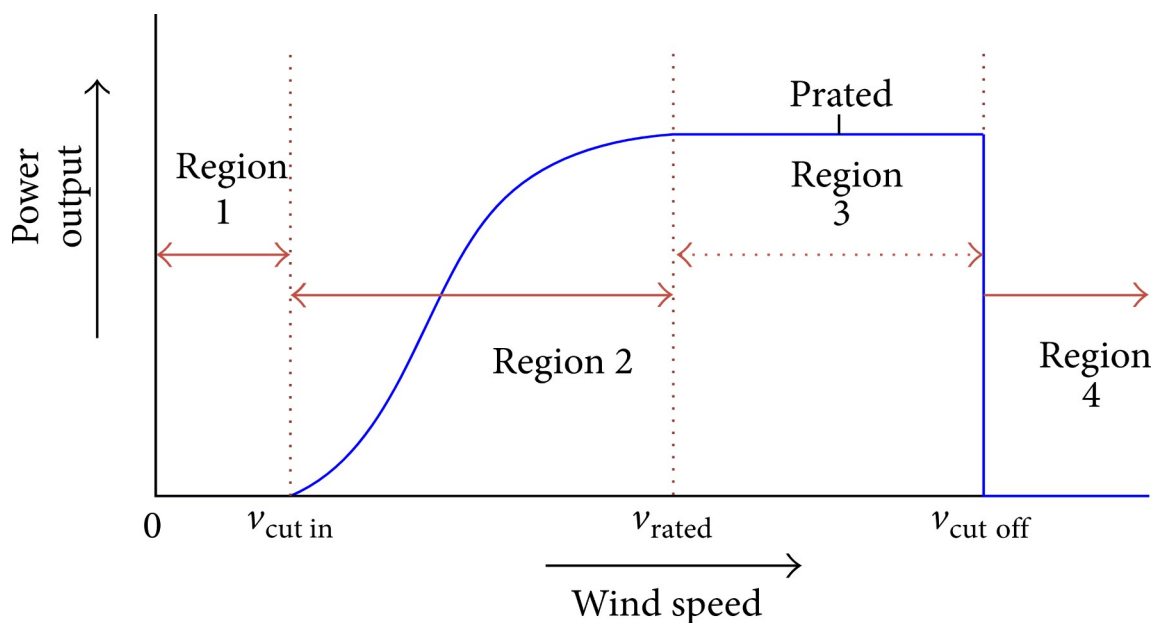


35. Συνολική ισχύς εισόδου και πραγματική ισχύς εξόδου.

3.7 Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας

Η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας απεικονίζει την σχέση μεταξύ της ισχύος στην έξοδο και της ταχύτητας του ανέμου στο ύψος του ρότορα και αποτελεί ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της ανεμογεννήτριας. Η καμπύλη ισχύος μας βοηθά στον εντοπισμό κατάλληλων σημείων για την κατασκευή αιολικών πάρκων και για την παρακολούθηση της απόδοσης των ανεμογεννητριών. Όταν γνωρίζουμε το τυπικό εύρος των ταχυτήτων ανέμου στην τοποθεσία που μας ενδιαφέρει και έχουμε μια καμπύλη ισχύος για την ανεμογεννήτρια που έχουμε επιλέξει, θα είμαστε σε θέση να λάβουμε μια λογική εκτίμηση της ετήσιας παραγωγής και να γνωρίζουμε εάν αυτή καλύπτει τις ανάγκες μας.

Για να σχεδιαστεί μια καμπύλη ισχύος θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ένα ανεμόμετρο τοποθετημένο κοντά στην ανεμογεννήτρια και στο ίδιο ύψος με τον ρότορα για να μετρήσουμε την ταχύτητα του ανέμου σε διάφορες χρονικές στιγμές και ταυτόχρονα θα πρέπει να μετράμε την αντίστοιχη ηλεκτρική ισχύ στην έξοδο της ανεμογεννήτριας. Στην πραγματικότητα, λόγω της φυσικής διακύμανσης, αυτό θα μας έδινε σαν δεδομένα μια σειρά από σημεία που δεν θα βρίσκονταν ακριβώς στην ομαλή καμπύλη που φαίνεται στο γράφημα. Το γράφημα αυτό προκύπτει λαμβάνοντας έναν μέσο όρο όλων των σημείων σχεδιασμένο έτσι ώστε να παρέχει μια λογική εκτίμηση της παραγωγής σε οποιαδήποτε δεδομένη ταχύτητα ανέμου.



36. Τυπική καμπύλη ισχύος ανεμογεννητριών.

- **Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας (V cut-in)** : Σε πολύ χαμηλές ταχύτητες ανέμου, δεν ασκείτε επαρκής ροπή από τον άνεμο στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας για να τα κάνει να περιστρέφονται. Καθώς όμως αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου η ανεμογεννήτρια θα αρχίσει να περιστρέφεται και να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η ταχύτητα για την οποία ο στρόβιλος αρχίζει για πρώτη φορά να περιστρέφεται και να παράγει ισχύ ονομάζεται ταχύτητα έναρξης λειτουργίας.
- **Ταχύτητα ονομαστικής λειτουργίας (rated velocity)**: Καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται πάνω από το σημείο έναρξης λειτουργίας, αυξάνεται και το επίπεδο της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος μέχρι να φτάσει την ονομαστική ισχύς της γεννήτριας (αυτό συμβαίνει σε ταχύτητες ανέμου μεταξύ 12 και 17 μέτρων ανά δευτερόλεπτο). Η ταχύτητα ανέμου για την οποία επιτυγχάνεται η ονομαστική ισχύς εξόδου ονομάζεται ταχύτητα ονομαστικής λειτουργίας. Σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου επιδιώκουμε να διατηρήσουμε την ισχύ σταθερή. Αυτό γίνεται με την αλλαγή της γωνιάς κλίσεως των πτερυγίων, ή με τα μεταπτερύγια (flaps) ή με την αλλαγή της γωνίας θέσης του ρότορα ως προς τον άνεμο ή την αλλαγή της γωνιακής ταχύτητας του ρότορα, ανάλογα φυσικά με την γεννήτρια που έχει το σύστημα.
- **Ταχύτητα διακοπής λειτουργίας (V cut-out)**: Είναι η ταχύτητα ανέμου πάνω από την οποία η ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να λειτουργήσει για λόγους προστασίας (χρησιμοποιείται ένα σύστημα πέδησης για να ακινητοποιηθεί ο ρότορας) και η ενέργεια από τις ταχύτητες αυτές παραμένει τελείως αναξιοποίητη.

Όπως είναι εμφανές και στο διάγραμμα η καμπύλη ισχύος είναι χωρισμένη σε τέσσερις περιοχές που περιγράφουν τις καταστάσεις της ανεμογεννήτριας. Η πρώτη περιοχή περιγράφεται ως έλεγχος ροπής καθώς σε αυτό το κομμάτι υπάρχει η μεγίστη αεροδυναμική απόδοση αφού η ανεμογεννήτρια αυξάνει συνεχώς την ταχύτητα περιστροφής της άρα και την παραγόμενη ισχύ. Η δεύτερη περιοχή είναι η περιοχή μετάβασης και αποτελεί την σταθερή περιοχή λειτουργίας με καλή απόδοση. Η τρίτη περιοχή είναι η περιοχή ελέγχου κλίσεως των πτερυγίων και χαρακτηρίζεται ως σταθερή με ελάχιστες διαταραχές. Τέλος η τέταρτη περιοχή περιγράφεται ως εκτεταμένη λειτουργία της ανεμογεννήτριας με περιορισμό του φορτίου και μερικής ισχύς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΠΕΡΙΒΑΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ

4.1 Θετικές επιπτώσεις

Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας έχει θετικές και αρνητικές περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις. Στην θετική πλευρά, η αιολική ενέργεια θεωρείται γενικά φιλική προς το περιβάλλον, ειδικά όταν λαμβάνουμε υπόψη τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συμβατικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, οι εκτιμήσεις για τις συνολικές εκπομπές (οξείδια θείου και αζώτου, διοξείδιο του άνθρακα) σε σταθμούς άνθρακα και αερίου σε σύγκριση με αυτά των αιολικών συστημάτων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Ρύποι	Συμβατικός άνθρακας	Αέριο (CCGT)	Άνεμος
Οξείδια θείου	630-1370	45-140	2-8
Οξείδια αζώτου	630-1560	650-810	14-22
Διοξείδιο άνθρακα	830-920	370-420	10-17

Πίνακας εκπομπών σταθμών άνθρακα, αερίου και αιολικής ενέργειας (kg/GWh, t/GWh για Διοξείδιο άνθρακα, μέση ταχύτητα ανέμου 6,5 m/s). Ackerman and Soder, 2002.

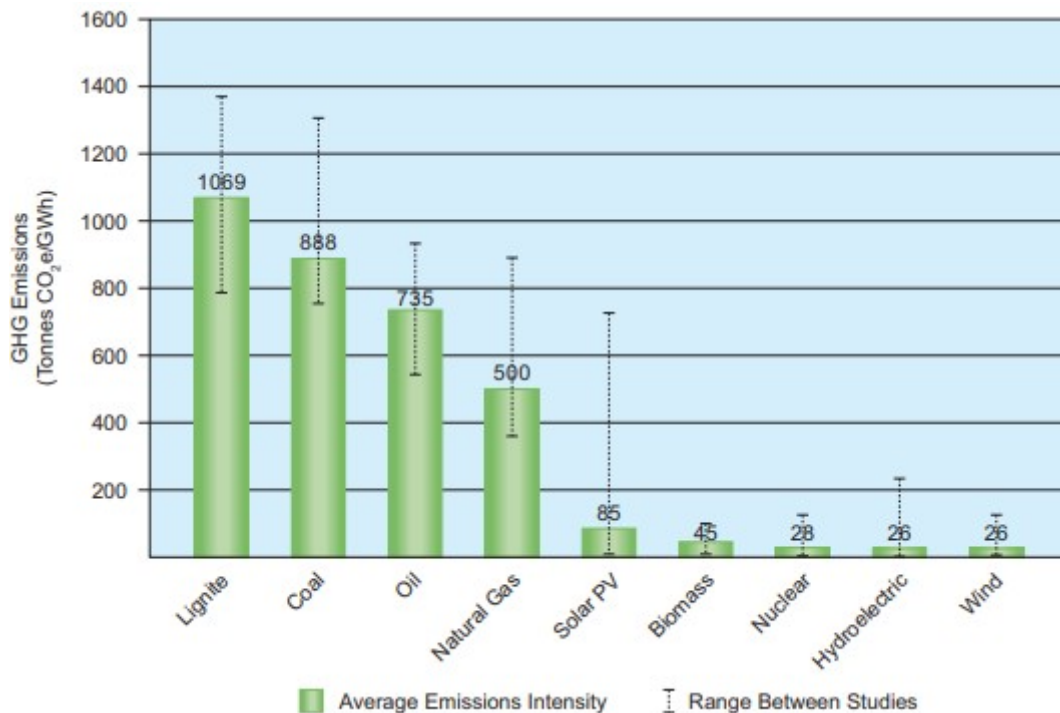
Όπως φαίνεται και στον πίνακα οι εκπομπές ρύπων των αιολικών συστημάτων είναι γενικά μικρές (μια ή δυο τάξεις μεγέθους μικρότερες από αυτές των συμβατικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας). Επίσης, οι έμμεσες εκπομπές που σχετίζονται με την κατασκευή των ανεμογεννητριών και την ανέγερση τους είναι και αυτές μικρές.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και άλλη μια μελέτη από τον διεθνή οργανισμό πυρηνικής ενέργειας (World Nuclear Association) που συγκρίνει τις εκπομπές ρύπων για όλες τις φάσεις του έργου (κατασκευή, λειτουργία και παροπλισμό). Συγκρίνοντας τις εκπομπές ρύπων με την παραγωγή ενέργειας επιτρέπει μια δίκαιη σύγκριση των διαφόρων μεθόδων παραγωγής ανά γιγαβατώρα. Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή, τόσο λιγότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHGs) εκπέμπονται. Σε αυτή την μελέτη γίνεται σύγκριση εκπομπών ρύπων (κύκλου ζωής) για διαφορετικά είδη σταθμών παραγωγής. Τα είδη καυσίμου που

εξετάζονται είναι: Λιγνίτης, Πυρηνικά, Άνθρακας, Φυσικό αέριο, Πετρέλαιο, Ηλιακά, Βιομάζα, Υδροηλεκτρικά, Άνεμος.

Technology	Mean	Low	High
	tonnes CO ₂ e/GWh		
Lignite	1,054	790	1,372
Coal	888	756	1,310
Oil	733	547	935
Natural Gas	499	362	891
Solar PV	85	13	731
Biomass	45	10	101
Nuclear	29	2	130
Hydroelectric	26	2	237
Wind	26	6	124

37. Περίληψη της έντασης εκπομπής GHG (κύκλου ζωής)



38. Μέση ένταση εκπομπών GHG (Κύκλου ζωής)

Όπως παρατηρούμε και στο διάγραμμα, οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν ως καύσιμο τον άνθρακα έχουν τις υψηλότερες εντάσεις εκπομπών GHG με βάση τον κύκλο ζωής ενός τέτοιου σταθμού παραγωγής. Αν και το φυσικό αέριο και σε κάποιο βαθμό το πετρέλαιο έχουν αισθητά χαμηλότερες εκπομπές GHG, η βιομάζα, τα πυρηνικά, υδροηλεκτρικά, ηλιακά και αιολικά έχουν σημαντικά χαμηλότερες εκπομπές GHG (κύκλου ζωής) σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα.

Η αιολική ενέργεια εκτός από θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις έχει και οικονομικές και κοινωνικές. Η βιομηχανία της αιολικής ενέργειας έχει την φήμη ότι δημιουργεί θέσεις εργασίας με αρκετά ανταγωνιστικές απολαβές. Στις ΗΠΑ υπάρχουν πάνω από 120.000 άνθρωποι που εργάζονται στα αιολικά και αυτός ο αριθμός συνεχίζει να αυξάνεται. Σύμφωνα με το γραφείο εργασίας των ΗΠΑ, οι τεχνικοί σέρβις ανεμογεννητριών είναι η δεύτερη ταχύτερα αναπτυσσόμενη δουλειά στις ΗΠΑ για την δεκαετία που μας πέρασε. Η αιολική βιομηχανία έχει την δυνατότητα να υποστηρίξει εκατοντάδες χιλιάδες περισσότερες θέσεις εργασίας έως το 2050. Τα αιολικά έργα στις ΗΠΑ παρέχουν περίπου 1,9 δισεκατομμύρια δολάρια σε κρατικές και τοπικές πληρωμές φόρων και μίσθωσης γης κάθε χρόνο. Οι κοινότητες που αναπτύσσουν αιολική ενέργεια μπορούν να χρησιμοποιούν τα επιπλέον έσοδα και να τα διαθέσουν στους σχολικούς προϋπολογισμούς, στο να μειώσουν τη φορολογική επιβάρυνση των ιδιοκτητών κατοικιών και να υπάρξουν τοπικά έργα υποδομής. Τέλος, οι ανεμογεννήτριες ενώ είναι κοστοβόρα η εγκατάστασή τους, αυτό δεν ισχύει για το κόστος λειτουργίας τους, μιας και το καύσιμο τους (άνεμος) παρέχεται χωρίς κόστος και η συντήρησή τους δεν είναι πολύ συχνή κατά τη διάρκεια ζωής τους.

Αρνητικά και θετικά της αιολικής ενέργειας

Θετικά της αιολικής ενέργειας (+)	Αρνητικά της αιολικής ενέργειας (-)
Ανανεώσιμη και καθαρή πηγή ενέργειας	Διακοπτόμενη
Χαμηλό κόστος λειτουργίας	Ηχορύπανση και οπτική ρύπανση
Αποτελεσματική χρήση του χερσαίου χώρου	Ορισμένες αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις
Η αιολική ενέργεια δημιουργεί θέσεις εργασίας	Η αιολική ενέργεια είναι απομακρυσμένη

4.2 Αρνητικές επιπτώσεις

Στις πιθανές αρνητικές περιβαλλοντικές πτυχές που σχετίζονται με την εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας ή αιολικού πάρκου θα πρέπει να σημειωθεί ότι ένας από τους στόχους ενός συστήματος αιολικής ενέργειας θα πρέπει να είναι η μεγιστοποίηση των θετικών του επιπτώσεων ενώ ταυτόχρονα η ελαχιστοποίηση των αρνητικών του πτυχών. Έκτος από τη σημασία της διαδικασίας χωροθέτησης των αιολικών πάρκων, η δυνητικά δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις των ανεμογεννητριών συνδέονται άμεσα με τα σχεδιαστικά τους υλικά. Με την κατάλληλη σχεδίαση της ανεμογεννήτριας και του συστήματος αιολικής ενέργειας, αυτοί οι δυσμενείς περιβαλλοντικοί παράγοντες μπορούν να ελαχιστοποιηθούν.

Οι πιθανές αρνητικές επιπτώσεις της αιολικής ενέργειας μπορούν να χωριστούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Αλληλεπίδραση πτηνών / νυχτερίδων με ανεμογεννήτριες
- Οπτική επίδραση των ανεμογεννητριών
- Θόρυβος ανεμογεννητριών
- Επιδράσεις ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών ανεμογεννητριών
- Επιπτώσεις στην χρήση της γης
- Άλλες επιπτώσεις

Για τα επίγεια αιολικά συστήματα, τα τρία πρώτα θέματα είναι και τα κύρια περιβαλλοντικά ζητήματα που επηρεάζουν την ανάπτυξη ενός αιολικού συστήματος, αλλά και τα άλλα θέματα θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη. Για τα υπεράκτια αιολικά συστήματα, πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον και την θαλάσσια ζωή.

Αλληλεπίδραση πτηνών / νυχτερίδων με ανεμογεννήτριες: Υπάρχουν δυο κύριες ανησυχίες που σχετίζονται με τις δυσμενείς επιπτώσεις των ανεμογεννητριών στα πτηνά. 1)

Επιπτώσεις στους πληθυσμούς των πτηνών από τους θανάτους που προκαλούνται είτε άμεσα είτε έμμεσα από τις ανεμογεννήτριες και 2) παραβιάσεις του νόμου περί αποδημητικών πτηνών ή/και των απειλούμενων ειδών. Προβλήματα θανάτων πουλιών έχουν εμφανιστεί σε πολλές τοποθεσίες στον κόσμο. Για παράδειγμα στην Ευρώπη, έχουν σημειωθεί σημαντικοί θάνατοι πτηνών στην Tarifa της Ισπανίας (ένα σημαντικό σημείο για την μετανάστευση των πτηνών στη Μεσόγειο Θάλασσα) και σε ορισμένα αιολικά πάρκα στη Βόρεια Ευρώπη.

Η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τα πτηνά με τους παρακάτω τρόπους:

- ✗ Θνησιμότητα από ηλεκτροπληξία και συγκρούσεις
- ✗ Αλλαγές στις συνήθειες αναζήτησης τροφής των πτηνών
- ✗ Αλλαγή των μεταναστευτικών συνηθειών
- ✗ Μείωση του διαθέσιμου οικοτόπου

Αντίθετα, η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας έχει τις εξής ευεργετικές επιδράσεις στα πτηνά:

- ✓ Προστασία της γης από πιο δραματική απώλεια οικοτόπων
- ✓ Παροχή και προστασία φωλιών σε πύργους και βοηθητικές εγκαταστάσεις
- ✓ Προστασία της βάσης των θηραμάτων
- ✓ Προστασία πτηνών από αδιάκριτη παρενόχληση

Συνοψίζοντας, θα πρέπει να επισημανθεί ότι ακόμα κι αν η αρχική έρευνα δείχνει ότι ένα σύστημα αιολικής ενέργειας είναι απίθανο να επηρεάσει σοβαρά τους πληθυσμούς των πτηνών, ενδέχεται να χρειαστούν περαιτέρω μελέτες για την επαλήθευση αυτού του συμπεράσματος. Αυτό θα μπορούσε να περιλαμβάνει την παρακολούθηση των βασικών πληθυσμών και την συμπεριφορά τους πριν ξεκινήσει το έργο, στη συνέχεια παρατηρώντας τόσο την περιοχή ελέγχου όσο και την αιολική τοποθεσία κατά την κατασκευή και την αρχική λειτουργία. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η παρακολούθηση κατά την διάρκεια της λειτουργίας του αιολικού συστήματος ίσως χρειαστεί να συνεχιστεί για χρόνια.

Οπτική επίδραση των ανεμογεννητριών: Τα ζητήματα αισθητικής είναι συχνά ένας πρωταρχικός λόγος ανησυχίας για έργα αιολικής ενέργειας. Ωστόσο, λίγες ρυθμιστικές διεργασίες μπορούν να αντιμετωπίσουν επαρκώς αυτό το ζήτημα. Ένα από τα πιο αντιληπτά δυσμενή περιβαλλοντικά προβλήματα των αιολικών συστημάτων είναι η ορατότητα. Σε σχέση με τις άλλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την αιολική ενέργεια, ο οπτικός αντίκτυπος είναι ο λιγότερο μετρήσιμος. Για παράδειγμα, οι αντίληψη του κοινού μπορεί να αλλάξει με την συνεχή ενημέρωσή τους επάνω στις τεχνολογίες, την θέση των ανεμογεννητριών και πολλούς άλλους παράγοντες. Αν και η αξιολόγηση ενός τοπίου είναι κάπως υποκειμενική, οι επαγγελματίες που εργάζονται σε αυτό τον τομέα εκπαιδεύονται να κάνουν κρίσεις σχετικά με τον οπτικό αντίκτυπο με βάση τις γνώσεις τους για τις ιδιότητες της οπτικής σύνθεσης και προσδιορίζοντας στοιχεία όπως η οπτική διαύγεια, αρμονία, ισορροπία, εστίαση, τάξη, και ιεραρχία. Οι ανεμογεννήτριες πρέπει να τοποθετούνται σε καλά εκτεθειμένες τοποθεσίες προκειμένου να είναι οικονομικά αποδοτικές. Είναι επίσης σημαντικό για έναν μηχανικό να συνειδητοποιήσει ότι η οπτική εμφάνιση μιας ανεμογεννήτριας ή ενός αιολικού πάρκου πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού σε πρώιμο στάδιο. Ο βαθμός της οπτικής επίδρασης επηρεάζεται από παράγοντες όπως ο τύπος του τοπίου, ο αριθμός και ο σχεδιασμός στροβίλων, το σχέδιο της διάταξής τους, το χρώμα τους και ο αριθμός των πτερυγίων.

Θόρυβος ανεμογεννητριών: Το πρόβλημα που σχετίζεται με τον θόρυβο των ανεμογεννητριών είναι μια από τις πιο μελετημένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην αιολική ενέργεια. Τα επίπεδα θορύβου μπορούν να μετρηθούν αλλά όπως και με άλλες παρόμοιες ανθρώπινες ανησυχίες, η αντίληψη του κοινού για τον θόρυβο παραμένει εν μέρει υποκειμενικός προσδιορισμός. Σαν θόρυβο ορίζεται κάθε ανεπιθύμητος ήχος. Οι ανησυχίες για τον θόρυβο εξαρτώνται από το επίπεδο της έντασης, συχνότητας, κατανομής της συχνότητας, μοτίβα της πηγής θορύβου και την μορφολογία εδάφους μεταξύ πομπού και δέκτη. Ο θόρυβος στους ανθρώπους μπορεί να ταξινομηθεί σε τρεις γενικές κατηγορίες:

- Υποκειμενική επίδραση στον δέκτη όπως ενόχληση και δυσαρέσκεια.
- Παρεμβολή σε δραστηριότητες όπως ομιλία, ύπνος, μελέτης.

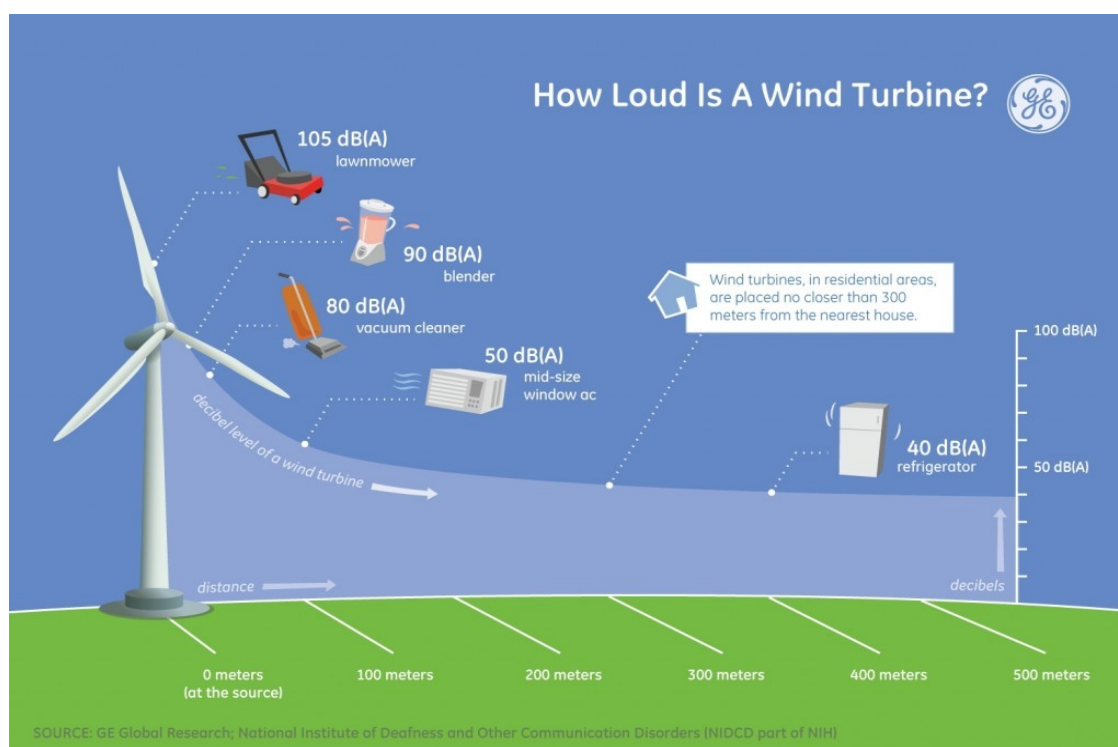
- **Επιδράσεις στην φυσιολογία του δέκτη** όπως άγχος, εμβοές ή απώλεια ακοής.

Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, τα επίπεδα ήχου που σχετίζονται με τον περιβαλλοντικό θόρυβο υποπίπτουν μόνο στις δυο πρώτες κατηγορίες. Το αν ένας θόρυβος είναι δυσάρεστος εξαρτάτε με το είδος του θορύβου, τις περιστάσεις που εμφανίζετε και την ευαισθησία του ατόμου που τον ακούει. Λόγο της μεγάλης διαφοροποίησης στα επίπεδα ανοχής στο θόρυβο κάθε ατόμου δεν υπάρχει ένας απολύτως ικανοποιητικός τρόπος μέτρησης των υποκειμενικών επιπτώσεων του θορύβου ή της αντίστοιχης δυσαρέσκειας και ενόχλησης. Ο λειτουργικός θόρυβος που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες είναι σημαντικά διαφορετικός στο επίπεδο και την φύση του σε σχέση με τους περισσότερους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής μεγάλης κλίμακας. Οι ανεμογεννήτριες συχνά τοποθετούνται σε αγροτικές ή απομακρυσμένες περιοχές που έχουν έναν αντίστοιχο χαρακτήρα ήχου περιβάλλοντος (ambient noise character). Γι'αυτό, το κοινό που ζει κοντά σε ανεμογεννήτριες και ανησυχεί για τον θόρυβο θα πρέπει να γνωρίζει ότι ένα μεγάλο μέρος του θορύβου που εκπέμπεται από τις ανεμογεννήτριες καλύπτεται από τον θόρυβο του περιβάλλοντος ή τον περιβάλλον θόρυβο του ίδιου του άνεμου. Ο θόρυβος που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες έχει μειωθεί καθώς η τεχνολογία έχει βελτιωθεί. Για παράδειγμα, οι βελτιώσεις που έχουν γίνει στα πτερύγια και στην στρατηγική της λειτουργίας του στροβίλου, επιτρέπουν περισσότερη αιολική ενέργεια να μετατρέπεται σε περιστροφική ενέργεια και λιγότερο σε ακουστικό θόρυβο. Ακόμα και μια καλοσχεδιασμένη ανεμογεννήτρια, ωστόσο, μπορεί να δημιουργήσει κάποιο θόρυβο από το κιβώτιο ταχυτήτων, το φρένο, τα υδραυλικά εξαρτήματα ή ακόμα και από τις ηλεκτρονικές συσκευές.

Επιπτώσεις στην χρήση της γης: Κατά την χωροθέτηση των ανεμογεννητριών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη διάφορα ζητήματα χρήσης γης. Μερικά από αυτά αφορούν κυβερνητικούς κανονισμούς και αδειοδοτήσεις. Άλλα μπορεί να μην υπόκεινται σε ρύθμιση, αλλά έχουν αντίκτυπο στην αποδοχή του κοινού. Μερικά από τα σημαντικότερα ζητήματα χρήσης γης είναι:

- ◆ Πραγματική απαιτούμενη γη ανά παραγωγή ενέργειας.
- ◆ Ποσότητα γης που δυνητικά διαταράσσεται από ένα αιολικό πάρκο.

- ◆ Μη αποκλειστική χρήση γης και συμβατότητα.
- ◆ Διατήρηση της αγροτικής περιοχής.
- ◆ Πυκνότητα των ανεμογεννητριών
- ◆ Δρόμοι πρόσβασης, διάβρωση και εκπομπές σκόνης.



39. Πόσο δυνατή είναι μια ανεμογεννήτρια (σε dB)?

Σχετικά με την έκταση της γης που απαιτείται ανά μονάδα ισχύος, τα αιολικά απαιτούν περισσότερη γη από σχεδόν όλες τις υπόλοιπες τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, ενώ οι εγκαταστάσεις των συστημάτων αιολικής ενέργειας μπορεί να εκτείνονται σε μια μεγάλη περιοχή, το φυσικό “αποτύπωμα” της πραγματικής ανεμογεννήτριας και του υποστηρικτικού εξοπλισμού καλύπτει μόνο ένα μικρο μέρος της γης. Η ανάπτυξη ενός αιολικού πάρκου μπορεί να επηρεάσει άλλες χρήσεις στην περιοχή αυτή ή σε μια διπλανή. Για παράδειγμα, ορισμένα πάρκα που δίνουν έμφαση στις αξίες της άγριας φύσης και χώροι που είναι αφιερωμένοι στην προστασία της άγριας ζωής μπορεί να

μην είναι συμβατές με την ανάπτυξη ενός αιολικού πάρκου. Άλλες χρήσεις, όπως η διατήρηση ανοικτών φυσικών χώρων ή εγκαταστάσεις αναψυχής, μπορεί να είναι συμβατές ανάλογα με την περίπτωση και τις απαιτήσεις. Σε γενικές γραμμές, οι μεταβλητές που μπορούν να καθορίσουν τις επιπτώσεις στην χρήση γης είναι:

- ◆ Τοπογραφία της περιοχής
- ◆ Το μέγεθος, τον αριθμό, την ισχύ και την απόσταση των ανεμογεννητριών
- ◆ Η θέση και ο σχεδιασμός των δρόμων
- ◆ Η τοποθεσία των υποστηρικτικών εγκαταστάσεων.
- ◆ Η τοποθέτηση των ηλεκτρικών γραμμών

Ένα ευρύ φάσμα δράσεων είναι διαθέσιμο για να διασφαλιστεί ότι τα έργα αιολικής ενέργειας είναι συνεπή και συμβατά με τις περισσότερες υφιστάμενες και προγραμματισμένες χρήσεις γης. Πολλές από αυτές περιλαμβάνουν την υπόγεια τοποθέτηση ηλεκτρικών γραμμών, η τοποθεσία των εγκαταστάσεων συντήρησης να βρίσκεται εκτός εργοταξίου, την χρήση αποδοτικότερων ή μεγαλύτερων ανεμογεννητριών για την ελαχιστοποίηση του αριθμού των ανεμογεννητριών για την επίτευξη ενός συγκεκριμένου επιπέδου ηλεκτρικής παραγωγής, την ανάπτυξη τεχνικών κατασκευής και συντήρησης ώστε να περιοριστεί η κατασκευή νέων δρόμων.

4.3 Ζητήματα ασφαλείας

Ασφάλεια: Τα ζητήματα ασφαλείας περιλαμβάνουν τόσο τη δημόσια ασφάλεια όσο και την επαγγελματική ασφάλεια. Στον τομέα της δημόσιας ασφαλείας, τα κύρια ζητήματα που σχετίζονται σχετίζονται με τα συστήματα αιολικής ενέργειας έχουν να κάνουν με την κίνηση του ρότορα και την παρουσία βιομηχανικού εξοπλισμού σε περιοχές που είναι δυνητικά προσβάσιμες στο ευρύ κοινό. Οι ακόλουθες πτυχές για την δημόσια ασφάλεια είναι σημαντικές:

- **Εκσφενδονισμός πτερυγίου:** Ένας από τους σημαντικότερους κινδύνους για την δημόσια ασφάλεια είναι πιθανότητα ένα πτερύγιο να εκσφενδονιστεί από τον ρότορα σε περίπτωση ακραίων καιρικών συνθηκών (κάτι που είναι αρκετά σπάνιο). Η καταλληλότερη μέθοδος για την μείωση της πιθανότητας εκσφενδονισμού της λεπίδας είναι η εφαρμογή καλού μηχανολογικού σχεδιασμού σε συνδυασμό με υψηλό βαθμό ποιοτικού ελέγχου.

- **Πτώση πάγου:** Προβλήματα ασφάλειας μπορεί να προκύψουν όταν οι χαμηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με βροχοπτώσεις προκαλέσουν σχηματισμό πάγου στα πτερύγια του ρότορα. Καθώς τα πτερύγια θερμαίνονται ο πάγος λιώνει και είτε θα πέσει στο έδαφος είτε θα εκσφενδονιστεί από το περιστρεφόμενο πτερύγιο. Κάτι τέτοιο αποτελεί κίνδυνο για όσους βρίσκονται ακριβώς κάτω από την ανεμογεννήτρια. Για να μειωθεί το ενδεχόμενο τραυματισμού των εργαζομένων, η πτώση πάγου θα πρέπει να περιλαμβάνεται στα προγράμματα εκπαίδευσης και ασφάλειας των εργαζομένων. Επίσης, οι υπεύθυνοι λειτουργίας της εγκατάστασης δεν θα πρέπει να επιτρέπουν στα συνεργεία να βρίσκονται κοντά στις ανεμογεννήτριες κατά τη διάρκεια συνθηκών παγετού.

- **Αστοχία πύργου:** Η πλήρης αστοχία των πύργων που κατά συνέπεια φέρνει στο έδαφος όλη την ανεμογεννήτρια μπορεί να οφείλετε σε υψηλά φορτία πάγου, τον κακό σχεδιασμό του πύργου ή/και της θεμελίωσης, η διάβρωση και οι ισχυροί άνεμοι. Η πλήρης αστοχία της κατασκευής είναι σχεδόν απίθανη εάν οι ανεμογεννήτρια είναι σχεδιασμένη με τα σύγχρονα πρότυπα ασφάλειας. Πρόσθετη ασφάλεια για κοινό και εργαζομένους θα μπορούσε να επιτευχθεί με την τοποθέτηση της ανεμογεννήτριας μακριά από κατοικήσιμα σημεία (σε απόσταση τουλάχιστον ίση με το ύψος του πύργου και την ακτίνα του ρότορα).

- **Κίνδυνος πυρκαγιάς:** Σε άγονες περιοχές, οι οποίες είναι και ιδανικές περιοχές για την ανάπτυξη αιολικών πάρκων λόγω των υψηλών ανέμων, της χαμηλής βλάστησης, τα λίγα δέντρα κ.λπ. μπορούν να αποτελέσουν κίνδυνο πυρκαγιάς κατά τους ξηρούς μήνες του έτους. Ιδιαίτερα ευάλωτες περιοχές είναι εκείνες που βρίσκονται σε αγροτικές περιοχές όπου γίνετε καλλιέργεια σιτηρών ξηράς ή αναπτύσσεται η φυσική βλάστηση ανεξέλεγκτη και είναι διαθέσιμη για καύσιμη ύλη. Το πιο αποτελεσματικό μέτρο αποφυγής κινδύνου πυρκαγιάς είναι η τοποθέτηση όλων των καλωδιώσεων υπόγεια μεταξύ των ανεμογεννητριών και του

υποσταθμού. Σε περιοχές που είναι επιρρεπείς σε πυρκαγιές, οι περισσότεροι οργανισμοί θέτουν όρους αδειοδότησης του έργου που να αντιμετωπίζουν το ενδεχόμενο πυρκαγιάς.

➤ **Κίνδυνος εργαζόμενου:** Για κάθε βιομηχανική δραστηριότητα, υπάρχει ενδεχόμενο τραυματισμού ή απώλεια ζωής σε άτομα. Για να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος, κάθε έργο αιολικής ενέργειας θα πρέπει να ακολουθεί τις καθιερωμένες απαιτήσεις προστασίας των εργαζομένων κατά την κατασκευή και λειτουργία του έργου.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ / REFERENCES

J.F. MANWELL | J.G MCGOWAN | A.L. ROGERS (2009). *Wind Energy Explained* (2η έκδ.). WILEY.

U.S. Energy Information Administration (2023). *Electricity generation from wind*. ([Electricity generation from wind - U.S. Energy Information Administration \(EIA\)](#)). [1]

WindEurope (2021). *Wind energy in Europe 2021 Statistics and the outlook for 2022-2026*. ([Wind energy in Europe: 2021 Statistics and the outlook for 2022-2026 | WindEurope](#)). [2]

Energysage. *Wind energy pros and cons*. ([Pros And Cons of Wind Energy | EnergySage](#)).

Wind Exchange U.S DEPARTMENT OF ENERGY. *What is Wind Power?* ([WINDEXchange: What Is Wind Power? \(energy.gov\)](#)).

Autodesk instructables. Tech Works. *Making Energy by Wind*. ([Making Energy by Wind : 5 Steps - Instructables](#)).

World Nuclear Association. *Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources*. ([comparison_of_lifecycle.pdf \(world-nuclear.org\)](#))

Daniel Kirk-Davidoff. The Conversation (2014). *Wind power affects climate-cooling and warming regions around farms, studies claim*. ([Wind power affects climate – cooling and warming regions around farms, studies claim \(theconversation.com\)](#)).

FT EXPLORING science & technology(2015). *Wind Turbine Power Coefficient (CP)*. ([Wind turbine power coefficient - definition and how it's used \(ftexploring.com\)](#)).

Wikipedia. *Wind power in the European Union*. ([Wind power in the European Union – Wikipedia](#)).

Ειρήνη Διαμαντή. ΠΑ.Δ.Α. (2018). *Μελέτη και περιγραφή του συστήματος πέδησης ανεμογεννητριών*. ([Πτυχιακή Εργασία \(puas.gr\)](#)).

Stephanie Cole. TheRoundup.org. *Wind Turbine Power Curve*. ([Wind Turbine Power Curve - The Roundup](#)).

Wikipedia. *Renewable energy in the United States*. ([Renewable energy in the United States – Wikipedia](#)). [3]

Vaishali Sohoni, S. C. Gupta, and R. K. Nema. *A Critical Review on Wind Turbine Power Curve Modelling Techniques and Their Applications in Wind Based Energy Systems* (2016). Journal of Energy. ([A Critical Review on Wind Turbine Power Curve Modelling Techniques and Their Applications in Wind Based Energy Systems \(hindawi.com\)](#)).

Eurostat. *Renewable energy on the rise: 37% of EU's electricity* (2022). ([Renewable energy on the rise: 37% of EU's electricity - Products Eurostat News - Eurostat \(europa.eu\)](#)). [4].

Alexander Kalmikov. *Wind Power Fundamentals* (2017). Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology. ([WindPowerFundamentals.A.Kalmikov.2017.pdf \(mit.edu\)](#)).

Danish Wind Industry Association. *Describing Wind Variations: Weibull Distribution*. ([Describing Wind Variations: Weibull Distribution \(xn--drmstrre-64ad.dk\)](#)).

Wikipedia. *Diffusion*. ([Diffusion – Wikipedia](#)).

Research hubs. *Pitch-regulated and Stall-regulated Wind Turbine*. ([Pitch-regulated and Stall-regulated Wind Turbine \(researchhubs.com\)](#)).

SciJinks. *Why Does Wind Blow?* ([Why Does Wind Blow? | NOAA SciJinks – All About Weather](#)).

Wikipedia. *Yaw system*. ([Yaw system – Wikipedia](#)).

Wikipedia. *Ανεμος*. ([Ανεμος - Βικιπαίδεια \(wikipedia.org\)](#)).

Wikipedia. *Anemometer*. ([Anemometer – Wikipedia](#)).

Wikipedia. *Wind speed*. ([Wind speed - Wikipedia](#)).

Wikipedia. *Wind Turbine Types*. ([Wind turbine - Wikipedia](#)).

M-G Kim and P H Dalhoff 2014 J. Phys.: Conf. Ser. 524 012086. *Yaw Systems for wind turbines – Overview of concepts, current challenges and design methods*. ([Yaw Systems for wind turbines – Overview of concepts, current challenges and design methods - IOPscience](#)).

Καραγκούνης Αθάνασιος (2017). Α.Π.Θ. *Υπολογισμός αιολικού δυναμικού στην Ελλάδα με την χρήση αριθμητικού μοντέλου*. ([ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΙΟΛΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ \(auth.gr\)](#))

Simon Goss (2022). energypost.eu. *China should comfortably meet its 2030 Renewables target. But its emissions?* [China should comfortably meet its 2030 Renewables target. But its emissions? - Energy Post](#)). [5]

