



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Αριθμός**

**"Αιολικά πάρκα"**

**"Wind farms"**

ΦΟΙΤΗΤΕΣ:

ΒΑΝΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ (3843)

ΠΑΛΑΙΟΛΟΓΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΣ (7856)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΣΧΟΙΝΑΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2022

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|  |    |
|--|----|
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....  | 4  |
| ABSTRACT.....  | 5  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Η ΦΥΣΙΚΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ                            |    |
| 1.1 Η πηγή του ανέμου .....                                | 6  |
| 1.2 Τα χαρακτηριστικά του ανέμου .....                     | 7  |
| 1.3 Μεταβολή ταχύτητας ανέμου με τον χρόνο .....           | 8  |
| 1.4 Μεταβολή ταχύτητας ανέμου με το ύψος .....             | 10 |
| 1.5 Στατιστική του ανέμου .....                            | 12 |
| 1.6 Η ενέργεια του ανέμου .....                            | 16 |
| 1.7 Μετατροπή της αιολικής ενεργείας .....                 | 20 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ                                |    |
| 2.1 Γενικά.....  | 23 |
| 2.2 Κατηγορίες και τύποι ανεμογεννητριών.....              | 24 |
| 2.3 Δομή ανεμογεννήτριας.....                              | 31 |
| 2.4 Προστασία ανεμογεννήτριας.....                         | 37 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΥΡΙΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ |    |
| 3.1 Σχεδιασμός κύριων στοιχείων.....                       | 40 |
| 3.2 Η έλικα .....  | 45 |
| 3.3 Σύστημα μετάδοσης περιστροφικής κίνησης .....          | 51 |
| 3.4 Η γεννήτρια .....                                      | 51 |
| 3.5 Σύστημα πέδησης .....                                  | 57 |
| 3.6 Σύστημα προσανεμισμού .....                            | 58 |
| 3.7 Πύργος στήριξης .....                                  | 58 |
| 3.8 Σύστημα εποπτείας και ελέγχου .....                    | 59 |
| 3.9 Απόδοση ισχύος .....                                   | 59 |
| 3.10 Διαθεσιμότητα .....                                   | 61 |
| 3.11 Ετήσιος υπολογισμός ενέργειας .....                   | 62 |
| 3.12 Απόδοση συστοιχίας ανεμογεννητριών (Α/Γ).....         | 63 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ                                  |    |
| 4.1 Περιγραφή των Αιολικών Πάρκων.....                     | 64 |
| 4.2 Κριτήρια εγκατάστασης Αιολικού Πάρκου.....             | 64 |
| 4.3 Αιολική διείδυση.....                                  | 65 |

|   |   |     |
|---|---|-----|
| 4.4   | Είδη Αιολικών Πάρκων.....   | 66  |
| 4.5   | Διασυνδέσεις Αιολικών Πάρκων.....   | 69  |
| 4.6   | Αιολικά Πάρκα και περιβάλλον.....   | 74  |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΛΕΤΗ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ |   |     |
| 5.1   | Κριτήρια χωροθέτησης χερσαίων αιολικών πάρκων.....  | 79  |
| 5.2   | Έργα υποδομής.....  | 86  |
| 5.3   | Βέλτιστη τοποθέτηση ανεμογεννητριών.....  | 87  |
| 5.4   | Εργασίες εγκατάστασης.....  | 88  |
| 5.5   | Κύριος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός.....   | 95  |
| 5.6   | Κεντρικός υποσταθμός μέσης τάσης.....   | 99  |
| 5.7   | Υποσταθμός υψηλής τάσης.....  | 100 |
| 5.8   | Βοηθητικός εξοπλισμός.....  | 100 |
| 5.9   | Διασύνδεση Αιολικών Πάρκων με το εθνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος..... | 101 |
| ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....   |   | 108 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....   |   | 109 |

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αύξηση της παγκόσμιας ευαισθητοποίησης σχετικά με τις αρνητικές επιπτώσεις που έχουν οι παραδοσιακές μέθοδοι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο περιβάλλον, έχει δημιουργήσει πρόσφορο έδαφος για την εκμετάλλευση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Μεταξύ αυτών, η αιολική ενέργεια θεωρείται η πιο ασφαλής μορφή και είναι η πιο δημοφιλής.

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνονται συνεχώς τα ποσοστά εγκατάστασης αιολικών πάρκων σε παγκόσμιο επίπεδο, ιδιαίτερα αυτών που χαρακτηρίζονται ως μεγάλης κλίμακας και πολυπλοκότητας.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει θέσει στόχους σχετικά με την ανάπτυξη των ΑΠΕ δημιουργώντας ένα πλαίσιο για ορθολογικό σχεδιασμό στη χωροθέτηση αιολικών πάρκων, μέσω εφαρμογής περιβαλλοντικών περιορισμών.

Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας, αποτελεί η προσέγγιση της ενεργειακής εκμετάλλευσης του ανέμου, τα μέσα και οι τρόποι που δύναται να επιτευχθεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η ολοκληρωμένη παρουσίαση της διαδικασίας που πρέπει να ακολουθηθεί για την δημιουργία ενός αιολικού πάρκου.

## **ABSTRACT**

Raising global awareness of the negative effects of traditional electricity generation methods on the environment has created a fertile ground for the exploitation of Renewable Energy Sources (RES). Among them, wind energy is considered the safest form and is the most popular.

As a result, wind farms are steadily increasing worldwide, especially those of large scale and complexity.

The European Union (EU) has set targets for the development of RES by creating a framework for rational planning in the location of wind farms, through the application of environmental constraints.

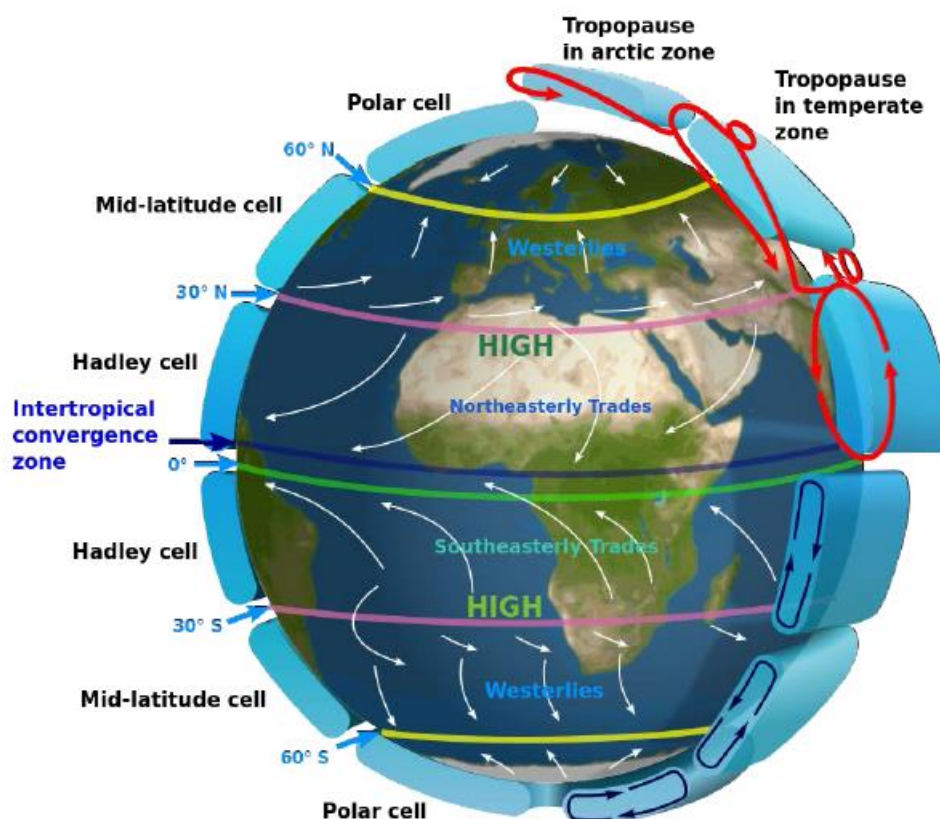
The purpose of this diploma thesis is to approach the energy exploitation of the wind, the means and the ways in which the production of electricity can be achieved and the complete presentation of the process to be followed for the creation of a wind farm.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Η ΦΥΣΙΚΗ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ

## 1.1 Η πηγή του ανέμου

Η θερμική ενέργεια του Ήλιου που πέφτει στην επιφάνεια της Γης, παράγει κίνηση της ατμόσφαιρας σε μεγάλη κλίμακα, στην οποία προστίθενται τοπικές μεταβολές που προξενούνται από διάφορους παράγοντες. Όταν ο αέρας θερμαίνεται στις περιοχές του ισημερινού γίνεται ελαφρύτερος και αρχίζει να ανυψώνεται, στις δε περιοχές των πόλων ο κρύος αέρας αρχίζει να κατεβαίνει. Ο αέρας που ανυψώνεται στον ισημερινό κινείται προς βορά και προς νότο.

Η κίνηση αυτή σταματά στις 30° Β (βόρεια) και 30° Ν (νότια), όπου ο αέρας αρχίζει να κατεβαίνει (βυθίζεται), οπότε μια ροή ψυχρού αέρα λαμβάνει χώρα στα κατώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Η επιτάχυνση που προκαλεί η δύναμη Coriolis, που οφείλεται στην περιστροφή της Γης, προκαλεί μια απόκλιση της ροής του αέρα από τον ισημερινό προς τους πόλους, προς τα ανατολικά και της επιστρεφόμενης ροής από τους πόλους προς τον ισημερινό, προς τα δυτικά. Κατ' αυτόν τον τρόπο παράγονται οι πορείες των ανέμων, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 1.1: Γενική άποψη της κυκλοφορίας των ανέμων πάνω στην επιφάνεια της Γης.

## 1.2 Τα χαρακτηριστικά του ανέμου

Η ισχύς που παρέχει ο άνεμος στην ανεμογεννήτρια είναι ανάλογος του κύβου της ταχύτητας του ανέμου, όπως παρουσιάζεται παρακάτω. Είναι λοιπόν απαραίτητο να γνωρίζουμε με λεπτομέρεια τον άνεμο και τα χαρακτηριστικά του για να μπορούμε να υπολογίσουμε, πχ την απόδοση της ανεμογεννήτριας, με ακρίβεια. Είναι κοινώς γνωστό ότι μεγάλες ταχύτητες ανέμων απαντώνται στις κορυφές των λόφων, σε εκτιθέμενες από τον άνεμο ακτές και στα πελάγη. Χρειάζεται να γίνουν γνωστές διάφορες παράμετροι του ανέμου, όπως η μέση ταχύτητα, η κατεύθυνση, οι μεταβολές γύρω από τη μέση ταχύτητα σε μικρό χρονικό διάστημα (θύελλες), οι ημερήσιες, εποχιακές και ετήσιες μεταβολές και οι μεταβολές ανάλογα με το ύψος του εδάφους.

Οι παράμετροι αυτές είναι διαφορετικές για κάθε τόπο και μπορούν να προσδιοριστούν με ικανό αριθμό επακριβών μετρήσεων, για μεγάλη χρονική περίοδο, σε έναν ορισμένο τόπο. Οι παράμετροι αυτές χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της απόδοσης και των οικονομικών ενός αιολικού σταθμού παραγωγής ενέργειας. Τα γενικευμένα μετεωρολογικά στατιστικά δεδομένα οδηγούν πολλές φορές σε υπερεκτίμηση των ταχυτήτων των ανέμων σε έναν ορισμένο τόπο.

Είναι γνωστό από τη φυσική ότι όταν μία αέρια μάζα θερμανθεί, εκτονώνεται, γίνεται ελαφρύτερη και κινείται προς τα πάνω. Ο αέρας της ατμόσφαιρας θερμαίνεται κυρίως από την επαφή του με τη θερμή επιφάνεια της γης. Ο θερμός αέρας είναι ελαφρύτερος και έχει μικρότερη πυκνότητα από τον ψυχρό. Ένα στρώμα αέρα, που θα έρθει σε επαφή με την γήινη επιφάνεια θα θερμανθεί και θα ανέλθει. Τη θέση του θα καλύψει ένα στρώμα ψυχρότερου αέρα, που με τη σειρά του θα θερμανθεί και θα ανέλθει. Αυτή η κυκλική ανοδική η καθοδική κίνηση των θερμών και ψυχρών ρευστών μαζών, ονομάζεται κατακόρυφη μεταφορά. Αυτή η διαδικασία συν την περιστροφή της γης δημιουργεί τον άνεμο.

Είναι κατανοητό, ότι ο ατμοσφαιρικός αέρας ο οποίος περιβάλλει τη γη βρίσκεται σε διαρκή κίνηση, εξ αιτίας μιας σειράς παραμέτρων, των οποίων οι πιο σημαντικές είναι:

- Η ηλιακή ακτινοβολία και ο τρόπος που επιδρά στη γη.
- Η ανομοιογένεια του ανάγλυφου της γης (στεριά, θάλασσα, υψομετρικές διαφορές).
- Η περιστροφική κίνηση της γης.

Στην Ευρώπη οι άνεμοι επηρεάζονται από τα ανατολικά ρεύματα του Ατλαντικού, τα ψυχρά βόρεια και τα θερμά τοπικά της Σαχάρας. Έτσι οι άνεμοι που πνέουν είναι μεν για το χειμώνα νοτιοδυτικοί, ενώ για το καλοκαίρι οι δυτικοί και βορειοδυτικοί άνεμοι.

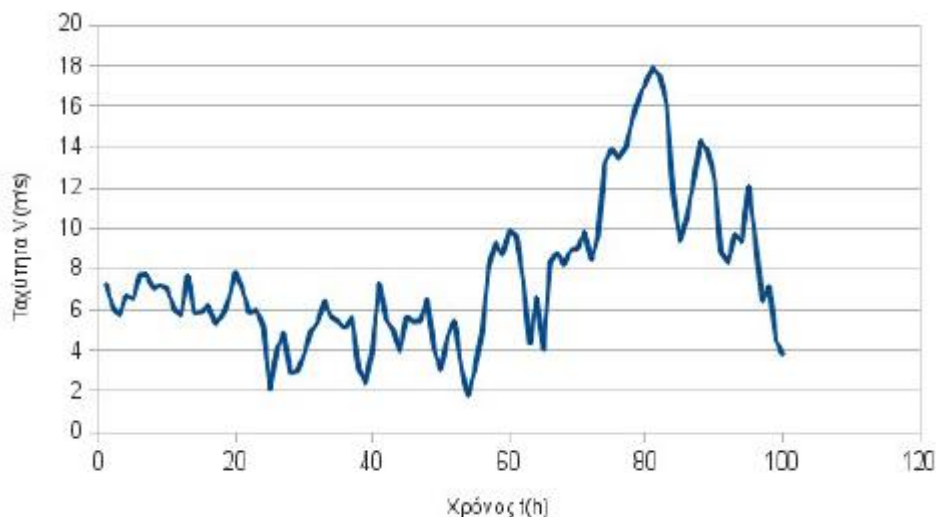
Τα τμήματα αυτού του κεφαλαίου που ακολουθούν περιγράφουν τις διαδικασίες παραγωγής του ανέμου σε έναν ορισμένο γεωγραφικό τόπο και εντρυφούν σε περισσότερες λεπτομέρειες που αφορούν πρακτικές ποσοτικές περιγραφές των χαρακτηριστικών του ανέμου.

### **1.3 Μεταβολή ταχύτητας ανέμου με τον χρόνο**

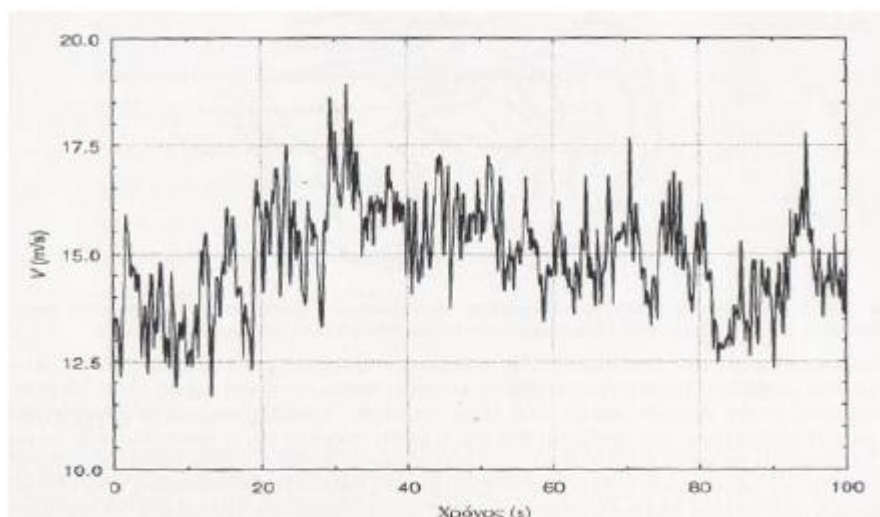
Η ροή του ανέμου σε μικροκλίμακα επηρεάζεται από τοπικά εμπόδια όπως κτήρια, δέντρα και φύση του εδάφους πχ από το αν υπάρχουν οργωμένα χωράφια ή αν τα χωράφια περιέχουν φυτά. Περιοχές με νερό, όπως λίμνες ή θάλασσα επηρεάζουν επίσης αυτή τη ροή. Η τριβή του ανέμου με την εκάστοτε επιφάνεια εδάφους προκαλεί διακυμάνσεις στη ροή του, οπότε η ταχύτητά του μεταβάλλεται ανάλογα με τον τόπο και το χρόνο.

Η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου φαίνονται στις Εικόνες 1.2 και 1.3 που δείχνει ένα τυπικό δείγμα μεταβολής της ταχύτητάς του εντός ορισμένου χρονικού διαστήματος, ανά 10 δευτερόλεπτα και ανά μία ώρα αντίστοιχα, που ελήφθησαν με ανεμόμετρο αναρτημένο πάνω στην άτρακτο μιας ανεμογεννήτριας. Ορισμένες μεταβολές της ταχύτητας αυτής οφείλονται στην τύρβη που δημιουργεί το κινητό πλαίσιο (ο δρομέας) της ανεμογεννήτριας και η άτρακτος της, αλλά αυτό το γεγονός δεν κρύβει την πολυπλοκότητα των χαρακτηριστικών του ανέμου.





Εικόνα 1.2: Μετρήσεις ταχυτήτων ανέμου που ελήφθησαν με ανεμόμετρο που ήταν αναρτημένο σε μια άτρακτο ανεμογεννήτριας διαμέτρου 33 m, εντός χρονικού διαστήματος 100 ωρών.



Εικόνα 1.3: Μετρήσεις ταχυτήτων ανέμου που ελήφθησαν με ανεμόμετρο που ήταν αναρτημένο σε μια άτρακτο ανεμογεννήτριας διαμέτρου 33 m, εντός χρονικού διαστήματος 100 δευτερολέπτων.

Η στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου  $V$  μπορεί να περιγραφεί ως το άθροισμα της μέσης ταχύτητας  $V_m$  και ενός μεταβαλλόμενου μεγέθους ταχύτητας  $v$ :

$$V = V_m + v$$

Η μέση ταχύτητα του ανέμου  $V_m$  προσδιορίζεται τυπικά ως η μέση τιμή εντός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος.

Η διακύμανση της ροής είναι ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας του τετραγώνου της μέσης ταχύτητας [RMS] του μεταβαλλόμενου μεγέθους ταχύτητας και ορίζεται ως ένταση της τύρβης  $T_u$  και δίνεται ως:

$$T_u = \frac{\sqrt{v^2}}{V_m} = \frac{1}{V_m} \left[ \frac{1}{T} \int_0^T v^2 dt \right]^{\frac{1}{2}}$$

Σε ανώμαλο έδαφος (πχ όπου υπάρχουν πολλά δένδρα και κτήρια) η ένταση της τύρβης κυμαίνεται από 0,15 – 0,2. Για ομαλό έδαφος η ένταση έχει μια τυπική τιμή 0,1.

#### 1.4 Μεταβολή ταχύτητας ανέμου με το ύψος

Η ταχύτητα του ανέμου στην επιφάνεια του εδάφους είναι μηδενική λόγω της τριβής του αέρα με την επιφάνεια. Η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το ύψος πλησιέστερα προς την επιφάνεια του εδάφους, αυξάνεται δε λιγότερο καθώς απομακρυνόμαστε από αυτήν. Σε ύψος περίπου 2 km πάνω από την επιφάνεια του εδάφους η ταχύτητα του ανέμου μηδενίζεται.

Οι μεταβολές αυτές της ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους συνιστούν το "προφίλ της ταχύτητας του ανέμου" που μπορεί να εκφραστεί με διάφορες συναρτήσεις. Δύο από τις κυριότερες αυτές συναρτήσεις που περιγράφουν τη μεταβολή της μέσης ταχύτητας του ανέμου συναρτήσει του ύψους έχουν βασιστεί σε πειραματικά δεδομένα και δίνονται παρακάτω.

##### Εκθετική Συνάρτηση

$$V_{(z)} = V_r \left( \frac{z}{z_r} \right)^{\alpha}$$

όπου z είναι το ύψος από την επιφάνεια του εδάφους, Vr η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος zr πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, V(z) η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος z και α είναι ένας εκθέτης που εξαρτάται από τη μορφολογία (ανάγλυφο) του εδάφους. Μια τυπική τιμή του α μπορεί να είναι 0,1.

Έτσι, αν η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10 m είναι 20 m/s, η ταχύτητα αυτή σε ύψος 40 m θα είναι:

$$20 \left( \frac{40}{10} \right)^{0,1} = 23 \text{ m/s.}$$

## Λογαριθμική Συνάρτηση

$$\frac{V(z)}{V(10)} = \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{10}{z_0}\right)}$$

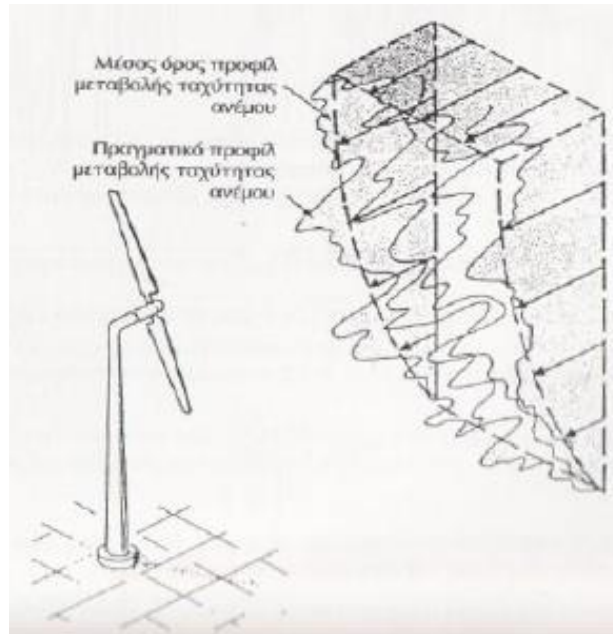
όπου  $V(10)$  είναι η ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10 m από την επιφάνεια του εδάφους και  $z_0$  είναι το μήκος της ανωμαλίας του εδάφους.

Οι παράμετροι  $a$  και  $z_0$  για διαφορετικούς τύπους εδαφών δίδονται στον Πίνακα 1.1. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι δύο συναρτήσεις για τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας του ανέμου σε ορισμένο ύψος, αν είναι γνωστή η μέση ταχύτητα του ανέμου στο ύψος αναφοράς.

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

Πίνακας 1.1: Παράμετροι για τον υπολογισμό κατακόρυφου προφίλ ταχύτητας ανέμου.

Η Εικόνα 1.4 δείχνει το μέσο και το πραγματικό προφίλ μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου κατά το ύψος.



Εικόνα 1.4: Παράσταση του κατακόρυφου προφίλ μεταβολής των ταχυτήτων του ανέμου κοντά στην επιφάνεια του εδάφους.

## 1.5 Στατιστική του ανέμου

Ένα τυπικό ιστόγραμμα του ανέμου φαίνεται στην εικόνα 1.5. Το ιστόγραμμα αυτό έχει κατασκευαστεί από δεδομένες μετρήσεις που ελήφθησαν κατά τη χρονική διάρκεια πολλών ετών και δείχνει την πιθανότητα ή το κλάσμα του χρόνου όπου η ταχύτητα του ανέμου βρίσκεται εντός του γραμμικού διαστήματος που δίνεται από το πλάτος κάθε στήλης.

Τα δεδομένα έχουν μετρηθεί σε θύλακες του 1 m/s, δηλαδή 4,5 – 5,5 και 5,5 – 6,5 m/s, κλπ. Το άθροισμα του ύψους των στηλών είναι 1 ή 100%. Όταν το πλάτος των στηλών γίνει μικρότερο, το ιστόγραμμα γίνεται μια συνεχής συνάρτηση που ονομάζεται συνάρτηση πυκνότητας της πιθανότητας. Μια απλή και χρήσιμη ερμηνεία της συνάρτησης πυκνότητας της πιθανότητας της ταχύτητας ανέμου, είναι ότι δείχνει την πιθανότητα μιας ταχύτητας ανέμου σε οριακό διάστημα 1 m/s, να βρίσκεται στο κέντρο της τιμής V.

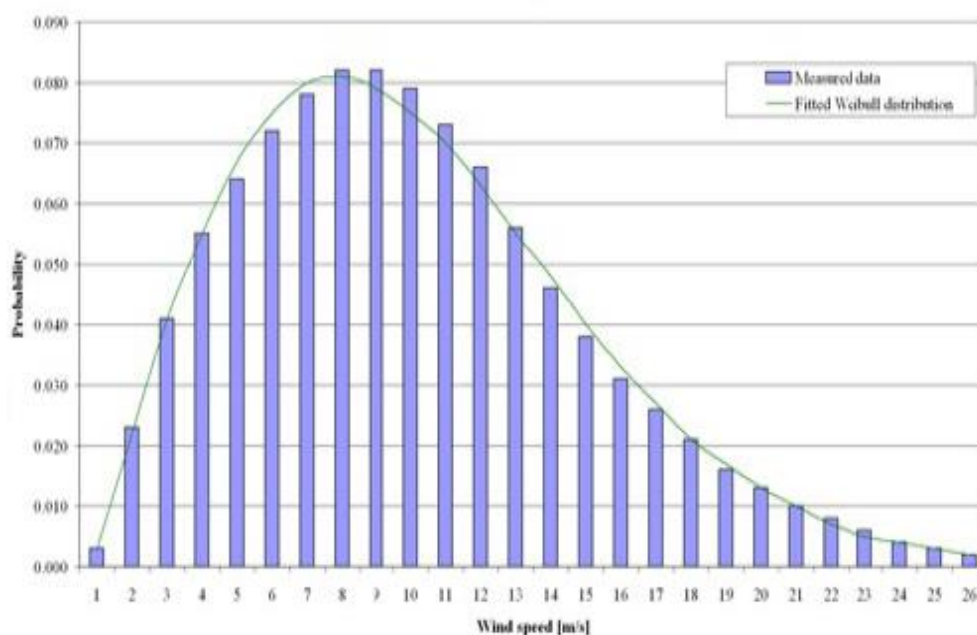
Έτσι, αναφερόμενοι στην Εικόνα 1.5, η πιθανότητα μιας ταχύτητας ανέμου να είναι μεταξύ 4,5 και 5,5 m/s είναι 0,055 ή  $(0,055 \times 8760) = 481$  ώρες το έτος ( $24 \times 365 = 8760$  ώρες/έτος).

Το ιστόγραμμα λαμβάνει υπόψη την ετήσια μεταβολή και τη μεταβολή από έτος σε έτος για όσα έτη καλύπτουν οι στατιστικές.

Η συνάρτηση πυκνότητας μπορεί να ταιριάζει με μια συνάρτηση Weibull, που δίνεται ως:

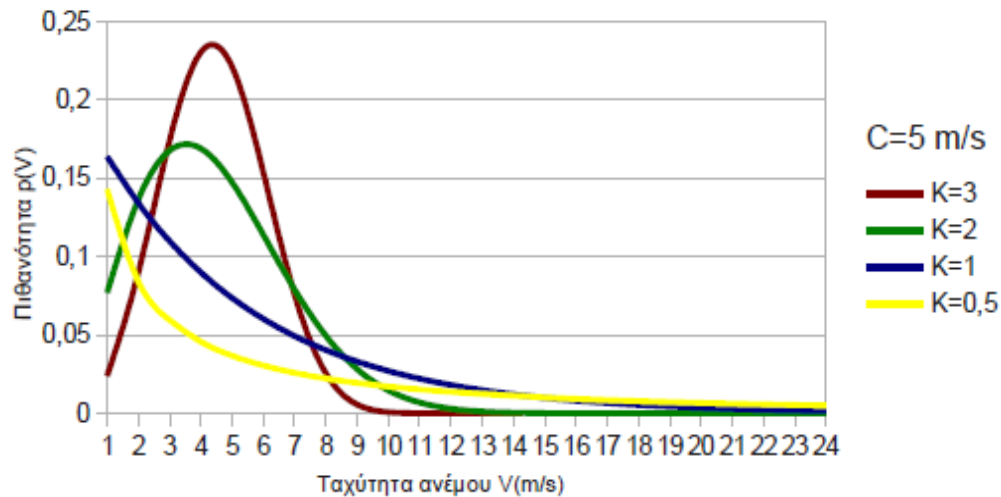
$$p(V) = \frac{k}{C} \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right]$$

όπου  $p(V)$  είναι η συχνότητα συμβάντος μιας ταχύτητας ανέμου.  $V$ ,  $C$  είναι η παράμετρος κλίμακας ή η χαρακτηριστική ταχύτητα ανέμου και  $k$  είναι η μορφολογική παράμετρος.

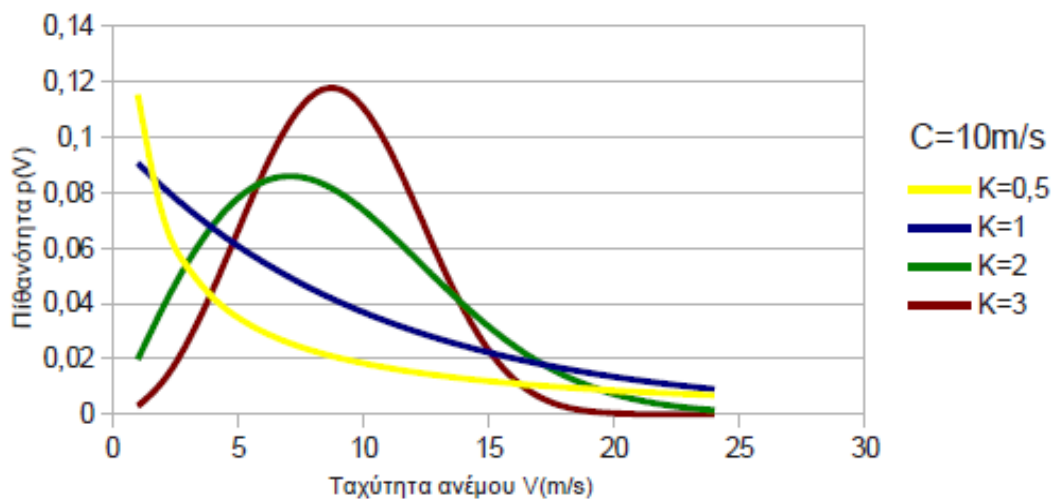


Εικόνα 1.5: Ιστόγραμμα και συνάρτηση Weibull για πιθανότητα να υπάρξει μια δεδομένη ταχύτητα ανέμου (τα δεδομένα μετρήθηκαν σε θύλακες του 1 m/s).

Στις Εικόνες 1.6 και 1.7 φαίνεται η γραφική παράσταση της κατανομής Weibull για διάφορες τιμές της μορφολογικής παραμέτρου  $k$  με δεδομένη κάθε φορά τη χαρακτηριστική ταχύτητα ανέμου ( $C=5\text{m/s}$  και  $C=10\text{m/s}$  αντίστοιχα).



Εικόνα 1.6: Η γραφική παράσταση της Weibull για C=5m/s και διάφορες τιμές του k.



Εικόνα 1.7: Η γραφική παράσταση της Weibull για C=10m/s και διάφορες τιμές του k.

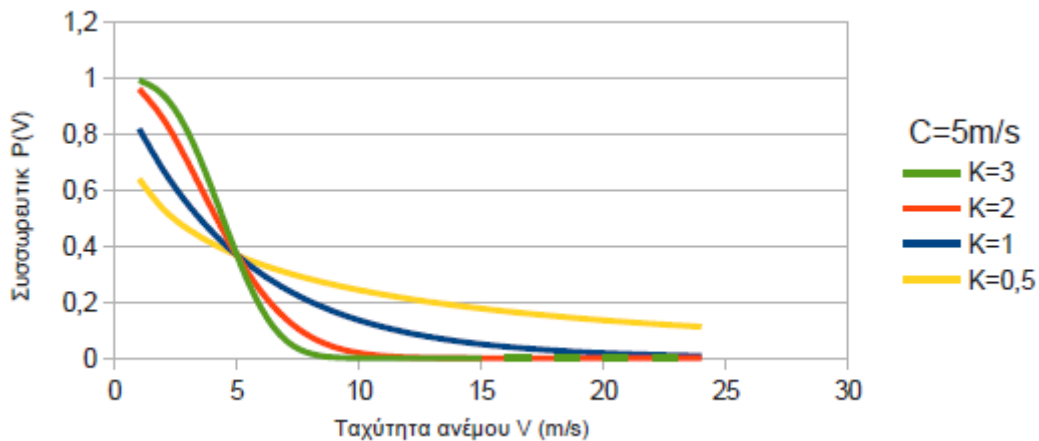
Η συσσωρευτική κατανομή Weibull  $P(V)$  δίνει την πιθανότητα για μια ταχύτητα ανέμου να υπερβεί την τιμή  $V$  και εκφράζεται ως:

$$P(V) = \exp\left[-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right]$$

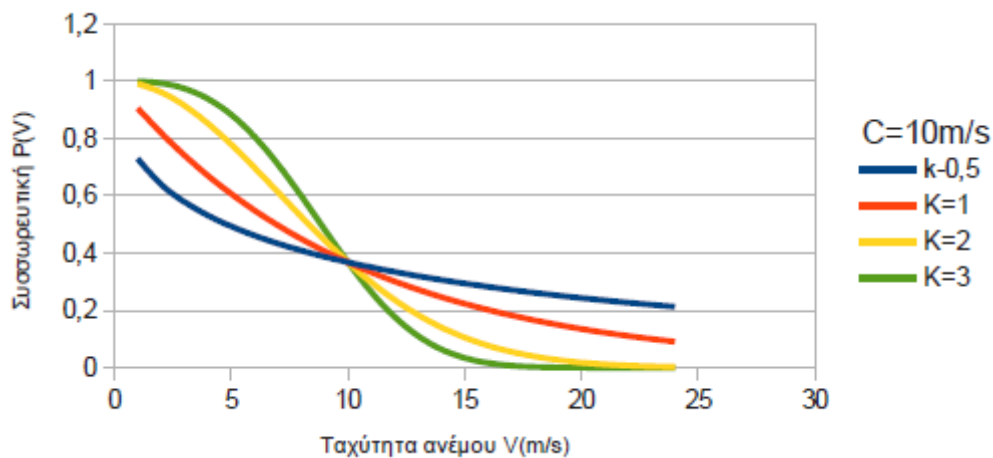
Μια τυπική τιμή του  $k$  μπορεί να είναι 2. Όταν  $k = 2$  η κατανομή ονομάζεται συσσωρευτική κατανομή Rayleigh. Η πιθανότητα να υπάρξει ταχύτητα μεταξύ των  $V_1$  και  $V_2$  είναι:

$$P(V_1 < V < V_2) = \exp\left[-\left(\frac{V_1}{C}\right)^k\right] - \exp\left[-\left(\frac{V_2}{C}\right)^k\right]$$

Οι εικόνες 1.8 και 1.9 είναι συσσωρευτικές κατανομές που δείχνουν το αποτέλεσμα δύο διαφορετικών παραμέτρων κλίμακας, 10 m/s και 5 m/s αντίστοιχα.



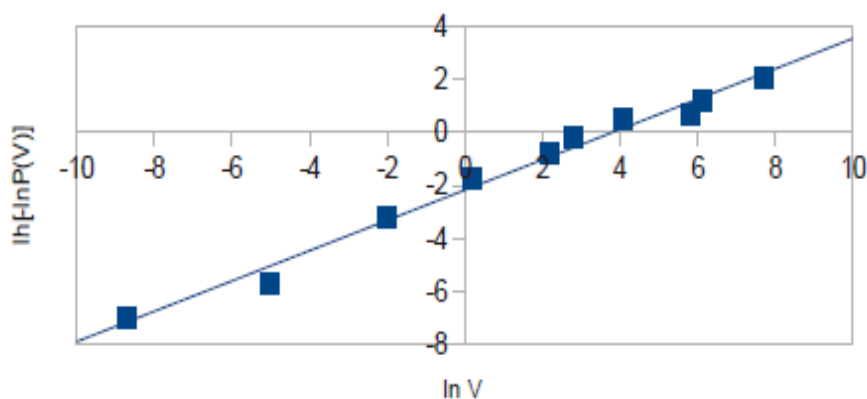
Εικόνα 1.8: Συσσωρευτική συνάρτηση Weibull με μορφολογική παράμετρο C = 10 m/s.



Εικόνα 1.9: Συσσωρευτική συνάρτηση Weibull με μορφολογική παράμετρο C = 5 m/s.

Οι παράμετροι C και k για τη συχνική κατανομή Weibull υπολογίζονται αν σχεδιάσουμε σε καρτεσιανό σύστημα αξόνων τα  $\ln V$  συναρτήσει του  $\ln [-\ln P(V)]$ , όπου  $\ln$  είναι ο λογάριθμος με βάση το e και προσαρμόζοντας μια ευθεία γραμμή μεταξύ των σημείων. Η κλίση αυτής της ευθείας γραμμής είναι ίση με τη k και η C είναι ίση με το  $\exp(\ln V)$ , ή το V, όπου  $\ln[-\ln P(V)] = 0$ . Η τεχνική αυτή

βασίζεται στη λήψη λογαρίθμων από την εξίσωση της συσσωρευτικής κατανομής Weibull δύο φορές, ενώ το διάγραμμα της συνάρτησης φαίνεται στην Εικόνα 1.10.



Εικόνα 1.10: Γραφικός προσδιορισμός των παραμέτρων Weibull.

## 1.6 Η ενέργεια του ανέμου

Ξεκινάμε με δύο βασικές έννοιες: την ισχύ ή την ενέργεια ανά μονάδα χρόνου και την ενέργεια που είναι διαθέσιμη εντός δεδομένης χρονικής περιόδου. Η κινητική ενέργεια που παρέχει η ροή του αέρα δια μέσω μιας επιφάνειας κάθετη προς την κατεύθυνση της ροής είναι ανά μονάδα μάζας:

$$\frac{1}{2} V^2$$

ή ανά μονάδα όγκου:

$$\frac{1}{2} \rho V^2$$

Για ένα ρεύμα αέρα που ρέει μέσω μιας επιφάνειας  $A$ , έχουμε μια ροή μάζας ανά μονάδα χρόνου  $\rho AV$ , οπότε η παρεχόμενη ισχύς είναι:

$$W = (\rho AV) \frac{1}{2} V^2 = \frac{1}{2} \rho AV^3$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του αέρα σε  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ,  $V$  είναι η ταχύτητα του ανέμου σε  $[\text{m}/\text{s}]$  και  $W$  είναι η ισχύς σε  $[\text{Watts}]$  ή  $[\text{Joules ανά δευτερόλεπτο}]$ . Η ισχύς είναι επίσης γνωστή ως ροή ενέργειας ή ως πυκνότητα ισχύς του αέρα.

Η πυκνότητα  $\rho$  του αέρα είναι συνάρτηση της πίεσης και της θερμοκρασίας του αέρα:



$$\rho = \rho_0 \left( \frac{288B}{760T} \right)$$

όπου  $\rho_0$  είναι η πυκνότητα του ξηρού αέρα σε πρότυπη θερμοκρασία και πίεση (1,226 kg/m<sup>3</sup> σε 288 K, 760 mm Hg), T είναι η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin [K] και B η βαρομετρική πίεση σε [mm Hg]. Τόσο η θερμοκρασία όσο και η πίεση είναι συναρτήσεις του ύψους από την επιφάνεια του εδάφους. Αν λάβουμε μια τυπική τιμή της πυκνότητας του αέρα 1,2 kg/m<sup>3</sup> στο επίπεδο της θάλασσας, θα έχουμε ισχύ ανά μονάδα επιφανείας:

$$W = 0,6V^3$$

Για ταχύτητα ανέμου V η αποδιδόμενη ενέργεια που διέρχεται μέσω της επιφάνειας A σε χρόνο t μετρούμενη σε Watt - δευτερόλεπτα, είναι:

$$Wt = \frac{1}{2} \rho AV^3 t$$

Η ενέργεια αυτή θα κινήσει την ανεμογεννήτρια. Η θερμοκρασία του αέρα που διαρρέει τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας δεν αλλάζει πρακτικά. Το ίδιο συμβαίνει και στις υδροστροβιλογεννήτριες. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις η ενέργεια αποδίδεται με την αλλαγή της ταχύτητας, όχι της θερμοκρασίας. Σε στροβίλους συμπίεσης αέρος τα πράγματα είναι διαφορετικά.

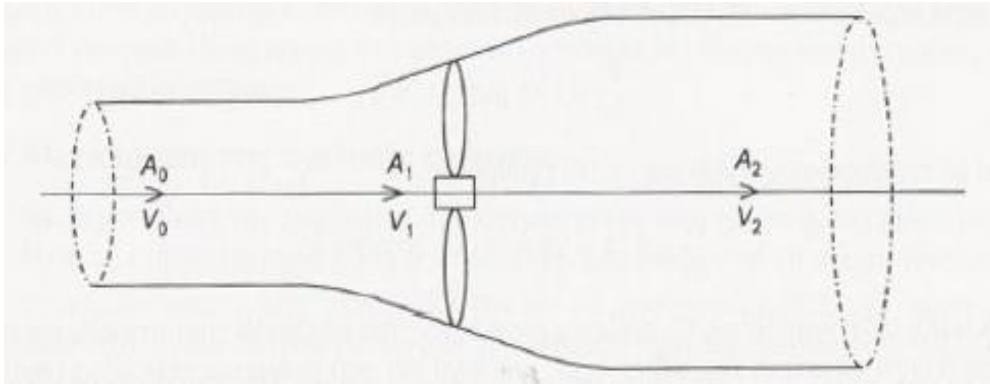
### **Το όριο Betz**

Η προκύπτουσα μέγιστη τιμή του συντελεστή απόδοσης  $C_p$  είναι 59%.

Μόνο ένα μέρος της συνολικής ισχύς W του αερίου ρεύματος μπορεί να μετατραπεί σε χρήσιμη ενέργεια από μια ανεμογεννήτρια. Η διαθέσιμη ισχύς για μια ανεμογεννήτρια ισούται με την αλλαγή της κινητικής ενέργειας του αέρα που περνά μέσα από το κινητό πλαίσιο (δρομέας με πτερύγια), της ανεμογεννήτριας.

Στην Εικόνα 1.11 φαίνεται ένας νοητός θάλαμος ατράκτου που σχηματίζουν οι ρευματογραμμές του αέρα εντός της οποίας υπάρχει ένα κινητό πλαίσιο, το οποίο αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια που συνιστούν την έλικα του στροβίλου (φτερωτή), γνωστή και ως δρομέας.

Υποθέτουμε εδώ ότι η μάζα του αέρα που περνά μέσα από το θάλαμο αυτής της ατράκτου δε συμπιέζεται, οπότε η πυκνότητα του αέρα αυτού δεν αλλάζει και ότι οι ταχύτητες των μορίων του αέρα αυτού είναι μικρές.



Εικόνα 1.11: Ιδεώδης ροή διαμέσου ατράκτου ανεμογεννήτριες.

Οι ρευματογραμμές (δηλαδή οι γραμμές που σχηματίζονται από τα ρεύματα των μορίων του αέρα), αποκλίνουν καθώς περνούν διαμέσου του δρομέα ενώ η ταχύτητα του ρεύματος του αέρα ελαττώνεται και κατά την απλή θεωρία της ορμής που εξετάζουμε εδώ, η πίεση του αέρα λίγο πριν περάσει τον δρομέα και λίγο μετά το δρομέα, δεν αλλάζει (είναι δηλαδή σταθερή).

Υποθέτουμε έτσι ότι τα δύο ή τρία περύγια του δρομέα (που υπάρχουν στις περισσότερες σύγχρονες ανεμογεννήτριες), έχουν αντικατασταθεί με άπειρα σε αριθμό μικρά περύγια, που ασκούν την ίδια δύναμη αντίστασης, στο επερχόμενο ρεύμα του αέρα, που είναι ίδια με τη μέση δύναμη αντίστασης  $F$  ενός πραγματικού συστήματος δρομέα.

Η ροή μάζας ανά μονάδα χρόνου  $m$ , είναι σταθερή στο απώτερο ανώρευμα, στο δρομέα και στο απώτερο κατώρευμα.

$$m = \rho A_0 V_0 = \rho A_1 V_1 = \rho A_2 V_2$$

Η δύναμη  $F$  που ασκείται από το ρεύμα του αέρα πάνω στο δρομέα ισούται με τη διαφορά της ορμής ανά μονάδα χρόνου:

$$F = m(V_0 - V_2)$$

Η ισχύς  $W$  που παίρνει ο δρομέας από το ρεύμα του αέρα ισούται με τη διαφορά κινητικής ενέργειας του ρεύματος του αέρα:

$$W = m \left( \frac{1}{2} V_0^2 - \frac{1}{2} V_2^2 \right)$$

Η δύναμη  $F$  που ασκείται πάνω στο δρομέα έχει ταχύτητα  $V_1$ , έτσι:

$$W = FV_1$$

Από τις προηγούμενες εξισώσεις έχουμε:

$$V_1 = \frac{1}{2}(V_0 + V_2)$$

Ο συντελεστής ταχύτητας κατωρέυματος  $b$ , δηλαδή ο λόγος των ταχυτήτων κατωρέυματος προς ανώρευμα είναι:

$$b = \frac{V_2}{V_0}$$

επίσης έχουμε:

$$\frac{F}{A_1} = \frac{1}{2} \rho V_0^2 (1 - b^2)$$

ακόμη:

$$\frac{W}{A_1} = \frac{1}{2} \rho V_0^3 \times \frac{1}{2} (1 - b^2)(1 + b)$$

Ο συντελεστής απόδοσης  $C_p$  ορίζεται ως ο λόγος της ισχύς  $W$  που αποδίδεται στο δρομέα από το ρεύμα του αέρα, προς την ισχύ  $W_1$  του ρεύματος αέρα εάν δεν περνούσε διαμέσου του θαλάμου της ατράκτου, δηλαδή:

$$C_p = \frac{W}{W_1}$$

και επειδή:

$$W_1 = \frac{1}{2} \rho A_1 V_0^3$$

έχουμε:

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

Αν διαφορίσουμε το  $C_p$  ως προς το  $b$ , θα λάβουμε το μέγιστο της συνάρτησης όταν ο συντελεστής  $b$  πάρει την τιμή  $1/3$ , οπότε προκύπτει:

$$C_p = \frac{16}{27}$$

ή περίπου 59% ή 0,59.

Αυτό το όριο Betz τυποποιήθηκε αρχικά το 1919 και ισχύει για όλους τους τύπους των αεροκινητήρων. Αντιλαμβανόμαστε ότι πρέπει να υπάρχει μια αλλαγή στην ταχύτητα του ρεύματος του αέρα, που διαπερνά το θάλαμο της ατράκτου, για την οποία θα είχαμε τη μέγιστη απόδοση μετατροπής. Εάν δεν υπάρξει αυτή η αλλαγή ο δρομέας δεν θα πάρει ενέργεια και η ισχύς του ανεμοκινητήρα θα είναι μηδενική. Εάν η ταχύτητα εξόδου του κατωρεύματος από το θάλαμο είναι μηδενική, τότε όλη η ενέργεια του ρεύματος του αέρα θα έχει αποδοθεί στον ανεμοκινητήρα. Όμως τέτοιου είδους ανεμοκινητήρας δεν υπάρχει, οπότε μόνο ένα μέρος της κινητικής ενέργειας του αέρα μετατρέπεται σε χρήσιμη ενέργεια από έναν κοινό ανεμοκινητήρα. Έτσι η μέγιστη απόδοση του ανεμοκινητήρα είναι ανάλογη της μέγιστης διαφοράς της ταχύτητας του αέρα που προσπίπτει στο δρομέα του ανεμοκινητήρα, από την ταχύτητα εξόδου του αέρα από το θάλαμο και φυσικά αυτή η ταχύτητα δεν είναι μηδενική. Όταν λέμε ανεμοκινητήρας εννοούμε το συγκρότημα της έλικας από το οποίο παίρνουμε περιστροφική κίνηση. Όταν η κίνηση αυτή χρησιμοποιηθεί για να κινηθεί μια γεννήτρια έχουμε μια ανεμογεννήτρια. Η κίνηση όμως αυτή μπορεί, αντί να δοθεί σε μία γεννήτρια, να δοθεί σε μία αντλία νερού. Οι σύγχρονοι ανεμοκινητήρες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχουν συντελεστή  $C_p = 0,40$ . Οι μεγαλύτερες απώλειες απόδοσης σε μια ανεμογεννήτρια οφείλονται στην τριβή των μορίων του αέρα με τα πτερύγια του δρομέα, στον στροβιλισμό του αέρα που προξενείτε στο ρεύμα του αέρα από το δρομέα, στις απώλειες ισχύς στο μηχανικό σύστημα μετάδοσης κίνησης καθώς και στο ηλεκτρικό σύστημα.

## 1.7 Μετατροπή της αιολικής ενέργειας

Πως η μεταβολή της ταχύτητας του ανέμου εντός μιας χρονικής περιόδου μετατρέπεται σε ετησία ενέργεια εξόδου σε κιλοβατώρες (kWh) από την ανεμογεννήτρια;

Αντιλαμβανόμαστε καταρχήν ότι πρέπει να ξεκινήσουμε από μια σειρά μετρήσεων ταχυτήτων ανέμου για κάποιο χρονικό διάστημα και κατόπιν να ολοκληρώσουμε την ισχύ σε σειρές μικρών χρονικών διαστημάτων που συνιστούν την επιθυμητή χρονική περίοδο. Αυτό μπορούμε να το πετύχουμε αν πάρουμε τη χαρακτηριστική ισχύς της ανεμογεννήτριας και την συσσωρευτική κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου. Πρέπει επίσης να λάβουμε υπόψη τη μεταβολή των ταχυτήτων του ανέμου σε

συνάρτηση με το ύψος, έτσι ώστε να επιλέξουμε μια αντιπροσωπευτική τιμή ταχύτητας ανέμου που θα διέλθει το θάλαμο της ατράκτου της ανεμογεννήτριας.

Ανάλογα με τις ταχύτητες των ανέμων που επικρατούν σε ορισμένη γεωγραφική τοποθεσία, η ανεμογεννήτρια θα παράγει μια ετήσια μέση ισχύ που αντιστοιχεί στο 30% της μεγίστης υπολογιζόμενης ισχύος. Αν υποθέσουμε ότι η ανεμογεννήτρια θα είναι διαθέσιμη να λειτουργεί κατά το 95% του χρόνου, χωρίς άλλες διακοπές, τότε ο συνολικός συντελεστής ετήσιου φόρτου ή συντελεστής ικανότητας υπολογίζεται ως  $0,3 \times 0,95 = 0,285$  ή 28,5 %.

Μια ανεμογεννήτρια των 100 kW εργαζόμενη σε πλήρη ισχύ εξόδου θα παράγει θεωρητικά ετησίως ισχύ  $8,76 \times 10^5$  kWh κατά μέγιστο. Τα 100 kW είναι μόνο ένα κλάσμα της κινητικής ενέργειας του ανέμου, σημαντικά χαμηλότερο από το όριο Betz και ίσως τόσο χαμηλό όσο 0,40. Για ετήσιο συντελεστή ικανότητας 28,5% η πραγματική ισχύς εξόδου θα ήταν  $2,5 \times 10^5$  kWh ετησίως, που με 0,08 ευρώ την κιλοβατώρα θα είχαμε μικτό κέρδος 20.000 ευρώ.

Η ιδεώδης, θεωρητικά, χαρακτηριστική ισχύος για μια ανεμογεννήτρια φαίνεται στην Εικόνα 1.12.

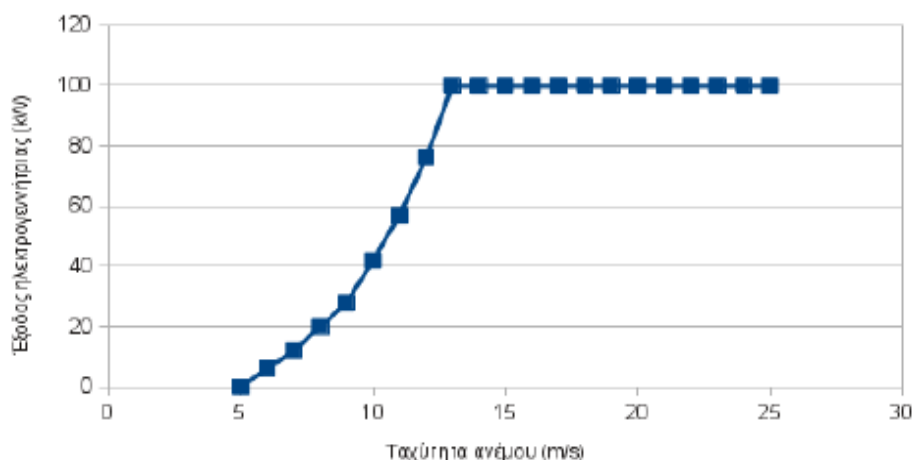
Κάτω από 5 m/s που είναι το όριο αποκοπής ταχύτητας ανέμου δεν υπάρχει αρκετή ενέργεια στον άνεμο για να υπερβεί τις μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες της ανεμογεννήτριας. Μεταξύ 5 m/s και 13 m/s η ισχύς εξόδου αυξάνεται ραγδαία σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου και δίνεται από τον τύπο:

$$W = C_p \times \frac{1}{2} \rho A_1 V_0^3$$

Η εξίσωση δε δίνει την ακριβέστερη συνάρτηση του κύβου της ταχύτητας του ανέμου, δεδομένου ότι ο συντελεστής απόδοσης  $C_p$  μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου.

Σε αυτό το παράδειγμα ο σχεδιαστής της ανεμογεννήτριας περιόρισε την ισχύ που μετατρέπεται από το δρομέα της ανεμογεννήτριας στα 100 kW. Η επιλογή αυτή έγινε για να περιοριστεί η αντοχή και έτσι το βάρος και το κόστος των εξαρτημάτων της ανεμογεννήτριας. Όμως έτσι μπορεί να χαθεί ετησίως ενέργεια που θα παράγονταν από μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια. Εν τούτοις ας λάβουμε υπόψη την τυπική κατανομή ταχυτήτων ανέμου της Εικόνας 1.5. Για λίγες μόνο ώρες τον χρόνο η ταχύτητα του ανέμου ξεπερνά τα 13 m/s, οπότε και η ισχύς εξόδου του δρομέα της ανεμογεννήτριας ξεπερνά τα 100 kW. Έτσι η ετήσια απώλεια σε εισόδημα θα είναι

μικρή. Βέβαια σε περιοχές που η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγάλη θα επιλέγονταν διαφορετική ισχύς ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 1.12: Θεωρητική χαρακτηριστική μιας ανεμογεννήτριας 100 kW ή καμπύλη ισχύος.

Κυρίως δύο μέθοδοι ρύθμισης της ισχύος εξόδου μιας ανεμογεννήτριας υπάρχουν για την περίπτωση που προαναφέραμε. Η μηχανική ρύθμιση στροφών κατά την οποία ελαττώνεται η αεροδυναμική επιφάνεια των περιστρεφόμενων πτερυγίων, οπότε ελαττώνεται και ο  $C_p$ .

Επίσης η μηχανική ρύθμιση πέδησης κατά την οποία τα πτερύγια σταματούν να κινούνται όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει ένα προκαθορισμένο όριο, οπότε και πάλι περιορίζεται η ισχύς που μεταδίδεται από το δρομέα, μέσω μηχανισμού οδοντωτών τροχών, προς την ηλεκτρογεννήτρια.

Η ταχύτητα του ανέμου, στο ύψος της πλήμνης (έλικας), που παράγει τη μέγιστη (εκτιμηθείσα) ισχύ, ονομάζεται ταχύτητα εκτίμησης ανέμου και στο παράδειγμα αυτό είναι 13 m/s.

Στην πράξη η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας κατασκευάζεται από μετρήσεις ταχύτητας ανέμου και ισχύος εξόδου που γίνονται μέσα σε χρονικά διαστήματα 10 λεπτών και καταγράφεται η μέση τιμή για κάθε τέτοιο χρονικό διάστημα. Οι μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου γίνονται σε κάποια απόσταση από την έλικα του στροβίλου και δε λαμβάνουν υπόψη διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου δια μέσω της έλικας. Επίσης, λαμβάνεται πάλι ο μέσος όρος ενός μεγάλου αριθμού μέσων όρων 10 λεπτών μετρήσεων δια της τεχνικής των θυλάκων, οπότε παράγεται μια καμπύλη ισχύος σε πιο στρογγυλοποιημένη μορφή από της Εικόνας 1.12.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ

### 2.1 Γενικά

Η ανεμογεννήτρια είναι η μηχανή η οποία μας επιτρέπει να απορροφήσουμε την αιολική ενέργεια. Βεβαία δεν μπορεί να συγκομισθεί όλη η ενέργεια του πνέοντος ανέμου, αφού η διατήρηση της μάζας απαιτεί όση μάζα του αέρα εξέρχεται από το στρόβιλο άλλη τόση να εισέρχεται. Ο νόμος του Betz υποδεικνύει ότι η μέγιστη επιτεύξιμη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας από μια ανεμογεννήτρια δεν μπορεί να ξεπερνά το 59% της συνολικής κινητικής ενέργειας του αέρα που ρέει διαμέσου του στρόβιλου. Επίσης υπεισέρχονται περαιτέρω απώλειες, όπως η τριβή της στρεφόμενης πτέρυγας του δρομέα, απώλειες του κιβωτίου ταχυτήτων, απώλειες στην γεννήτρια και στον μετατροπέα, οι οποίες μειώνουν την ισχύ που παρασχεθεί από μια ανεμογεννήτρια κ.ά.. Επιπροσθέτως, η αποδοτικότητα μπορεί να μειωθεί, ελαφρώς, με την πάροδο του χρόνου λόγω φθοράς. Τα στοιχεία που έχουμε βέβαια είναι αρκετά ενθαρρυντικά καθώς, για παράδειγμα, ανάλυση 3128 ανεμογεννητριών εγκατεστημένων για περισσότερο από 10 χρόνια στη Δανία, έδειξε ότι οι μισές δεν είχαν καμία μείωση, ενώ οι άλλες μισές έδειξαν μείωση της παραγωγής κατά 1,2% ετησίως.

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες έχουν δυνατότητα λειτουργίας για ταχύτητες από 4 έως 25 m/s, ενώ η παλαιάς τεχνολογίας λειτουργούσαν πολύ καλά με υψηλό βαθμό απόδοσης γύρω στα 12 με 14 m/s ταχύτητα ανέμου. Η σύγχρονη τεχνολογία στην αιολική ενέργεια μπορεί να δώσει αποφασιστικές λύσεις για την παραγωγή καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας και διοχέτευσής της στο δίκτυο. Επιπλέον, οι νέες τεχνολογίες στα αιολικά συστήματα έχουν άρει τα παλιά προβλήματα που είχαν οι πρώτες μηχανές και έχουν οδηγήσει στη βέλτιστη ενσωμάτωση των ανεμογεννητριών και των αιολικών πάρκων στο σύστημα έτσι ώστε να προσεγγίζουν και πολλές φορές να ξεπερνούν τις λειτουργικές δυνατότητες που δίνουν οι συμβατικοί σταθμοί από άποψη λειτουργίας και ευστάθειας του συστήματος. Βέβαια υπάρχουν πολλά ακόμα να λυθούν αλλά υπάρχει η δυνατότητα σήμερα μεγάλης διείσδυσης ανεμογεννητριών και αιολικών πάρκων στο σύστημα.

Με το πέρας των ετών, έχοντας εξετάσει διεξοδικά τον άνεμο καθώς και τις περιστάσεις κάτω από τις οποίες θέλουμε να τον εκμεταλλευτούμε, έχουμε καταλήξει πλέον σε κάποιες εδραιωμένες επιλογές όσον αφορά τους τύπους, τα μεγέθη και τη μορφή των ανεμογεννητριών.



Εικόνα 2.1: Ανεμογεννήτρια.

## 2.2 Κατηγορίες και τύποι ανεμογεννητριών

Οι δύο βασικές κατηγορίες ανεμογεννητριών, διακρίνονται ανάλογα προς τον προσανατολισμό του άξονά τους σε σχέση με τη ροή του ανέμου· προκύπτουν λοιπόν δύο κατηγορίες: οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου και κατακόρυφου άξονα. Επίσης οι δύο βασικοί τύποι ανεμογεννητριών που υπάρχουν με βάση τα ηλεκτρικά μέρη της γεννήτριας είναι οι ανεμογεννήτριες σταθερής και μεταβλητής ταχύτητας. Στη συνέχεια θα αναφέρουμε κάποια βασικά χαρακτηριστικά τόσο των κατηγοριών όσο και των διαφορετικών τύπων.

### **A) Κατακόρυφου άξονα (“Vertical Axis Wind Turbine” - VAWT)**

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα έχουν τον άξονα περιστροφής τους κάθετο ως προς το έδαφος και κατακόρυφο ως προς τη ροή του ανέμου. Ένα πλεονέκτημα αυτής της διάταξης είναι ότι η Α/Γ δεν χρειάζεται να είναι στραμμένη προς τον άνεμο για να είναι αποτελεσματική, κάτι το οποίο αποτελεί πλεονέκτημα σε μια περιοχή όπου η κατεύθυνση του ανέμου είναι εξαιρετικά μεταβλητή, για παράδειγμα, όταν η γεννήτρια είναι τοποθετημένη σε ένα κτίριο. Το μηχανικό έργο μεταφέρεται μέσω του κατακόρυφου άξονα στο έδαφος όπου είναι τοποθετημένο το σύστημα για μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια. Επίσης, το γεγονός ότι η γεννήτρια και το



κιβώτιο ταχυτήτων μπορούν να τοποθετηθούν κοντά στο έδαφος, είναι ένα πλεονέκτημα καθώς διευκολύνουν πολύ την προσβασιμότητα και κατ' επέκταση τη συντήρηση. Σημαντικό είναι επίσης ότι σε αυτές τις μηχανές ο έλεγχος βήματος πτερυγίων δεν είναι απαραίτητος όταν χρησιμοποιούνται σε σύγχρονη γεννήτρια. Οι πιο γνωστοί τύποι ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι οι ανεμογεννήτριες τύπου Darrieus και Savonius, οι οποίες όμως δεν έχουν γνωρίσει την εμπορική ανάπτυξη που έχουν οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.

Υπάρχουν όμως και κάποια σοβαρά μειονεκτήματα που κάνουν τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα όχι και τόσο λειτουργικές. Το κυριότερο πρόβλημα είναι πολλές φορές δεν είναι δυνατόν να ξεκινήσουν να περιστρέφονται χωρίς εξωτερική παρέμβαση, μιας και η ροπή εκκίνησης τους είναι πάρα πολύ υψηλή. Στη περίπτωση αυτή υποχρεωτικά πρέπει να λειτουργήσουν στην αρχή σαν κινητήρας τραβώντας ρεύμα από το δίκτυο. Επίσης αξίζει να σημειωθεί το γεγονός πως έχουν μικρή σχετικά απόδοση μιας και η ταχύτητα του ανέμου σε αυτά τα ύψη είναι σχετικά χαμηλή και επίσης κατά την περιστροφή τους, υπάρχουν σημεία στα οποία η συνεισφορά του ανέμου είναι σχεδόν μηδενική. Αξίζει να αναφερθεί ότι σε σύγκριση με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, μια ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα για να έχει την ίδια περίπου παραγωγή με μια οριζόντιου άξονα, θα πρέπει να έχει μέχρι και τριπλάσια επιφάνεια επαφής με τον αέρα. Αυτό συνεπάγεται μεγάλο όγκο και βάρος της κατασκευής.



Εικόνα 2.2: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα.

## **B) Οριζόντιου άξονα (“Horizontal Axis Wind Turbine” - HAWT)**

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν τον άξονα περιστροφής τους οριζόντιο ως προς το έδαφος και σχεδόν παράλληλο στη ροή του ανέμου. Χαρακτηρίζονται και κατηγοριοποιούνται με βάση των αριθμό των πτερυγίων τους: εκείνες με ένα πτερύγιο ονομάζονται μονοπτέρυγες, με δύο διπτέρυγες, με τρία τριπτέρυγες και όλες οι άλλες με περισσότερα από τρία πτερύγια ονομάζονται πολυπτέρυγες. Η πτερωτή τους μπορεί να τοποθετηθεί είτε σε προσήνεμη διάταξη (upwind), δηλαδή μπροστά από τον πύργο στήριξης, είτε σε υπήνεμη διάταξη (downwind), δηλαδή πίσω από τον πύργο στήριξης, σε σχέση με την διεύθυνση του ανέμου. Οι μονοπτέρυγες αν και είναι φθηνότερες όλων, δεν έγιναν ποτέ πολύ δημοφιλείς, είτε για αισθητικούς λόγους, είτε λόγω προβλημάτων στην εξισορρόπηση δυνάμεων της όλης κατασκευής κατά την περιστροφή τους, γεγονός που κάνει απαραίτητη την τοποθέτηση αντίβαρου στην πλήμνη. Παρόμοια προβλήματα εμφανίζουν και οι διπτέρυγες ανεμογεννήτριες αν και εκεί τα πράγματα είναι σαφώς καλύτερα. Σήμερα, η συντριπτική πλειοψηφία των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται στην αγορά είναι οι τριπτέρυγες.

Το βασικό πλεονέκτημά των ευρέως χρησιμοποιούμενων τριπτέρυγων ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα είναι ότι είναι πιο σταθερές μιας και το αεροδυναμικό φορτίο κατανέμεται ομοιόμορφα ενώ και το μηχανικό εξισορροπείται. Εφαρμογές με μεγαλύτερο αριθμό πτερυγίων (6, 8, 12 κ.ά.) έχουν υλοποιηθεί κατά καιρούς αλλά χωρίς μεγάλη απήχηση. Ο λόγος μεταξύ του συνολικού εμβαδού των πτερυγίων προς την επιφάνεια σάρωσης ονομάζεται στιβαρότητα. Οι μηχανές με μεγάλο αριθμό πτερυγίων προτιμώνται σε εφαρμογές που απαιτείται μεγάλη ροπή εκκίνησης, γιατί έχουν την ιδιότητα να μπορούν να ξεκινούν να περιστρέφονται ευκολότερα (μεγαλύτερη επιφάνεια αλληλεπιδρά με τον άνεμο αρχικά). Παρόλα αυτά, η ισχύς που παράγουν είναι μικρότερη συγκρινόμενη με μια ανεμογεννήτρια λιγότερων πτερυγίων που σαρώνει την ίδια επιφάνεια, λόγω αυξημένων αεροδυναμικών απωλειών. Έχει αποδειχθεί ότι οι τριπτέρυγοι ρότορες έχουν μεγαλύτερο αεροδυναμικό συντελεστή ισχύος από τους πολυπτέρυγους, έτσι οι τελευταίοι χρησιμοποιούνται περιορισμένα μόνο σε κάποιες εφαρμογές όπως η άντληση υδάτων, όπου η απαιτούμενη ροπή εκκίνησης είναι μεγάλη.

Το μεγάλο μειονέκτημα των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα είναι ότι η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων πρέπει να τοποθετηθούν πάνω στον πύργο, γεγονός που κάνει την κατασκευή τους ακριβή και πιο δύσκολη. Επίσης, σε αντίθεση με τις ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα, χρειάζονται ενεργό μηχανισμό περιστροφής ή

συνηθέστερα ένα ουραίο πτερύγιο για τον προσανατολισμό στην κατεύθυνση του ανέμου. Παρά τα μειονεκτήματά τους, αυτή τη στιγμή, παγκόσμια, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα κατέχουν το συντριπτικό μερίδιο της αγοράς.



Εικόνα 2.3: Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.

### **Ι) Σταθερής Ταχύτητας (“Fixed Speed Wind Turbines” - FSWT)**

Οι ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας λειτουργούν με σταθερή ταχύτητα δρομέα ανεξαρτήτως της ταχύτητας του ανέμου. Η ταχύτητα τους εξαρτάται από την συχνότητα του δικτύου, το κιβώτιο ταχυτήτων και τον αριθμό των ζευγών των πόλων της γεννήτριας. Στις ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας χρησιμοποιούνται συνήθως επαγωγικές μηχανές βραχυκυκλωμένου κλωβού συνδεδεμένες απευθείας στο δίκτυο. Συνήθως τοποθετείται συστοιχία πυκνωτών για να αντισταθμίζεται η άεργος ισχύς που καταναλώνει η γεννήτρια η οποία μεγαλώνει αναλογικά με την παραγωγή της ενεργού ισχύος.

Πλεονεκτήματα αυτού του τύπου των ανεμογεννητριών είναι η απλότητα τους και η αξιοπιστία τους, η σθεναρότητα σε υπερφορτίσεις και το χαμηλό κόστος τόσο της εγκατάστασης όσο και της συντήρησής τους. Τα μειονεκτήματα που εμφανίζουν είναι σοβαρές μηχανικές καταπονήσεις σε απότομες αεροδυναμικές μεταβολές, έλλειψη ελέγχου της κατανάλωσης άεργου ισχύος και της ποιότητας της παραγόμενης ενέργειας καθώς και δημιουργία μεταβατικών διαταραχών στο δίκτυο από τις αναταράξεις του ανέμου.

Κάποιοι κατασκευαστές για να βελτιώσουν την απόδοση των ανεμογεννητριών αυτών και να εκμεταλλευτούν σε μεγαλύτερο βαθμό το αιολικό δυναμικό, προσαρμόζουν στις ανεμογεννήτριες τους δύο επαγωγικές γεννήτριες, μία μικρή για περιόδους ασθενών ανέμων (χαμηλές ταχύτητες) και μία μεγαλύτερη για περιόδους ισχυρών ανέμων (υψηλές ταχύτητες). Ένας άλλος σχεδιασμός είναι αυτός των γεννητριών με μεταβαλλόμενους πόλους ώστε να έχουμε διαφορετική ταχύτητα περιστροφής. Το ποιά από τις δύο αυτές βελτιώσεις είναι πλέον συμφέρουσα εξαρτάται από τη μορφή των ανέμων στην συγκεκριμένη περιοχή και το επιπλέον κόστος της γεννήτριας μεταβλητών πόλων σε σύγκριση με το όφελος από την παραγόμενη ενέργεια και την αύξηση στην αεροδυναμική απόδοση.

## **II) Μεταβλητής Ταχύτητας (“Variable Speed Wind Turbines” - VSWT)**

Τα μειονεκτήματα των ανεμογεννητριών σταθερής ταχύτητας οδήγησαν στην ανάπτυξη των αιολικών συστημάτων μεταβλητής ταχύτητας ή μεταβλητών στροφών. Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία των ανεμογεννητριών μεταβλητής ταχύτητας, είναι η κυρίαρχη στο χώρο της παραγωγής αιολικής ενέργειας. Όπως είναι προφανές και από την ονομασία τους, οι μηχανές αυτού του τύπου μπορούν να λειτουργήσουν σε ένα μεγάλο εύρος διαφορετικών τιμών ταχύτητας του ανέμου ούτως ώστε να έχουμε τη μέγιστη αεροδυναμική απόδοση. Μια μηχανή μεταβλητής ταχύτητας, χρησιμοποιεί διατάξεις ηλεκτρονικών ισχύος προκειμένου να μεταβάλλει την ταχύτητά της, ανάλογα με τις αεροδυναμικές συνθήκες, ενώ συνδέει τη γεννήτρια στη σταθερή συχνότητα του δικτύου. Έτσι με την κατάλληλη προσαρμογή της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα της μηχανής ως προς την ταχύτητα  $v$  του ανέμου επιτυγχάνεται ο λόγος ταχύτητας ακροπτερυγίου  $\lambda$  να παραμένει σταθερός σε μια προκαθορισμένη τιμή, τη βέλτιστη  $\lambda_{opt}$ , η οποία αντιστοιχεί και στον μέγιστο συντελεστή αεροδυναμικής απόδοσης  $C_{pmax}$ . Στόχος λοιπόν της σχεδίασης αυτών των συστημάτων είναι η μεγιστοποίηση της αεροδυναμικής απόδοσης και της παραγόμενης ισχύος.

Η χρήση διατάξεων ηλεκτρονικών ισχύος είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την λειτουργία των συστημάτων αυτών. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου ανεμογεννητριών είναι ο έλεγχος της άεργου ισχύος και η βελτίωση της ποιότητας της ισχύος, η οικονομικότερη ετήσια παραγωγή ενέργειας καθώς έχουμε λειτουργία του συστήματος στην βέλτιστη ταχύτητα, η αυξημένη απομάστευση ισχύος και οι μειωμένες μηχανικές καταπονήσεις. Ενώ κάποια μειονεκτήματα είναι οι απώλειες

στα ηλεκτρονικά ισχύος και η αύξηση του κόστους της εγκατάστασης λόγω του εξοπλισμού ελέγχου.

Ένας σημαντικός λόγος για να λειτουργεί μια μηχανή εν μέρει τουλάχιστον με μεταβλητή ταχύτητα είναι όταν αυτό γίνεται σε συνδυασμό με τη λειτουργία του ελέγχου γωνίας βήματος σε επαγωγικές γεννήτριες. Είναι γνωστό ότι ο έλεγχος γωνίας βήματος είναι μια μηχανική διαδικασία. Αυτό σημαίνει ότι ο χρόνος αντίδρασης του μηχανισμού του ελέγχου γωνίας βήματος έχει κάποια όρια και γενικά είναι μεγάλος. Ωστόσο, αν χρησιμοποιηθεί μια γεννήτρια με μεταβλητή ταχύτητα, η ολίσθηση θα είναι παράμετρος του ελέγχου. Όταν υπάρξουν ριπές ανέμου, ο μηχανισμός ελέγχου δίνει σήμα να αυξηθεί η ολίσθηση της γεννήτριας, προκειμένου να επιτρέψει στο ρότορα να κινηθεί λίγο πιο γρήγορα ενώ ο μηχανισμός του ελέγχου γωνίας βήματος αρχίζει να ανταπεξέρχεται στην κατάσταση στρέφοντας τα πτερύγια περισσότερο εκτός της πορείας του ανέμου. Μόλις ο μηχανισμός του ελέγχου γωνίας βήματος έχει κάνει τη δουλειά του, η ολίσθηση μειώνεται και πάλι. Σε περίπτωση που η ταχύτητα του ανέμου μειωθεί ξαφνικά, η διαδικασία που προαναφέρθηκε γίνεται αντίστροφα. Οπότε, το μηχανικό σύστημα του ελέγχου της γωνίας βήματος συμβάλλει πιο ενεργά στη ρύθμιση της ταχύτητας της μηχανής και το ηλεκτρικό σύστημα ελέγχει τη ροπή.

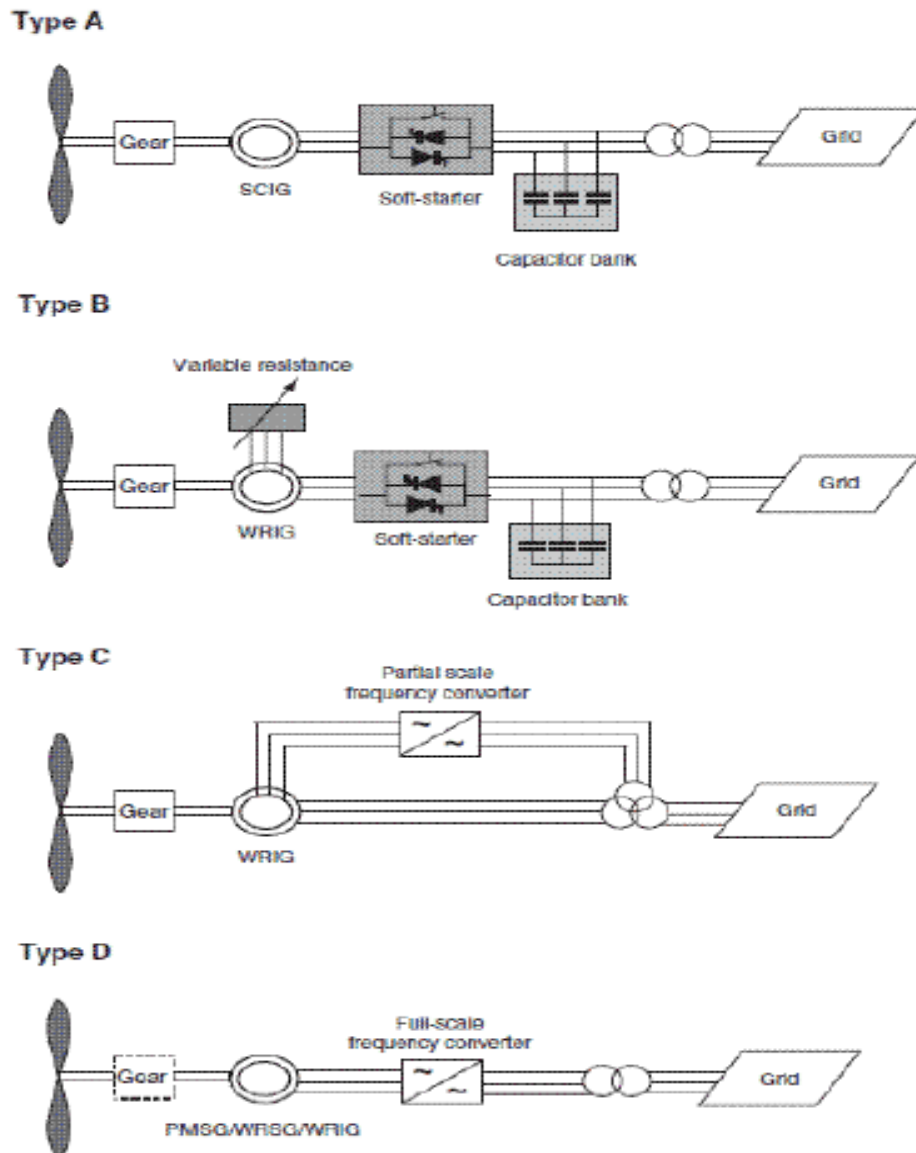
Το να λειτουργεί μια γεννήτρια σε υψηλές τιμές ολίσθησης παράλληλα σημαίνει μεγαλύτερες απώλειες (μεγαλύτερα ποσά θερμότητας) και κατ' επέκταση μικρότερη απόδοση. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα από μόνο του, μιας και η μόνη εναλλακτική λύση είναι να σπαταληθεί η περίσσεια ενέργεια στρέφοντας τα πτερύγια της μηχανής εκτός της πορείας του αέρα. Ένα από τα μεγαλύτερα οφέλη αυτής της στρατηγικής ελέγχου που αναφέρθηκε παραπάνω είναι η καλύτερη ποιότητα παραγόμενης ενέργειας. Οι διακυμάνσεις στην παραγόμενη ενέργεια μειώνονται μέσω της μεταβολής της ολίσθησης της γεννήτριας και με το να αποθηκεύεται ή να ελευθερώνεται μέρος της ενέργειας σαν κινητική ενέργεια πάνω στο ρότορα της ανεμογεννήτριας. Η ολίσθηση σε μια επαγωγική μηχανή είναι συνήθως πολύ μικρή για λόγους καλύτερης απόδοσης, οπότε η περιστροφική ταχύτητα ποικίλει 1% – 3% μεταξύ της λειτουργίας εν κενώ αλλά και υπό πλήρες φορτίο. Η ολίσθηση ωστόσο, εξαρτάται από την αντίσταση στα τυλίγματα του ρότορα της γεννήτριας. Όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ολίσθηση.

Στις επαγωγικές γεννήτριες ένας τρόπος να μεταβληθεί η ολίσθηση και κατ' επέκταση η ταχύτητα είναι να μεταβληθεί η αντίσταση στο δρομέα. Με αυτό τον

τρόπο, η ολίσθηση της γεννήτριας μπορεί να αυξηθεί περίπου κατά 10% έχοντας και αντίστοιχη μεταβολή στην ταχύτητα, γεγονός που οδηγεί στον έλεγχο της παραγόμενης ισχύος. Η λύση αυτή δίνει πολύ περιορισμένο εύρος ταχυτήτων. Η χρήση μηχανής δακτυλιοφόρου δρομέα, δηλαδή μέσω ενός δρομέα με χάλκινα τυλίγματα, τα οποία συνδέονται σε αστέρα και συνδέονται με εξωτερική μεταβλητή αντίσταση, η οποία ελέγχεται από ένα πρόσθετο ηλεκτρονικό σύστημα ελέγχου για τις αντιστάσεις έχει το μειονέκτημα ότι η επιπλέον παραγόμενη ενέργεια καταναλώνεται ως θερμότητα στην αντίσταση. Η σύνδεση συνήθως γίνεται με ψήκτρες και δακτυλίους ολίσθησης, που αποτελεί ένα σαφές μειονέκτημα. Τα στοιχεία της σύνδεσης είναι στοιχεία που φθείρονται εύκολα, πράγμα που σημαίνει ότι απαιτείται περισσότερη συντήρηση για τη γεννήτρια.

Ένας άλλος τρόπος για να λειτουργεί μια επαγωγική γεννήτρια σαν μηχανή μεταβλητής ταχύτητας είναι το μοντέλο επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδοσίας (DFIG). Αυτή συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της προηγούμενης τοπολογίας για αυτό και θεωρείται βελτιωμένη έκδοση της, με έμφαση στα βελτιωμένα ηλεκτρονικά ισχύος που διαθέτει. Η επαγωγική μηχανή είναι δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG), ο δρομέας είναι συνδεδεμένος με το δίκτυο μέσω ενός back-to-back μετατροπέα τάσης ο οποίος ελέγχει το σύστημα διέγερσης έτσι ώστε να γίνει αποσύζευξη της μηχανικής και ηλεκτρικής συχνότητας του δρομέα και να ταιριάζει την συχνότητα του δικτύου με αυτήν του δρομέα.

Τέλος, υπάρχει και μια τοπολογία σε γεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας στην οποία η γεννήτρια συνδέεται απευθείας στο δίκτυο μέσω ενός ανορθωτή σε σειρά με έναν αντιστροφέα. Τα είδη των γεννητριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε αυτήν την τοπολογία είναι εκτός της επαγωγικής γεννήτριας δακτυλιοφόρου δρομέα (WRIG) και σύγχρονη γεννήτρια μόνιμου μαγνήτη (PMSG). Με την χρήση της γεννήτριας αυτής σε συνδυασμό με πολλά ζεύγη πόλων αποφεύγουμε τη χρήση κιβωτίου ταχυτήτων.



Εικόνα 2.4: Συγκεντρωμένες οι 4 τοπολογίες με την σειρά που περιγράφηκαν προηγουμένως. Α) Ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας με επαγωγική γεννήτρια βραχυκυκλωμένου κλωβού Β) Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας με μεταβαλλόμενη αντίσταση δρομέα C) Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας διπλής τροφοδοσίας D) Ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας διπλής τροφοδοσίας συνδεδεμένη σε σειρά με ανορθωτή και αντιστροφή.

## 2.3 Δομή ανεμογεννήτριας

Η συνηθισμένη ανεμογεννήτρια που χρησιμοποιείται σήμερα είναι, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, οριζόντιου άξονα και αποτελείται από την άτρακτο στην οποία είναι τοποθετημένη μια γεννήτρια, ο μηχανισμός μετάδοσης κίνησης (κιβώτιο ταχυτήτων, άξονας χαμηλών ταχυτήτων και άξονας υψηλών ταχυτήτων), τρία

πτερύγια και έναν πύργο που βρίσκεται πίσω από τα πτερύγια έτσι ώστε ο άνεμος να έρχεται από το εμπρόσθιο μέρος.

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε πιο αναλυτικά τα δομικά στοιχεία από τα οποία απαρτίζεται μια ανεμογεννήτρια τα οποία εμφανίζονται και στην παρακάτω εικόνα σε μια πλάγια τομή της Α/Γ.



Εικόνα 2.5: Πλάγια τομή ανεμογεννήτριας και βασικά δομικά στοιχεία.

**1) Πτερύγια (Blades):** Τα πτερύγια έχουν αεροδυναμικό σχήμα το οποίο έχει προέλθει από αντίστοιχα πτερύγια αεροπορικών κινητήρων και είναι κατασκευασμένα συνήθως από ελαφρά κράματα μετάλλων, ενισχυμένο πολυεστέρα, αλλά και από ξύλο σε συνδυασμό με ειδικές ρητίνες, έτσι ώστε να είναι ανθεκτικά σε μεγάλες καταπονήσεις. Μπορεί να είναι ενιαία ή να διαθέτουν ακροπτερύγια και καλύπτουν ένα μικρό ποσοστό (2% έως 10%) του εμβαδού της περιφέρειας που διαγράφουν.

Τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά (αριθμός πτερυγίων, κατανομή πλάτους, επιλογή αεροτομής, συστροφή) προκύπτουν από τη βελτιστοποίηση της



αεροδυναμικής σχεδίασης. Η κίνηση του ανέμου πάνω από τα πτερύγια προκαλεί την περιστροφή τους και μέσω ενός κεντρικού άξονα μετατρέπει την κίνηση του ανέμου σε κυκλική κίνηση στην ανεμογεννήτρια. Η μηχανική καταπόνηση των πτερυγίων σε συνθήκες πολύ υψηλού ανέμου, περιορίζεται σε ανεκτά επίπεδα μέσω του ελέγχου της ταχύτητας περιστροφής, η οποία περιορίζεται μέσα στα επιθυμητά όρια.

Ο έλεγχος αυτός όχι μόνο προστατεύει τα πτερύγια, αλλά και τη χρησιμοποιούμενη ηλεκτρική γεννήτρια από υπερφόρτιση και υπερθέρμανση. Η στήριξη των πτερυγίων της έλικας στον άξονα του δρομέα μπορεί να είναι σταθερή (πτερύγιο σταθερού βήματος) ή μεταβλητή, δηλαδή να είναι δυνατή η περιστροφή του στο σημείο εδράσεως (πτερύγιο μεταβλητού βήματος). Επιπλέον, για λόγους ασφάλειας της ανεμογεννήτριας, τα πτερύγια είναι συνήθως εφοδιασμένα με συστήματα αεροδυναμικής πέδησης (αερόφρενα), τα οποία διακόπτουν τη λειτουργία της μηχανής σε έκτακτες περιπτώσεις.

Τα πτερύγια σε μεγάλες ανεμογεννήτριες περιστρέφονται κατά μήκος του άξονά τους και δέχονται τον άνεμο κατά μήκος τους υπό διαφορετικές γωνίες. Η γωνία πρόσπτωσης αυξάνεται προς τη βάση του πτερυγίου και οι πολύ μεγάλες γωνίες δεν έχουν το επιθυμητό αποτέλεσμα.

**2) Δρομέας (Rotor):** Ο δρομέας είναι ίσως το πιο βασικό ζήτημα στη σχεδίαση του όλου του συστήματος. Αποτελείται από την πλήμνη και τα πτερύγια. Ο δρομέας περιστρέφει τη γεννήτρια, και μέσω αυτού μεταφέρεται η μηχανική ενέργεια ώστε να μετατραπεί σε ηλεκτρική μέσω της επαγωγής μέσα στη γεννήτρια. Είναι σχεδιασμένος αεροδυναμικά, για να συλλάβει τη μέγιστη περιοχή επιφάνειας του αέρα, προκειμένου να περιστρέφεται όσο το δυνατόν πιο εργονομικά. Η κατασκευή του δρομέα περιλαμβάνει το 20% περίπου του συνολικού κόστους της ανεμογεννήτριας, συμπεριλαμβανομένου των πτερυγίων, για τη μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε χαμηλής ταχύτητας περιστροφική ενέργεια.

**3) Στροφή Πτερυγίων (Pitch):** Οι Τα πτερύγια έχουν τη δυνατότητα να στρίβουν γύρω από τον διαμήκη άξονά τους, ανεξάρτητα από τον άνεμο, ώστε να ελέγχουν την ταχύτητα του δρομέα και τον εμποδίζουν από το να στρίβει σε ανέμους οι οποίοι είναι υπερβολικά ισχυροί ή υπερβολικά ασθενείς για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.

**4) Φρένο (Brake):** Αποτελεί ένα δισκόφρενο, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί μηχανικά, ηλεκτρικά ή υδραυλικά με σκοπό να σταματήσει το δρομέα σε καταστάσεις που ενέχουν κίνδυνο έκτακτης ανάγκης. Ο έλεγχος της υπερβολικής ταχύτητας στις ανεμογεννήτριες εξασφαλίζεται με δύο τρόπους: αεροδυναμικά ή με μηχανική πέδηση.

Ο έλεγχος της υπερβολικής ταχύτητας αεροδυναμικά αποτελεί την καλύτερη μέθοδο για την επιβράδυνση της ανεμογεννήτριας. Το φρενάρισμα της ανεμογεννήτριας μπορεί να επιτευχθεί με τη μεταφορά ενέργειας από τη γεννήτρια, μετατρέποντας την κινητική ενέργεια της περιστροφής του στροφέα σε θερμότητα. Αυτή η μέθοδος είναι χρήσιμη στις περιπτώσεις που η κινητική ενέργεια στη γεννήτρια μειώνεται ξαφνικά ή είναι πολύ μικρή για να διατηρήσει την ταχύτητα του στροφέα στα επιτρεπτά επίπεδα.

Το κυκλικά επαναλαμβανόμενο φρενάρισμα μειώνει σταδιακά και ελεγχόμενα την ταχύτητα των πτερυγίων. Με αυτόν τον τρόπο, η περιστροφή του στροφέα διατηρείται σε ασφαλή ταχύτητα, ακόμα και στις περιπτώσεις ανέμων υψηλών ταχυτήτων, διατηρώντας ταυτόχρονα, την παραγωγή ενέργειας σε κανονικά επίπεδα.

**5) Άξονας χαμηλών ταχυτήτων (Low – speed shaft):** Ο άξονας χαμηλών ταχυτήτων συνδέει την πλήμνη με το κιβώτιο ταχυτήτων και περιέχει σωλήνες για το υδραυλικό σύστημα ώστε να μπορεί να λειτουργήσει το αεροδυναμικό φρένο. Ο δρομέας στρέφει τον άξονα χαμηλών ταχυτήτων με περίπου 30-60 περιστροφές το λεπτό.

**6) Κιβώτιο ταχυτήτων (Gear box):** Το κιβώτιο ταχυτήτων συνδέει τον άξονα χαμηλής ταχύτητας με τον άξονα υψηλής ταχύτητας και αυξάνει την ταχύτητα περιστροφής από 30 - 60 περιστροφές το λεπτό (rpm) σε 1000 έως 1800 περιστροφές το λεπτό, δηλαδή την ταχύτητα περιστροφής που απαιτείται από τις περισσότερες γεννήτριες για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Το σύστημα μετάδοσης αποτελεί ένα ακριβό και βαρύ δομικό στοιχείο της ανεμογεννήτριας γι' αυτό και γίνονται προσπάθειες για την κατασκευή ανεμογεννητριών «άμεσης ώθησης» (direct – drive), οι οποίες λειτουργούν σε χαμηλότερες ταχύτητες περιστροφής και δεν χρειάζονται κιβώτιο ταχυτήτων.

**7) Γεννήτρια (Generator):** Μπορεί να είναι ασύγχρονη ή σύγχρονη γεννήτρια. Γενικά προτιμούνται οι ασύγχρονες γεννήτριες λόγω της απλότητάς της κατασκευής

τους, αν και οι σύγχρονες έχουν καλύτερη συμπεριφορά σε αδύνατα δίκτυα. Η κατασκευή της περιλαμβάνει το 34% περίπου του συνολικού κόστους της ανεμογεννήτριας.

**8) Ελεγκτής (Controller):** Μια λειτουργία του ελεγκτή είναι να δίνει εντολές στον κινητήρα παρεκτροπής σχετικά με το πόσο και προς τα που να στρέψει την άτρακτο, έτσι ώστε ο δρομέας να βρίσκεται πάντα κόντρα στη ροή του ανέμου. Επίσης ανάλογα με τα δεδομένα που λαμβάνει από το ανεμόπτερο, ενεργοποιεί τη λειτουργία του δρομέα για ταχύτητες ανέμου 4-25 m/s, ενώ για ταχύτητες μεγαλύτερες από 25 m/s σταματά τη λειτουργία του δρομέα, λόγω κινδύνου υπερθέρμανσης της γεννήτριας.

Επιπλέον ο ελεγκτής καταγράφει διάφορες παραμέτρους της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας όπως είναι η τάση, το ρεύμα, η συχνότητα, η θερμοκρασία της άτρακτου και της γεννήτριας, το επίπεδο υδραυλικής πίεσης και το επίπεδο δόνησης. Σε κάθε περίπτωση επιπλοκής, π.χ. υπερθέρμανση του κιβωτίου ταχυτήτων ή της γεννήτριας, σταματά αυτόματα την ανεμογεννήτρια και στέλνει τις ανάλογες ενδείξεις στον υπολογιστή του ελεγκτή της ανεμογεννήτριας.

**9) Ανεμόμετρο (Anemometer):** Υπολογίζει την ταχύτητα του ανέμου και μεταφέρει τα σχετικά δεδομένα της μέτρησης στον ελεγκτή.

**10) Ανεμοδείκτης (Wind vane):** Αποτελεί ένα μηχανισμό που ενημερώνει τον ελεγκτή σχετικά με την κατεύθυνση του ανέμου, ώστε να ενεργοποιηθεί ανάλογα ο μηχανισμός παρεκτροπής.

**11) Άτρακτος (Nacelle):** Η άτρακτος αποτελεί το ογκώδες οριζόντιο τμήμα που είναι τοποθετημένο στην κορυφή του πύργου της ανεμογεννήτριας και στο οποίο εφάπτεται ο στροφέας. Περιέχει όλα τα βασικά στοιχεία της ανεμογεννήτριας, όπως το κιβώτιο ταχυτήτων, την ηλεκτρική γεννήτρια, τους άξονες χαμηλής και υψηλής ταχύτητας, τον ελεγκτή και το φρένο. Μερικές άτρακτοι είναι τόσο μεγάλοι, ώστε ακόμη και ένα ελικόπτερο να μπορεί να προσγειωθεί πάνω τους.

**12) Άξονας υψηλών ταχυτήτων (High – speed shaft):** Ο άξονας υψηλής ταχύτητας συνδέεται μεταξύ του συστήματος μετάδοσης και της γεννήτριας. Το σύστημα μετάδοσης κινεί τον άξονα και αυτός με τη σειρά του κινεί τη γεννήτρια παρέχοντάς

της υψηλή ταχύτητα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Περιστρέφεται με περίπου 1.000 έως 1.800rpm (στροφές ανά λεπτό) και είναι εξοπλισμένος με το δισκόφρενο το οποίο σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης ή περιπτώσεις που το αεροδυναμικό φρένο υποστεί βλάβη ή η ανεμογεννήτρια επισκευάζεται, τίθεται σε λειτουργία.

**13) Οδηγός για την Αποφυγή Εκτροπής (Yaw drive):** Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα σε προσήνεμη διάταξη (upwind) απαιτούν έναν μηχανισμό που να τις τοποθετεί προς την κατεύθυνση του αέρα. Οι μικρές ανεμογεννήτριες έχουν συνήθως μια ουρά που τις περιστρέφει προς την σωστή κατεύθυνση. Οι μεγάλες μηχανές έχουν συνήθως έναν σερβομηχανισμό που τις προσανατολίζει στην κατεύθυνση της μέγιστης αιολικής δύναμης. Ο μηχανισμός περιστροφής και προσανατολισμού, συνεχώς στρέφει την έλικα προς την κατεύθυνση του ανέμου.

**14) Κινητήρας του Οδηγού για την Αποφυγή Εκτροπής (Yaw motor):** Είναι ο κινητήρας που δίνει ενέργεια στον οδηγό για την αποφυγή εκτροπών. Το σύστημα προσανατολισμού είναι ένας σερβοκινητήρας ο οποίος ελέγχεται από τον ανεμοδείκτη του ανεμογράφου και αναγκάζει τον δρομέα να παρακολουθεί την κατεύθυνση του ανέμου και να παραμένει κάθετος σε αυτήν.

**15) Πύργος (Tower):** Ο πύργος υψώνει την ανεμογεννήτρια αρκετά παραπάνω από τη δίνη του αέρα κοντά στο έδαφος και συλλαμβάνει τον αέρα ψηλότερα σε μεγαλύτερες ταχύτητες έτσι δηλαδή αποφεύγεται το φτωχό αιολικό περιεχόμενο σε μικρά ύψη πάνω από το έδαφος. Ο σχεδιασμός των πύργων είναι ιδιαίτερα κρίσιμος, καθώς πρέπει να είναι ψηλός, στιβαρός, να επιτρέπει την πρόσβαση στην ανεμογεννήτρια για τη συντήρησή της, αλλά να μην επιβαρύνει το κόστος του συστήματος.

Ο πύργος είναι το τμήμα της ανεμογεννήτριας πάνω στον οποίο στηρίζεται η άτρακτος και ο δρομέας. Είναι κυλινδρικής μορφής κατασκευασμένος από ατσάλι, ή από ατσάλι σε καφασωτή μορφή, σαν πλέγμα και σπανιότερα από σκυρόδεμα και συνήθως αποτελείται από δύο ή τρία συνδεδεμένα τμήματα. Αυτή η δομή του εξυπηρετεί στην αύξηση της αντοχής και την εξοικονόμηση υλικών. Η θεμελίωση γίνεται με οπλισμένο σκυρόδεμα πάνω στο οποίο τοποθετείται με βίδες ο πύργος. Ο πύργος έχει σχήμα κώνου που εξυπηρετεί την αύξηση της αντοχής και στην

εξοικονόμηση υλικών με τη διάμετρο να αυξάνεται όσο πλησιάζουμε τη βάση. Μεγάλης σημασίας είναι η γείωση που πρέπει να έχει τη μεταλλική κατασκευή της ανεμογεννήτριας.

Οι ταλαντώσεις του και οι περιοδικές καταπονήσεις του που προέρχονται από τις διακυμάνσεις του ανέμου, πρέπει όσο το δυνατό να ελαχιστοποιούνται κατά τη σχεδιάσή του. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να αποφεύγονται συνθήκες συντονισμού. Η σωστή λειτουργία των ανεμογεννητριών συμβαίνει για εύρος θερμοκρασιών από -20oC έως 40oC, έχουν δηλαδή ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας στους -20oC, αυτό σημαίνει ότι πρέπει να προστατεύονται από τη συσσώρευση πάγου, όπου μπορεί να κάνει την λειτουργία του ανεμόμετρου μη ασφαλή και να προκληθεί ζημιά. Κάποιοι κατασκευαστές προσφέρουν κατάλληλο εξοπλισμό για τις συνθήκες αυτές, όπως εσωτερική θέρμανση, που όμως κοστίζουν.

**16) Πλήμνη (Hub):** Η πλήμνη είναι το μηχανικό εξάρτημα στο οποίο προσαρμίζονται τα πτερύγια και κατασκευάζεται από χυτοσίδηρο.

## 2.4 Προστασία ανεμογεννήτριας

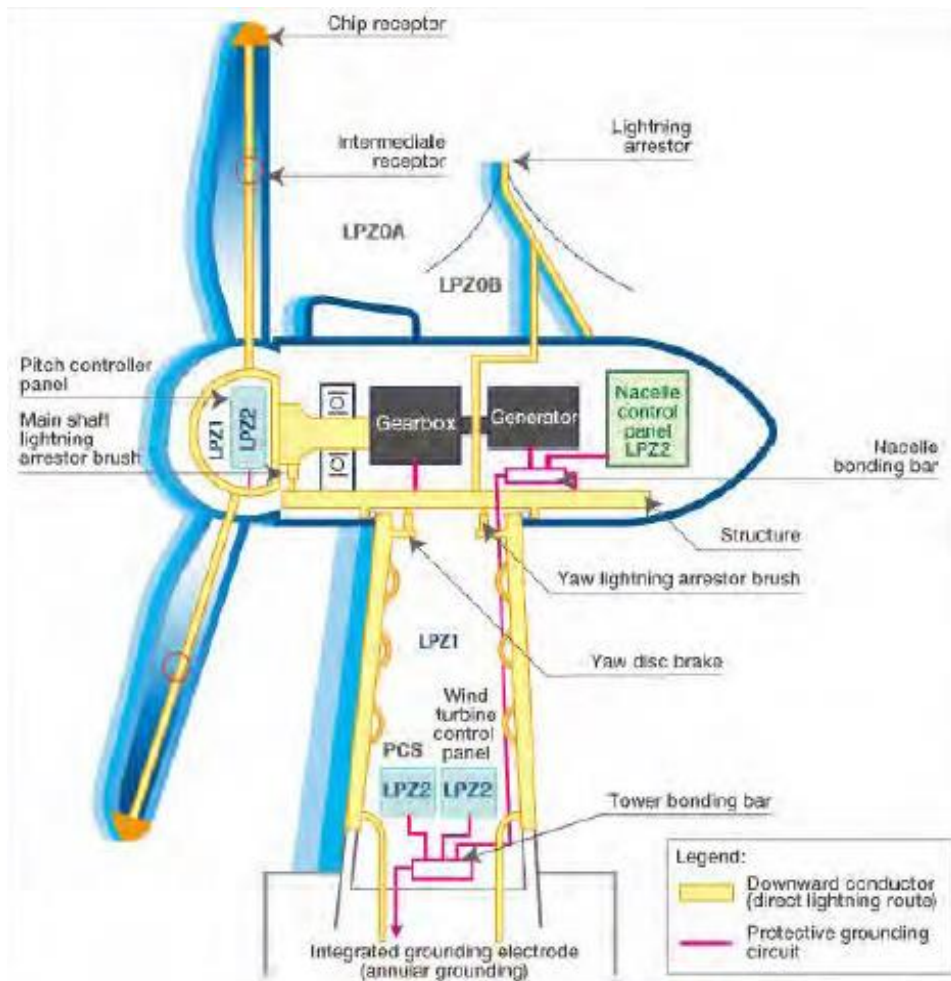
Εξαιτίας του ύψους των ανεμογεννητριών καθώς και της τοποθέτησης τους σε ανοιχτές περιοχές, είναι μεγάλη η πιθανότητα να βρεθούν εκτεθειμένες σε φυσικά φαινόμενα, όπως κεραυνικά πλήγματα. Ο κίνδυνος να πληγεί από κεραυνό μια κατασκευή αυξάνει γραμμικά με το ύψος της, κατά συνέπεια οι Α/Γ είναι κατασκευές οι οποίες χρήζουν ιδιαίτερης μέριμνας όσον αφορά την προστασία τους προκειμένου να αποφευχθεί η καταστροφή τόσο των εξωτερικών μερών της ανεμογεννήτριας όσο και των εσωτερικών της ατράκτου.

Η πορεία ενός πιθανού πλήγματος από κεραυνό σε μια ανεμογεννήτρια πάει ως εξής: όταν ο κεραυνός πλήξει τα πτερύγια το ρεύμα διασχίζει όλη την κατασκευή και οδηγείται στο έδαφος. Πιο συγκεκριμένα το ρεύμα περνά μέσα από το πτερύγιο και από τα ρουλεμάν βήματος του πτερυγίου και οδηγείται στην πλήμνη και στον κύριο άξονα. Μετά μέσω του ρουλεμάν του κύριου άξονα κατευθύνεται προς την άτρακτο και τέλος μέσω του μηχανισμού εκτροπής (yaw system) εισέρχεται στον πύργο και καταλήγει στο έδαφος μέσω της βάσης.

Η αντικεραυνική προστασία των ανεμογεννητριών παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες, με σημαντικότερη την προστασία των περιστρεφόμενων πτερυγίων. Τα

κεραυνικά πλήγματα επηρεάζουν αρχικά τα συστήματα ελέγχου, στη συνέχεια τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά συστήματα και τελευταία τα πτερύγια και τους αισθητήρες. Τα μηχανικά τμήματα, όπως τα συστήματα πέδησης (αν υπάρχουν) τα μηχανικά φρένα και η ηλεκτρική γεννήτρια δεν επηρεάζονται σε υψηλό βαθμό. Είναι φανερό λοιπόν ότι για λόγους αξιοπιστίας, καθότι ύστερα από κάποιο πλήγμα τίθεται εκτός λειτουργίας η ανεμογεννήτρια με ό,τι αυτό συνεπάγεται για την παραγωγή της, μα και οικονομικούς μιας και ο εν λόγω εξοπλισμός είναι αρκετά ακριβός, πρέπει να συμπεριληφθεί στην μελέτη της κατασκευής κάποια διάταξη προστασίας. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει απολύτως ασφαλής αντικεραυνική προστασία, πολλοί κατασκευαστές ανεμογεννητριών σχεδιάζουν συστήματα τα οποία είναι όσο το δυνατόν αξιόπιστα και ελαχιστοποιούν τις βλάβες από ενδεχόμενους κεραυνούς.

Εν γένει η προστασία που προτείνεται πρέπει να διαχωριστεί σε δύο κομμάτια, εσωτερικά και εξωτερικά της ανεμογεννήτριας. Η εξωτερική προστασία αποτελείται από τα συστήματα των συλλεκτηρίων αγωγών καθώς και από τους αγωγούς καθόδου. Η εσωτερική προστασία αποτελείται από το ισοδύναμο δυναμικό και την προστασία υπέρτασης. Το ισοδύναμο δυναμικό και η προστασία υπέρτασης είναι τα πιο σημαντικά μέτρα στην προστασία των ηλεκτρονικών και των συστημάτων ελέγχου της ανεμογεννήτριας. Ένα σημαντικό βήμα για τον σχεδιασμό της αντικεραυνικής προστασίας, είναι ο χωρισμός της ανεμογεννήτριας σε ζώνες. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται συστηματική και αποτελεσματική προστασία όλων των στοιχείων της ανεμογεννήτριας. Οι ζώνες αντικεραυνικής προστασίας (LPZ) ορίζονται ανάλογα με το αν είναι πιθανή μια άμεση πτώση κεραυνού, εξαρτάται από το μέγεθος του κεραυνικού ρεύματος και του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που αναμένεται στη ζώνη αυτή, ενώ πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και η αρχιτεκτονική της κατασκευής της ανεμογεννήτριας.



Εικόνα 2.6: Ζώνες αντικεραυνικής προστασίας ανεμογεννήτριας.

|        |   |
|--------|---|
| LPZ 0A | Στοιχεία εκτεθειμένα σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα, πλήρες ρεύμα κεραυνού, ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο            |
| LPZ 0B | Στοιχεία μη εκτεθειμένα σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα, πλήρες ρεύμα κεραυνού, ισχυρό ηλεκτρομαγνητικό πεδίο         |
| LPZ 1  | Στοιχεία μη εκτεθειμένα σε άμεσο κεραυνικό πλήγμα, μειωμένο ρεύμα κεραυνού, εξασθενημένο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο |
| LPZ 2  | Ακόμη πιο μειωμένο ρεύμα κεραυνού, ακόμη πιο εξασθενημένο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο                                |

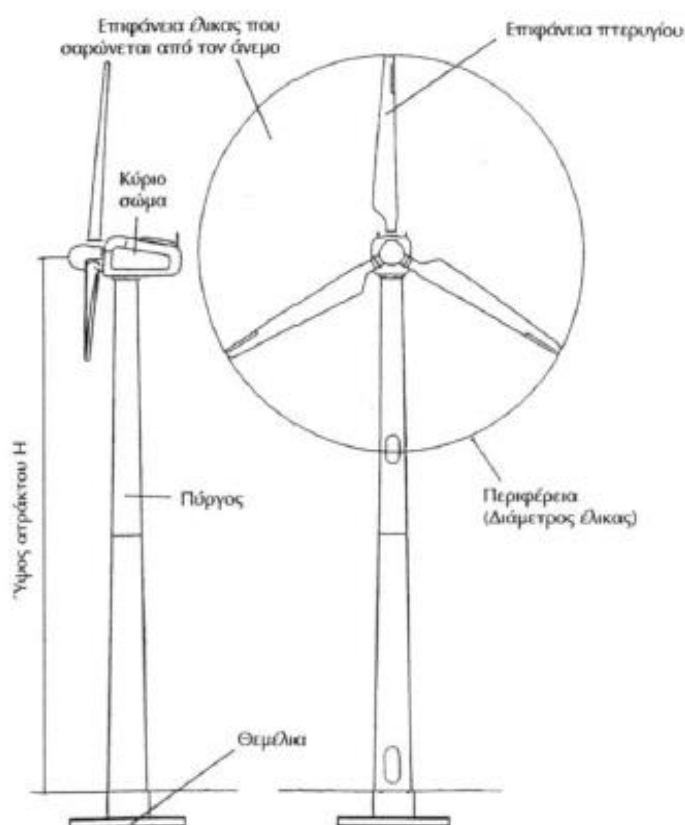
Πίνακας 2..1: Ζώνες αντικεραυνικής προστασίας ανεμογεννήτριας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΥΡΙΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

### 3.1 Σχεδιασμός κύριων στοιχείων

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγράψουμε την διάταξη και τα κύρια εξαρτήματα μιας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα περιστροφής για ηλεκτροπαραγωγή, και τις κυριότερες αρχές που σχετίζονται με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά μιας μόνο ανεμογεννήτρια, καθώς και μιας ομάδας ανεμογεννητριών που συνιστούν έναν αιολικό σταθμό ή αιολικό πάρκο ή φάρμα ηλεκτροπαραγωγής.

Η γενική διάταξη μιας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα περιστροφής φαίνεται στην εικόνα 3.1. Η ενέργεια που παίρνουμε από τον άνεμο μέσω μιας έλικας χρησιμοποιείται είτε απ' ευθείας σαν μηχανική ενέργεια, όπως π.χ. για την κίνηση μιας υδραντλίας, είτε μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω ηλεκτρογεννήτριας.



Εικόνα 3.1: Κύρια εξαρτήματα ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα.

Οι ακόλουθοι παράμετροι χρησιμοποιούνται συνήθως για τον προσδιορισμό της ανεμογεννήτριας:



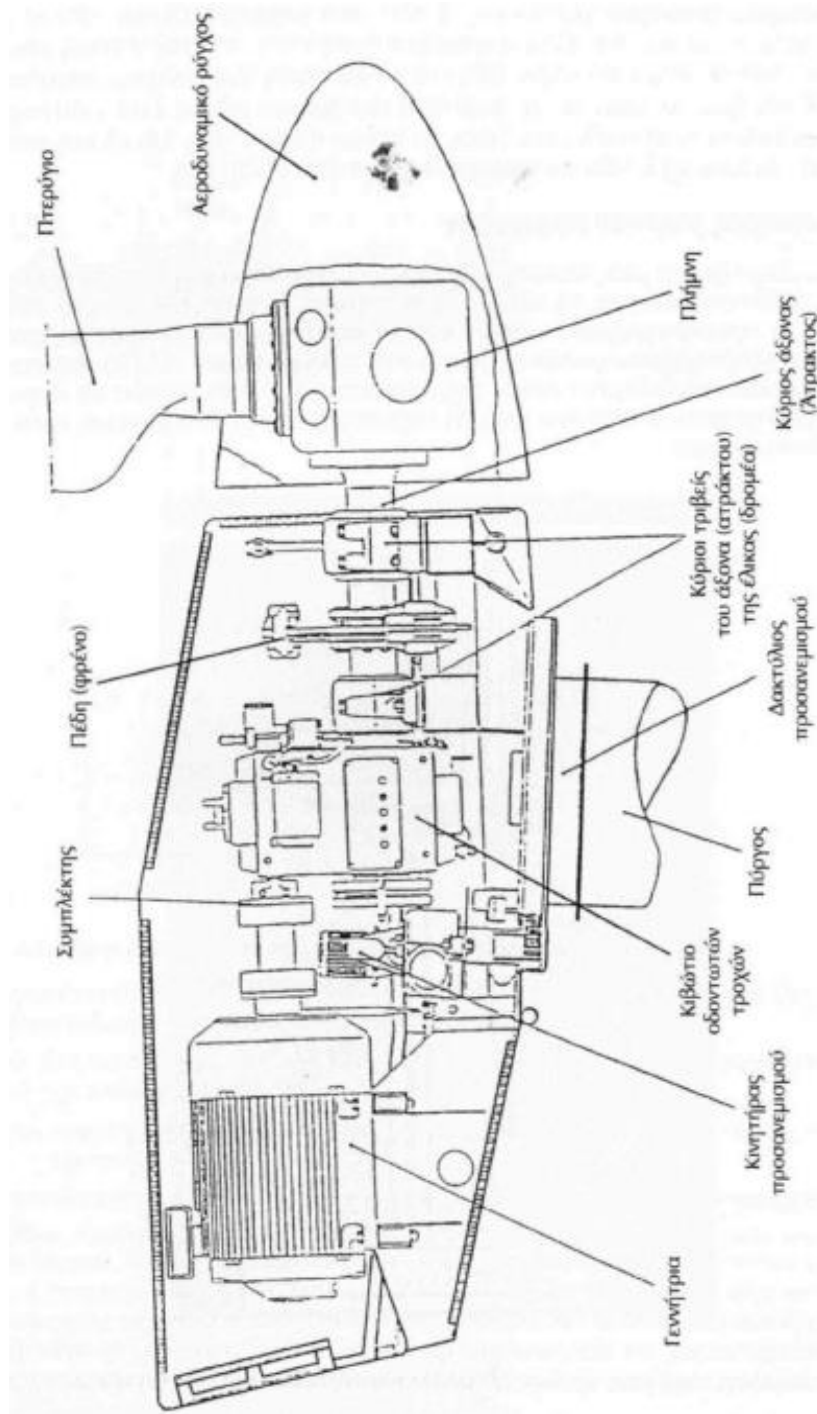
1. Ύψος ατράκτου: βασικά το ύψος του άξονα περιστροφής της έλικας πάνω από την επιφάνεια του εδάφους.
2. Επιφάνεια σαρώσεως: η επιφάνεια που καλύπτει η περιστρεφόμενη έλικα και που σαρώνεται από τον άνεμο (επιφάνεια κύκλου).
3. Στερεότητα: ο λόγος του αθροίσματος της επιφάνειας κάθε πτερυγίου της έλικας προς την επιφάνεια σαρώσεως.
4. Λόγος ταχύτητας ακραίου σημείου: ο λόγος (το πηλίκων) της ταχύτητας του άκρου του πτερυγίου προς την ταχύτητα του ανέμου.
5. Εκτιμητέα ισχύς: η μέγιστη συνεχής ισχύς εξόδου στο σημείο ηλεκτρικής σύνδεσης.

Ακολουθώς περιγράφονται τα κύρια εξαρτήματα μιας ανεμογεννήτριας που συνδέεται στο δίκτυο. Όταν περισσότερες από μία ανεμογεννήτριες συνιστούν σταθμό ή πάρκο, η εκτιμητέα ισχύς τους μπορεί να ανέρχεται σε 200 - 750 ή περισσότερα kW και η διάμετρος των ελίκων τους μπορεί να φτάνει τα 25 - 50 m. Εμπορικά πρωτότυπα έως 1.5 MW είναι ακόμα υπό δοκιμή στην Ευρώπη και τα χαρακτηριστικά τους περιγράφονται από τον Hau και άλλους (1993).

Μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες έως 4 MW και διάμετρο έλικας 100 m έχουν κατασκευαστεί πειραματικά αλλά η απόδοση τους ήταν απογοητευτική. Φαίνεται λοιπόν ότι τόσο η εκτιμητέα ισχύς όσο και η διάμετρος των ανεμογεννητριών του εμπορίου θα αυξάνεται αργά με το πέρασμα του χρόνου μέχρις ότου επιτευχθεί το οικονομικώς βέλτιστο αποτέλεσμα. Προς το παρόν η διάμετρος της έλικας που δίνει τη βέλτιστη οικονομική απόδοση παραμένει θέμα υπό συζήτηση.

Τα βασικά εξαρτήματα μιας ανεμογεννήτριας ηλεκτροπαραγωγής είναι η έλικα, το σύστημα μετάδοσης κίνησης (ή κιβώτιο ταχυτήτων), η γεννήτρια και το σύστημα απόκλισης (ή προσανεμισμού), καθώς και το σύστημα ελέγχου της μηχανής. Η σύνδεση των εξαρτημάτων αυτών φαίνεται στην εικόνα 3.2.

Τα περισσότερα εξαρτήματα είναι συνδεδεμένα εντός της ατράκτου, η οποία μπορεί να στρέφεται σύμφωνα με την κατεύθυνση του ανέμου (προσανεμισμός). Η άτρακτος είναι εξαρτημένη πάνω σε πύργο.



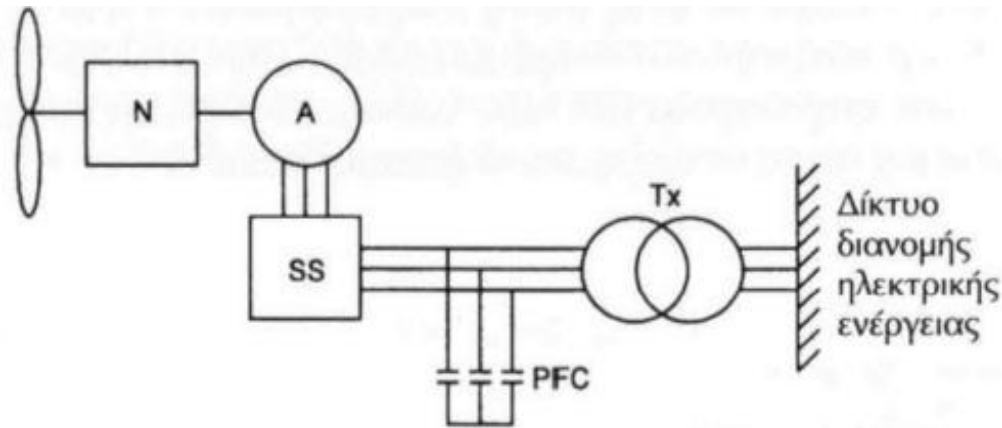
Εικόνα 3.2: Διαμήκης τομή ατράκτου ανεμογεννήτριας.

Το ηλεκτρικό σύστημα λειτουργεί εντός των ορίων των παραμέτρων τάσης, συχνότητας και περιεχομένου αρμονικών συχνοτήτων. Το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες δεν κάνει συνήθως παρεμβολές στο υπόλοιπο τοπικό δίκτυο διανομής μιας πόλης ή ενός χωριού, για παράδειγμα.

Οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται περισσότερο ως πηγές ενέργειας παρά ως συσκευές ελέγχου διατήρησης ποιότητας της παρεχομένης στο δίκτυο ισχύος.

Πάντως, σε πολλές εγκαταστάσεις απαιτούνται προσεκτικοί υπολογισμοί για να μην υποβιβαστεί η ποιότητα της παρεχόμενης ισχύος στο τοπικό δίκτυο.

Συνηθίζεται όμως, να συνδέεται η έξοδος της ανεμογεννήτριας απ' ευθείας στο τοπικό δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 3.3: Σχηματικό διάγραμμα ανεμογεννήτριας σταθερής ταχύτητας περιστροφής: N = κιβώτιο οδοντωτών τροχών μετάδοσης κίνησης, A = ασύγχρονη επαγωγική ηλεκτρογεννήτρια, SS = εκκινητής, PFC = διορθώση συντελεστή ισχύος, Tx = μετασχηματιστής.

Χρησιμοποιείται συνήθως ασύγχρονη επαγωγική τριφασική γεννήτρια πολικής τάσης 690 V. Στη βάση κάθε πύργου υπάρχει μετασχηματιστής που αυξάνει την τάση π.χ. στα 10 kV για σύνδεση στο δίκτυο διανομής. Λόγω των χαρακτηριστικών της γεννήτριας χρησιμοποιείται εκκινητής για σύνδεση στο δίκτυο, καθώς και πυκνωτές για τη βελτίωση του συντελεστή ισχύος.

Ο εκκινητής, οι πυκνωτές, ο πίνακας σύνδεσης στο δίκτυο μαζί με τους διακόπτες, καθώς και το σύστημα ελέγχου περικλείονται σε θαλαμίσκο που βρίσκεται στη βάση του πύργου. Η γεννήτρια λειτουργεί με σταθερή ταχύτητα περιστροφής, που ορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου διανομής π.χ. 50 Hz.

Για το σκοπό αυτό υπάρχει το κιβώτιο αυτόματης αλλαγής ταχυτήτων δι' οδοντωτών τροχών, οπότε, έστω και αν η έλικα αλλάξει ταχύτητα περιστροφής λόγω αλλαγής εντάσεως ανέμου, η γεννήτρια και πάλι θα περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα. Αυτό βέβαια σημαίνει ότι ο στρόβιλος δεν αποδίδει όλη την ενέργεια του ανέμου στη γεννήτρια, κυρίως όταν η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται. Κατά τα πρώτα στάδια εξέλιξης της ανεμογεννήτριας είχαν χρησιμοποιηθεί δύο γεννήτριες που κινούνταν από τον ίδιο άξονα (της έλικας).

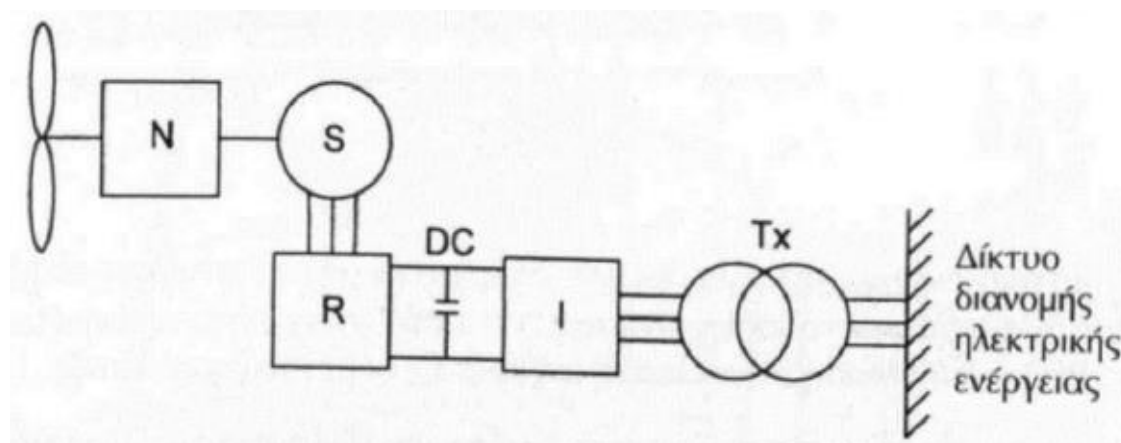
Η μία γεννήτρια λειτουργούσε με χαμηλή ταχύτητα περιστροφής και η άλλη με υψηλή ταχύτητα. Όταν ο άνεμος έπνεε με μεγάλη ταχύτητα αποσυνδέετε η γεννήτρια

χαμηλής ταχύτητας και συνδέετε στο δίκτυο διανομής η άλλη και αντίστροφα. Αργότερα χρησιμοποιήθηκε μία γεννήτρια με δυο επαγωγικά τυλίγματα πηνίων, για μικρή και μεγάλη ταχύτητα περιστροφής. Η λειτουργία με δύο ταχύτητες περιστροφής δεν αύξησε και πολύ την ετήσια ισχύ εξόδου. Πάντως, το πλεονέκτημα που έχουν οι μικρές ταχύτητες ανέμου είναι το ότι η ταχύτητα περιστροφής του ακραίου σημείου του πτερυγίου μιας έλικας είναι μικρή, οπότε ανάλογα μικρός είναι και ο αεροδυναμικός θόρυβος.

Κατά τις σύγχρονες εξελίξεις των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων ισχύος, η λειτουργία της ανεμογεννήτριας σε μεταβλητές ταχύτητες ανέμου είναι πρακτικά εφικτή και οικονομικά συμφέρουσα σε ορισμένες περιπτώσεις. Στην εικόνα 3.4. φαίνεται μια τεχνολογική προσέγγιση για λειτουργία σε μεταβαλλόμενες ταχύτητες.

Επειδή η τεχνολογία αυτή βρίσκεται ακόμα σε εξέλιξη, υπάρχουν πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις. Στην Εικόνα αυτή φαίνεται η ζεύξη του άξονα της έλικας με τον άξονα περιστροφής της γεννήτριας μέσω κιβωτίου ταχυτήτων. Η μονάδα ανόρθωσης του τριφασικού εναλλασσομένου ρεύματος σε συνεχές (DC), βρίσκεται στη βάση του πύργου.

Στον ίδιο θαλαμίσκο (στη βάση του πύργου) υπάρχει και μια μονάδα μετατροπείας (I) που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα (DC) σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) σταθερής τάσης και συχνότητας (50 Hz), καθώς και ένας μετασχηματιστής που ανεβάζει την τάση για να τη συνδέσει με το δίκτυο διανομής.



Εικόνα 3.4: Σχηματικό διάγραμμα ανεμογεννήτριας για λειτουργία σε μεταβλητές ταχύτητες: N = κιβώτιο ταχυτήτων, S = σύγχρονη γεννήτρια, R = ανορθωτής, I = μετατροπείας, Tx= μετασχηματιστής.

Η βασική αρχή λειτουργίας συνίσταται στη μετατροπή του εναλλασσομένου ρεύματος που παράγει η γεννήτρια σε συνεχές, και, στη συνέχεια, στη μετατροπή του

συνεχούς ρεύματος πάλι σε εναλλασσόμενο, αλλά σταθερής πολικής τάσης και συχνότητας εναλλαγής, έστω και αν η γεννήτρια περιστρέφεται με μεταβαλλόμενη συχνότητα, λόγω μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου. Στην αρχή χρησιμοποιούνται θύριστορ ως διακόπτες γι' αυτή τη μετατροπή, όμως αυτά παρήγαγαν αρμονικές συχνότητες και αρκετή παραμόρφωση στη μορφή της τάσης του εναλλασσομένου ρεύματος.

Σήμερα χρησιμοποιούνται τρανζίστορ ισχύος που λειτουργούν ταχύτερα και παράγουν εναλλασσόμενη τάση σχεδόν ημιτονοειδή με πολύ λιγότερες αρμονικές συχνότητες.

### **3.2 Η έλικα**

Οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται σε σταθμούς (αιολικά πάρκα) παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν συνήθως δύο ή τρία πτερύγια και ταχύτητα άκρου του πτερυγίου από 50 έως 70 m/s. Με αυτές τις ταχύτητες του ακραίου σημείου του πτερυγίου, μια έλικα τριών πτερυγίων δίνει την καλύτερη απόδοση, αν και οι έλικες με δύο πτερύγια αποδίδουν 2 - 3% λιγότερο.

Είναι επίσης δυνατόν να υπάρχει ένα πτερύγιο με αντίβαρο, για ζυγοστάθμιση, ως έλικα, με απόδοση 6% μικρότερη αυτής των δυο πτερυγίων. Οι έλικες με λιγότερα πτερύγια περιστρέφονται πιο γρήγορα, οπότε ο θόρυβος από την τύρβη στο ρύγχος και τη διάβρωση είναι τα πιο εμφανή προβλήματα.

Επίσης οι κραδασμοί στον άξονα της έλικας αυξάνονται όταν έχουμε λιγότερα πτερύγια. Για το λόγο αυτό η κατασκευή ενός τέτοιου άξονα έλικας επιτρέπει λίγες μοίρες απόκλιση γύρω από τον οριζόντιο άξονα περιστροφής. Έτσι, η φόρτιση των πτερυγίων της έλικας, που οφείλεται σε θύελλες και μεγάλες αλλαγές στην ένταση του ανέμου, ελαττώνεται. Πάντως στις έλικες με τρία πτερύγια οι δυνάμεις φόρτισης διαμοιράζονται κατά τον καλύτερο τρόπο και η έλικα φαίνεται αισθητικά ωραιότερη.

Στην κατασκευή των πτερυγίων της έλικας χρησιμοποιείται πλαστικό ενισχυμένο με ίνες γυαλιού [GRP], καθώς και ράβδοι ξύλου με πανί, πλαστικό ενισχυμένο με ίνες άνθρακα [CFRP], ή και κράμα χάλυβα με αργίλιο (αλουμίνιο). Για έλικες διαμέτρου μικρότερης των 5 m χρησιμοποιούνται υλικά με κριτήριο της αποδοτική μαζική παραγωγή και όχι τα ζητήματα βάρους, δυσκαμψίας ή άλλων ειδικών χαρακτηριστικών της έλικας.

Τα πτερύγια έλικας για μεγάλες ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται από GRP, και στις περισσότερες περιπτώσεις η επίστρωση με ρητίνες πολυεστέρα γίνεται με το χέρι, όπως ακριβώς και στα κήτη μικρών θαλασσίων σκαφών. Η εργασία αυτή δεν απαιτεί εξειδικευμένο εργατικό προσωπικό και για πτερύγια μήκους μικρότερου των 20 m δεν υπάρχει ανησυχία για υπερβολικό βάρος και στερεότητα κατά τη σχεδίαση και κατασκευή. Βέβαια, υπάρχουν και πολυπλοκότεροι τρόποι χρησιμοποίησης των GRP, οι οποίοι ελαττώνουν το βάρος και αυξάνουν τη στερεότητα, αλλά δεν μπορούν να αναφερθούν με λεπτομέρεια εδώ. Για παράδειγμα, οι ίνες γυαλιού τοποθετούνται με πιο ακριβή τρόπο επί προδιογκωμένων φύλλων, με χρήση εποξικής ρητίνης υψηλότερης απόδοσης και πήξης σε ορισμένη ελεγχόμενη θερμοκρασία. Προς το παρόν φαίνεται ότι το άπλωμα του πολυεστέρα με το χέρι, και η προσεκτική επιλογή της τοποθέτησης των ινών, προσφέρει μια λύση χαμηλού κόστους για πτερύγια GRP μεγάλου μήκους.

Το ξύλο συνέβαλε πολύ σαν υλικό κατασκευής των πρώτων ανεμόμυλων. Έχει μικρό βάρος, είναι φτηνό και έχει μεγάλη αντοχή. Όμως διαβρώνεται εύκολα και έχει μεγάλο κόστος κατεργασίας. Χρησιμοποιείται όμως μια τεχνική με "ψυχρή επίστρωση" που προσδίδει ορισμένα πλεονεκτήματα. Φύλλα ξύλου επιστρώνονται με εποξική ρητίνη και συμπιέζονται για να σχηματίσουν τη μορφή του πτερυγίου. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται και για την κατασκευή μεγαλύτερων πτερυγίων. Τα πτερύγια από CFRP κατασκευάστηκαν μέχρι τώρα σε μικρές ποσότητες ως πειραματικά πρωτότυπα. Το υλικό αυτό έχει το ελάχιστο βάρος και μεγάλη ακαμψία, αλλά κοστίζει ακριβά. Υπήρχε η ελπίδα ότι τα υλικά από ίνες άνθρακα θα ήταν φθηνότερα, όμως αυτό μέχρι στιγμής δε συμβαίνει, αντίθετα, η τιμή τους αυξάνεται σταθερά.

Υπήρχε και η σκέψη να χρησιμοποιηθεί και ο χάλυβας στα πτερύγια, όμως ο λόγος αντοχής στην κόπωση προς το βάρος του υλικού αυτού είναι μικρός και η αυτεπαγόμενη κόπωση λόγω βάρους, μεγάλη. Το αλουμίνιο χρησιμοποιήθηκε σε πειραματικές κατασκευές πτερυγίων χωρίς μεγάλη επιτυχία, εφ' όσον η αντοχή του σε κοπώσεις είναι πολύ μικρότερη αυτής του χάλυβα.



ταχυτήτων και διευθύνσεων των ανέμων που ανθίσταται ένα πτερύγιο έλικας συγχέει κάθε διάκριση. Πάντως, στην επιλογή ενός καλού πτερυγίου, που θα βελτιώσει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση της μηχανής, συμβάλλουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- μεγάλη τιμή λόγου άνωσης (L) προς αντίσταση (D) [L/D] για απόδοση ευρείας κλίμακας
- καλά χαρακτηριστικά πέδησης
- αντοχή σε κακομεταχείριση από καιρικές συνθήκες
- χαμηλή παραγωγή θορύβου

Επιπλέον το σχήμα του πτερυγίου πρέπει να είναι συμβατό με τη διαδικασία παραγωγής, αν και με την τεχνική της ψυχρής επίστρωσης δεν υφίστανται περιορισμοί. Επίσης η αεροτομή του πτερυγίου πρέπει να αφήνει αρκετό χώρο για την εντός αυτού κατασκευή ώστε αυτή να ανθίσταται στα φορτία κόπωσης που το ίδιο το πτερύγιο αναπτύσσει.

Πρόσφατα, κατασκευάστηκαν πτερύγια βασισμένα σε νέα σχέδια αεροτομών, που όμως δεν απέδωσαν αρκετά για να δικαιολογήσουν τις επενδύσεις σε έρευνα, ανάπτυξη, εργαλεία και ανθρώπινο δυναμικό, οπότε οι επενδυτές τείνουν να είναι συντηρητικοί επιλέγοντας παλιότερα σχέδια που αποδεδειγμένα απέδωσαν καλύτερα, όπως π.χ. τα NACA 632XX, NACA 634 XX και το NASA LS - 104 XX. Τα πτερύγια τείνουν να έχουν αεροτομές με αυξημένη ανύψωση κοντά στη ρίζα, που μειώνεται βαθμηδόν καθώς φτάνει στο άκρο του πτερυγίου.

Αυτό καθορίζει το γενικό σχήμα του πτερυγίου. Τα σημερινά πτερύγια έχουν ρίζα κυκλικής διατομής. Η διατομή αλλάζει βαθμηδόν σε παχύτερη αεροτομή που στο μεγαλύτερο μήκος της χορδής του έχει ακτίνα που αντιστοιχεί στο 20 με 30% της αρχικής διατομής στη ρίζα. Η αεροτομή βαθμηδόν σμικρύνεται και περιστρέφεται καθώς φτάνει στο άκρο του πτερυγίου.

Η σμίκρυνση, η περιστροφή και όλα τα χαρακτηριστικά της αεροτομής συνδυάζονται έτσι ώστε να λαμβάνεται η μεγαλύτερη δυνατή ενέργεια από τον άνεμο ανάλογα με τις επικρατούσες εκάστοτε τοπικές συνθήκες. Υπάρχουν εμπορικά προγράμματα που μπορούν να προβλέψουν την απόδοση, αν και η απόδοση που αφορά στην πέδηση δεν έχει κατανοηθεί πλήρως, οπότε οι προβλέψεις εδώ βασίζονται σε εμπειρικά δεδομένα. Η αβεβαιότητα κατ' αυτή την πρόβλεψη είναι ακόμα ένας λόγος που η επιλογή της κατάλληλης αεροτομής είναι ακόμα δύσκολη και περιορισμένη.



Η έλικα (και συνεπώς η άτρακτος της ανεμογεννήτριας), μπορεί να εγκατασταθεί επί του πύργου στήριξης κατά δυο τρόπους, ως προς το μέτωπο του ανέμου κατά την πλώρη ή κατά την πρύμνη της ατράκτου. Κατά την πλώρη ο άνεμος αντιμετωπίζει πρώτα την έλικα, κατόπιν τον πύργο στήριξης και τέλος την ουρά (την πρύμνη) της ατράκτου. Στην κατά πρύμνη εγκατάσταση ο άνεμος αντιμετωπίζει πρώτα την ουρά της ατράκτου, κατόπιν τον πύργο στήριξης και τέλος την έλικα. Στην κατά πρύμνη εγκατάσταση ο πύργος αφήνει πίσω του μια "σκιά" της οποίας η τύρβη προκαλεί στην έλικα αυξημένο θόρυβο και κυκλικά (περιφερειακά) φορτία δυνάμεων. Για το λόγο αυτό τα πτερύγια της έλικας έχουν μια κλίση που σχηματίζει κωνική χοάνη της οποίας η βάση απομακρύνεται από τον πύργο στήριξης.

Στην κατά πρύμνη εγκατάσταση ο άνεμος προσανατολίζει ο ίδιος την έλικα της ατράκτου, οπότε δε χρειάζεται μηχανισμός προσανατολισμού παρά μόνο ένας δακτύλιος στην κορυφή του πύργου στήριξης που επιτρέπει την περιστροφή και έτσι τον προσανατολισμό της ατράκτου ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου. Η κατά πρύμνη εγκατάσταση δε συνηθίζεται τόσο όσο η κατά πλώρη εγκατάσταση και η εν γένει σχεδίαση ανεμογεννητριών.

Όπως αναφέραμε, η ταχύτητα περιστροφής της έλικας ρυθμίζεται με ορισμένους τρόπους:

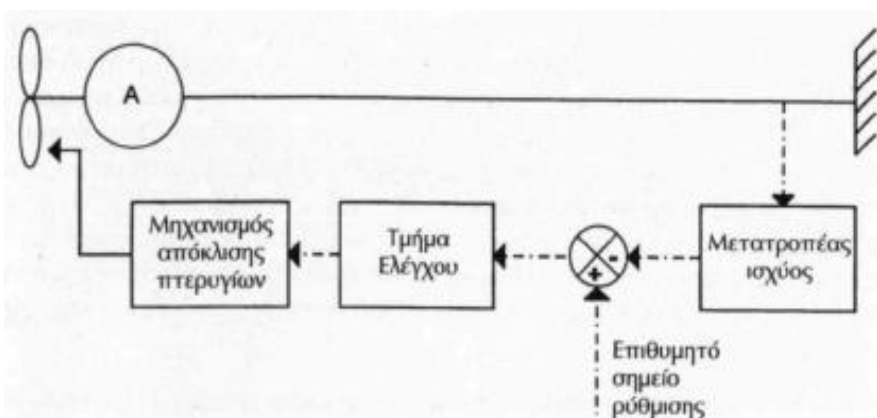
Στη ρύθμιση με πέδηση, η κατανομή της γωνίας πρόσπτωσης κατά μήκος του πτερυγίου της έλικας είναι σταθερή για όλες τις ταχύτητες του ανέμου. Η γωνία πρόσπτωσης πάνω στο πτερύγιο αυξάνεται όταν ο άνεμος έχει μεγάλη ταχύτητα. Οι δυνάμεις άνωσης ελαττώνονται λόγω πέδησης, οι δυνάμεις αεροδυναμικής αντίστασης αυξάνονται και έτσι η ισχύς εξόδου δεν αυξάνεται. Η αύξηση της αντίστασης προκαλεί ανάπτυξη μεγάλης έντασης δυνάμεων πάνω στην έλικα. Όμως η ρύθμιση μέσω πέδησης είναι απλή και δε χρειάζεται έτσι κάποιο σύστημα ελέγχου. Βέβαια η σχεδίαση έλικας για να αυτορυθμίζεται μέσω πέδησης είναι αρκετά δύσκολη, γι' αυτό η έρευνα στον τομέα αυτό ακόμα συνεχίζεται και ιδιαίτερα στον τρισδιάστατο χώρο αναπαράστασης των δυνάμεων πέδησης γύρω από την αεροτομή του όλου πτερυγίου.

Στη ρύθμιση της ισχύος εξόδου με αντίστοιχη ρύθμιση της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου επί των πτερυγίων, χρησιμοποιείται σύστημα ελέγχου, που είναι μεν πιο ακριβό αλλά και αρκετά αποδοτικότερο από τη ρύθμιση με ιδιαίτερο σύστημα πέδησης. Όταν αυξάνει η ταχύτητα του ανέμου, κάθε πτερύγιο της έλικας στρέφεται ανάλογα γύρω από τον ακτινικό άξονα του, με συνέπεια να ελαττώνεται η γωνία

πρόσπτωσης του ανέμου πάνω σε κάθε πτερυγίο. Έτσι ελαττώνονται οι στροφές της έλικας και η ισχύς εξόδου της γεννήτριας στην επιθυμητή εκτιμητέα ισχύ. Σε ορισμένες κατασκευές στρέφεται μόνο ένα τμήμα κάθε πτερυγίου της έλικας. Με αυτό το σύστημα ελέγχου ελαττώνεται το αεροδυναμικό φορτίο που ασκείται πάνω στην έλικα. Στο σχήμα παρακάτω φαίνεται το διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος ελέγχου.

Η ηλεκτρική ισχύς που παράγεται από τη γεννήτρια μετριέται με βατόμετρο που υπάρχει στο θαλαμίσκο, στη βάση του πύργου στήριξης. Η ισχύς αυτή συγκρίνεται με αυτή του επιθυμητού σημείου ρύθμισης (την εκτιμητέα ισχύ της γεννήτριας), οπότε το προκύπτον σήμα διαφοράς αποστέλλεται στη μονάδα ελέγχου. Από εκεί, μέσω ενός αλγορίθμου ελέγχου, αποστέλλεται το ανάλογο σήμα στο μηχανισμό απόκλισης των πτερυγίων.

Οι μηχανισμοί απόκλισης μπορεί να είναι υδραυλικού ή ηλεκτρομηχανικού τύπου, αλλά και διαφόρων άλλων τύπων. Αυτό το σύστημα ελέγχου λειτουργεί και ρυθμίζει συνεχώς τη γωνία πρόσπτωσης, αλλά υπάρχουν και ορισμένες πρακτικές δυσκολίες.



Εικόνα 3.6: Σύστημα ελέγχου ρύθμισης γωνίας πρόσπτωσης.

Κατά τη διάρκεια θυελλωδών ανέμων παράγονται εξάρσεις ισχύος τύπου "δέλτα" που υπερβαίνουν κατά πολύ το όριο ρύθμισης, τότε δε είναι αρκετά δύσκολη η ανάλογη ρύθμιση της απόκλισης των πτερυγίων που απαιτείται για διόρθωση.

Ένα άλλο σύστημα ελέγχου της ανεμογεννήτριας είναι το σύστημα ελέγχου προσανεμισμού ή απόκλισης όλης της ατράκτου. Με αυτό το σύστημα ο άξονας περιστροφής της έλικας μπορεί να αποκλίνει οριζόντια ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου. Ορισμένες ανεμαντλίες χρησιμοποιούν παθητικά συστήματα προσανεμισμού, όμως οι ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούν συνήθως ενεργά συστήματα.

### 3.3 Σύστημα μετάδοσης περιστροφικής κίνησης

Η μηχανική ισχύς που παράγεται από τα πτερύγια της έλικας μεταδίδεται στη γεννήτρια με ένα σύστημα μετάδοσης που βρίσκεται μέσα στο κύριο σώμα της ανεμογεννήτριας. Αυτό αποτελείται από ένα κιβώτιο ταχυτήτων και μερικές φορές και από έναν συμπλέκτη καθώς και από σύστημα τροχοπέδησης που μπορεί να σταματήσει την έλικα σε περίπτωση ανάγκης όταν η ανεμογεννήτρια δε λειτουργεί.

Το κιβώτιο ταχυτήτων (εξ οδοντωτών τροχών) αυξάνει το ρυθμό περιστροφής της έλικας από 20 με 50 στροφές ανά λεπτό [rpm], σε 1.000 με 1.500 rpm που απαιτούνται για το ρυθμό περιστροφής του άξονα των περισσότερων τύπων ηλεκτρογεννητριών. Σε απλό κιβώτιο ο άξονας της έλικας και ο άξονας του δρομέα της ηλεκτρογεννήτριας ζευγνύονται παράλληλα, ενώ στα πιο ακριβά κιβώτια οι άξονες αυτοί ζευγνύονται σε σειρά, για μεγαλύτερη στερεότητα. Το σύστημα μετάδοσης πρέπει να είναι σχεδιασμένο για να αντέχει μεγάλα δυναμικά φορτία ροπής που οφείλονται στη διακύμανση της ισχύος εξόδου της έλικας.

Ορισμένοι σχεδιαστές αποπειράθηκαν να ελέγξουν αυτά τα δυναμικά φορτία προσθέτοντας μηχανική αδράνεια και απόσβεση μεταξύ των οδοντωτών τροχών του κιβωτίου. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για μεγάλες ανεμογεννήτριες, όπου τα δυναμικά φορτία είναι μεγάλα και οι γεννήτριες παρέχουν σχετικά πολύ μικρή απόσβεση.

### 3.4 Η γεννήτρια

Κάθε ανεμογεννήτρια που συνδέεται στο δίκτυο παροχής κινεί ηλεκτρογεννήτρια εναλλασσομένου τριφασικού ρεύματος. Οι γεννήτριες διαιρούνται σε δυο κύρια είδη: τις σύγχρονες και τις ασύγχρονες. Μια σύγχρονη γεννήτρια παράγει στην έξοδο της ρεύμα της ίδιας συχνότητας με αυτό του δικτύου διανομής που είναι συνδεδεμένη. Οι σύγχρονες γεννήτριες ονομάζονται και εναλλακτικές. Μια ασύγχρονη γεννήτρια παράγει ρεύμα συχνότητας κάπως μεγαλύτερης της συχνότητας του δικτύου διανομής. Οι σύγχρονες γεννήτριες ονομάζονται και επαγωγικές γεννήτριες.

Τόσο οι σύγχρονες όσο και οι ασύγχρονες γεννήτριες αποτελούνται από ένα ακίνητο (τον στάτη) και ένα κινητό πλαίσιο (δρομέας, ρότορας). Ο στάτης είναι σχεδόν ο ίδιος και στους δυο τύπους γεννητριών. Ο στάτης αποτελείται από πυρήνα συνιστάμενο από φύλλα σιδήρου μονωμένα και συνδεδεμένα μεταξύ τους. Επάνω σ' αυτόν τον πυρήνα υπάρχουν τα τριφασικά τυλίγματα του πηνίου από μονωμένο σύρμα. Οι

δρομείς είναι τελείως διαφορετικά στα δυο είδη γεννητριών. Ο δρομέας της σύγχρονης γεννήτριας συνίσταται από τύλιγμα πηνίου που διαρρέεται από συνεχές ρεύμα, στις μεγάλες γεννήτριες, ενώ στις μικρές συνίσταται από μόνιμο μαγνήτη. Έτσι, το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του δρομέα επάγει έτσι ρεύμα στον στάτη, η έξοδος του οποίου συνδέεται στο δίκτυο διανομής.

Ο δρομέας μιας ασύγχρονης (ή επαγωγικής) γεννήτριας είναι ένα κλουβί με ράβδους που βραχυκυκλώνονται στα δυο άκρα τους. Ο δρομέας αυτός δεν έχει καμία ηλεκτρική σύνδεση, αλλά επάγει ρεύμα στο στάτη καθώς κινείται ως προς το περιστρεφόμενο πεδίο που παράγει ο στάτης. Εάν η ταχύτητα του δρομέα είναι ακριβώς ίση με την ταχύτητα του περιστρεφόμενου πεδίου που παράγεται από το στάτορα, τότε δεν υπάρχει σχετική κίνηση οπότε ο δρομέας δεν επάγει ρεύμα στον στάτη.

Έτσι η επαγωγική γεννήτρια λειτουργεί πάντοτε σε ταχύτητα κάπως μεγαλύτερη από αυτή του περιστρεφόμενου πεδίου που παράγει ο στάτης. Αυτή η διαφορά της ταχύτητας που φτάνει το ποσοστό 1% κατά την κανονική λειτουργία είναι γνωστή και ως ολίσθηση. Οι ασύγχρονες γεννήτριες δε χρησιμοποιούνται σήμερα σε ευρεία κλίμακα, χρησιμοποιούνται όμως πολύ οι επαγωγικοί (ή ασύγχρονοι) κινητήρες. Η επαγωγική γεννήτρια είναι ουσιαστικά ένας επαγωγικός κινητήρας, ο οποίος ασκεί ροπή στο δρομέα αντί να παίρνει από αυτό.

Το βιβλίο του McPherson (1981) δίνει περισσότερες και πληρέστερες λεπτομέρειες και περιγραφές για τις ασύγχρονες γεννήτριες.

Σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όλες οι μεγάλες γεννήτριες είναι σύγχρονες γεννήτριες. Είναι λίγο πιο αποδοτικές από τις ασύγχρονες γεννήτριες και έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα ελέγχου της επαγωγικής ισχύος τους. Σε μια σύγχρονη γεννήτρια το συνεχές ρεύμα που ρέει στο τύλιγμα του δρομέα επάγει ρεύμα στο στάτη κατά την περιστροφική κίνηση, όπως προαναφέραμε. Έτσι, αν αυξηθεί αυτό το συνεχές ρεύμα, εξάγεται προς το δίκτυο επαγωγική ισχύς, αν δε ελαττωθεί αυτό το ρεύμα, τότε εισάγεται επαγωγική ισχύς από το δίκτυο. Ο έλεγχος λοιπόν της επαγωγικής ισχύος συνεπάγεται τον έλεγχο της τάσης του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος.

Ορισμένα αρχικά πρωτότυπα ανεμογεννητριών παρήγαγαν ρεύμα με σύγχρονες γεννήτριες. Όμως, η σύγχρονη γεννήτρια είναι "συντονισμένη" με τη συχνότητα της τάσης του δικτύου και αυτός ο συντονισμός μπορεί να παρομοιαστεί σαν σύνδεση μέσω ενός μεγάλου ελατηρίου. Η έλικα ενός στροβίλου παράγει παλμούς ροπής στη

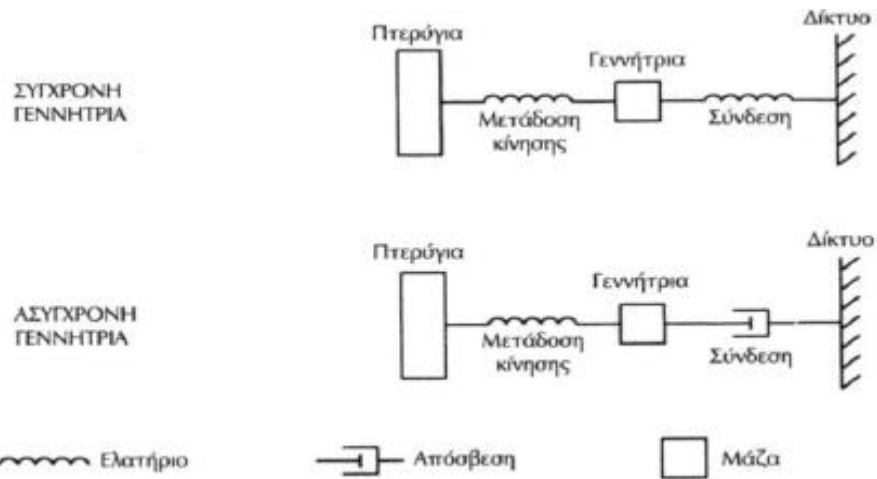
συχνότητα διέλευσης των πτερυγίων μπροστά από τον πύργο στήριξης. Εάν αυτοί οι παλμοί είναι της ίδιας συχνότητας με αυτούς που παράγονται από το ελατήριο σύνδεσης με το δίκτυο και τη μάζα της γεννήτριας, τότε θα έχουμε συντονισμό, δηλαδή πολύ μεγάλες ταλαντώσεις (κραδασμούς) στο κιβώτιο ταχυτήτων (των οδοντωτών τροχών) μετάδοσης κίνησης. Αυτό είχε συμβεί παλαιότερα σε μια ανεμογεννήτρια.

Υπάρχει βέβαια τρόπος να αποφύγουμε αυτούς τους κραδασμούς, αν παρεμβάλουμε μηχανισμούς απόσβεσης στο κιβώτιο ταχυτήτων, (π.χ. μηχανισμούς υδραυλικής ζεύξης). Σήμερα, πάντως, δε χρησιμοποιούνται σύγχρονες γεννήτριες σε ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας περιστροφής της έλικας.

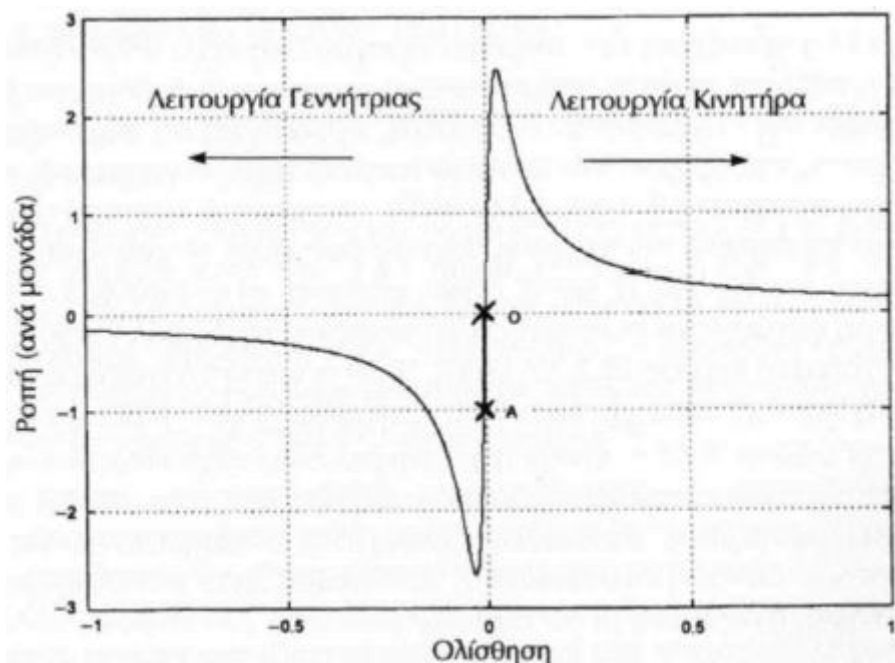
Αντιθέτως, μια ασύγχρονη γεννήτρια δεν είναι συντονισμένη στη συχνότητα τάσης του δικτύου, διότι ολισθαίνει, επειδή λειτουργεί σε λίγο μεγαλύτερη ταχύτητα. Έτσι, οι μεταβολές των παλμών ροπής που παράγει η έλικα απορροφώνται με πολύ μικρές αλλαγές στην ταχύτητα ολίσθησης. Η σύνδεση μιας ασύγχρονης γεννήτριας στο δίκτυο, μπορεί τότε να νοηθεί σαν σύνδεση μέσω απόσβεσης παρά σαν σύνδεση μέσω ελατηρίου.

Η απόδοση μιας ασύγχρονης μηχανής μπορεί να περιγραφεί από τη γραφική παράσταση της σχέσης της ροπής ως προς την ολίσθηση. Στο γράφημα 2.4. φαίνεται μια τέτοια γραφική παράσταση γεννήτριας 600 kW που χρησιμοποιείται σε ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας περιστροφής.

Η ολίσθηση παρίσταται κατά τον οριζόντιο άξονα  $\chi$ , όπου το 1 αντιστοιχεί στην κατάσταση ηρεμίας και το 0 στην περιστροφική κίνηση σε συγχρονισμό με το πεδίο του στάτη. Κατά συνθήκη δηλώνουμε ότι η ολίσθηση είναι θετική για ταχύτητες κατώτερες της ταχύτητας αυτού του συγχρονισμού. Η ροπή παρίσταται κατά τον κατακόρυφο άξονα  $y$ , όπου το 1 αντιστοιχεί στην ονομαστική τιμή των 600 kW.



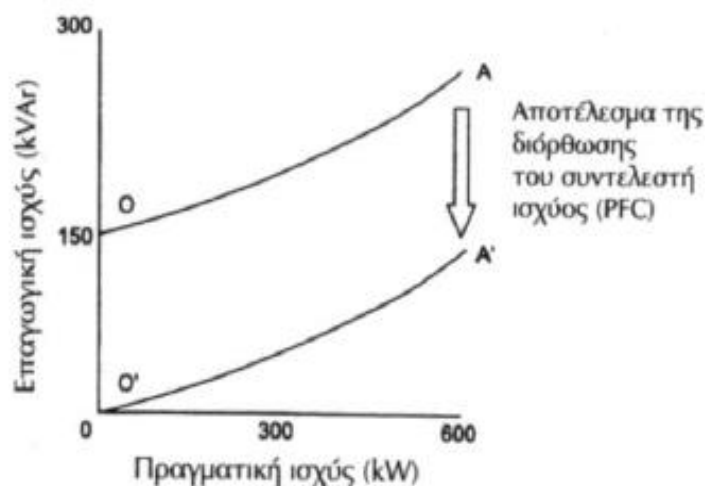
Εικόνα 3.7: Μηχανικά ανάλογα σύγχρονων και ασύγχρονων γεννητριών.



Εικόνα 3.8: Ροπή συνάρτηση ολίσθησης ασύγχρονης γεννήτριας.

Αυτή η γραφική παράσταση δείχνει πώς η ίδια μηχανή μπορεί να λειτουργήσει ως κινητήρας ή ως γεννήτρια. Σαν κινητήρας λειτουργεί μεταξύ των ολισθήσεων 1 και 0. Τα κανονικά όρια λειτουργίας μιας γεννήτριας βρίσκονται μεταξύ των σημείων O και A. Στο σημείο O δεν ασκείται πάνω στον άξονα της γεννήτριας ροπή που παράγεται από την έλικα. Καθώς η έλικα της ανεμογεννήτριας ασκεί ροπή, μέσω του κιβώτιου ταχυτήτων, πάνω στον άξονα της γεννήτριας, το σημείο λειτουργίας κινείται προς το A. Στο σημείο A η γεννήτρια θα παράγει 600 kW με ταχύτητα περιστροφής λίγο ανώτερη αυτής του συγχρονισμού.

Δυστυχώς υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα στη χρήση ασύγχρονων γεννητριών. Σε αντίθεση με τη σύγχρονη γεννήτρια που μπορεί να λειτουργήσει με σχεδόν οποιοδήποτε συντελεστή ισχύος, η ασύγχρονη γεννήτρια παίρνει επαγωγική ισχύ που εξαρτάται από την πραγματική ισχύ εξόδου.



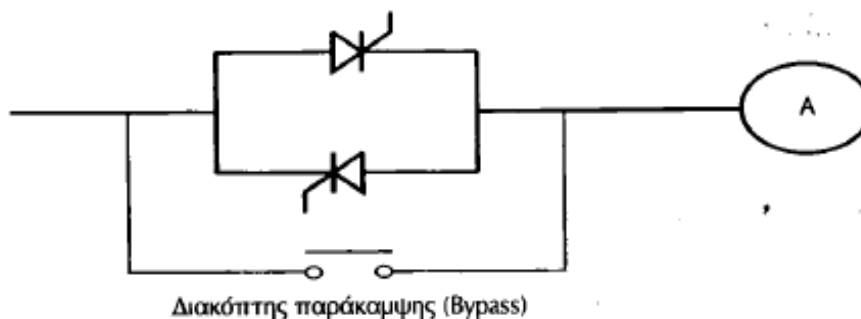
Εικόνα 3.9: Λειτουργικά χαρακτηριστικά ασύγχρονης γεννήτριας.

Στο σημείο Ο η γεννήτρια δεν παράγει πραγματική ισχύ στην έξοδο της, διότι η γεννήτρια παίρνει ακόμα αρκετή επαγωγική ισχύ για να μαγνητίσει το σιδερένιο πυρήνα της. Όμως όταν ο δρομέας της αρχίζει να περιστρέφεται και το σημείο λειτουργίας της αρχίζει και αυτό να κινείται προς το σημείο Α, τότε παράγει στην έξοδο της πραγματική ισχύ, αλλά πάλι απορροφά περισσότερη επαγωγική ενέργεια.

Η απορρόφηση επαγωγικής ισχύος δεν είναι συχνά επιθυμητή εφόσον έχουμε απώλειες στο δίκτυο. Γι' αυτό, στη βάση της ανεμογεννήτριας συνδέονται πυκνωτές που παρέχουν χωρητική ισχύ ή αλλιώς διόρθωση του συντελεστή ισχύος (Δ.Σ.Ι.), [PFC]. Έτσι η χωρητική ισχύς αναπληρώνει τη χαμένη επαγωγική ισχύ από το δίκτυο που παίρνει η γεννήτρια στο σημείο μηδέν. Όταν η γεννήτρια δίνει ισχύ στο δίκτυο (σημείο Α'), υπάρχει ακόμα ζήτηση επαγωγικής ισχύος. Βέβαια και τότε ακόμα μπορούμε να συνδέσουμε περισσότερους πυκνωτές· όμως τότε υπάρχει κίνδυνος δημιουργίας υπερτάσεων σε κατάσταση συντονισμού, που ονομάζεται αυτοδιέγερση, αν διακοπεί, κάποια στιγμή, η σύνδεση με το δίκτυο.

Ένα άλλο μειονέκτημα υπάρχει όταν αρχικά συνδέεται η γεννήτρια στο δίκτυο, οπότε εισέρχεται στη γεννήτρια ένα μεγάλο ρεύμα που μαγνητίζει το σιδερένιο πυρήνα της, μέχρις ότου αποκατασταθεί η κανονική κατάσταση λειτουργίας της.

Το πρόβλημα αυτό είναι παρόμοιο με το πρόβλημα εκκίνησης του ασύγχρονου ή επαγωγικού κινητήρα. Οι γεννήτριες των ανεμογεννητριών χρησιμοποιούν ίδιου τύπου εξαρτήματα βαθμιαίας εκκίνησης, τα οποία χρησιμοποιούν και οι μεγάλοι ασύγχρονοι κινητήρες και φαίνονται στην σχηματική εικόνα 3.10.



Εικόνα 3.10: Βαθμιαία εκκίνηση (μιας φάσης), ασύγχρονης γεννήτριας.

Σε κάθε φάση παροχής του δικτύου συνδέονται αντιπαράλληλα δυο θύριστορ [thyristors], (ή μια αμφίδρομα ελεγχόμενη δίοδος [triac]). Όταν η ασύγχρονη γεννήτρια συνδέεται στο δίκτυο, τα θύριστορ ελέγχουν την τάση που εφαρμόζεται στα τυλίγματα του στάτη, οπότε περιορίζεται το μεγάλο ρεύμα εισροής. Όταν η γεννήτρια εκκινήσει κανονικά, τότε κλείνει ο διακόπτης παράκαμψης των θύριστορ ο οποίος είναι συνδεδεμένος παράλληλα με αυτά.

Ασύγχρονες γεννήτριες χρησιμοποιούνται σήμερα σε όλες τις ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας περιστροφής. Πρόσφατα ενσωματώθηκε στα τυλίγματα του δρομέα της ασύγχρονης γεννήτριας και μια ελεγχόμενη αντίσταση που καθιστά την καμπύλη ροπής - ολίσθησης περισσότερο ελεγχόμενη, βελτιώνοντας έτσι και τη δυναμική συμπεριφορά του κιβωτίου ταχυτήτων.

Η επιλογή του είδους της γεννήτριας σε ανεμογεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής δεν είναι περιορισμένη. Μπορούν σ' αυτήν την περίπτωση να χρησιμοποιηθούν σύγχρονες και ασύγχρονες γεννήτριες.

Υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χρήση γεννητριών μεγάλης διαμέτρου που οδηγούνται απ' ευθείας από την έλικα, χωρίς παρεμβολή κιβωτίου ταχυτήτων. Αν και οι γεννήτριες αυτές περιστρέφονται με την εκάστοτε συχνότητα περιστροφής της έλικας, εντούτοις παράγουν τάση στην επιθυμητή σταθερή ταχύτητα. Επίσης, εξελίσσονται τα σχέδια συγχρόνων γεννητριών, μεγάλης διαμέτρου, απευθείας οδηγούμενων από την έλικα, με στάτη σταθερού μαγνήτη.

Υπάρχουν, επίσης, ραγδαίες εξελίξεις στη σχεδίαση των μετατροπέων τάσης που χρησιμοποιούνται στις αιολικές γεννήτριες μεταβλητής ταχύτητας περιστροφής. Στα



νέα σχέδια χρησιμοποιούνται τρανζίστορ που παράγουν τάση εξόδου σχεδόν ημιτονική, με χαμηλές αρμονικές παραμορφώσεις και ελεγχόμενο συντελεστή ισχύος. Βέβαια και αυτοί οι ημιαγωγοί καταναλώνουν ισχύ και παράγουν θερμότητα.

Συνήθως οι γεννήτριες παράγουν τάση χαμηλότερη από αυτή του δικτύου διανομής. Ακόμα και οι μεγάλες ανεμογεννήτριες (των 600 kW) παράγουν τάση 690 V, οπότε χρησιμοποιούνται μετασχηματιστές, που συνδέουν κάθε ανεμογεννήτρια στο δίκτυο ή στο σύστημα συλλογής του σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Είναι επίσης φυσικό, κάθε μεγάλη ανεμογεννήτρια να συνδέεται στο δικό της μετασχηματιστή για να αποφεύγονται ηλεκτρικές απώλειες.

### 3.5 Σύστημα πέδησης

Η ισχύς που παρέχει ο άνεμος στην ανεμογεννήτρια είναι ανάλογος του κύβου της ταχύτητας του ανέμου και βέβαια, σημαντικές δυνάμεις αναπτύσσονται σε μεγάλες ταχύτητες ανέμων. Προφανώς, χρειάζονται αποτελεσματικά συστήματα πέδησης για την ασφαλή λειτουργία των ανεμογεννητριών. Υπάρχουν τουλάχιστον δυο ανεξάρτητα συστήματα, καθένα από τα οποία μπορεί να επιφέρει ασφαλείς συνθήκες λειτουργίας σε περίπτωση θυελλωδών ανέμων, απώλεια σύνδεσης με το δίκτυο ή άλλες επείγουσες καταστάσεις ανάγκης.

Όταν τα πτερύγια της έλικας περιστρέφονται και βρεθούν σε μηδενική ή αρνητική γωνία πρόσπτωσης του αέρα, η ταχύτητα περιστροφής της έλικας θα μειωθεί. Όμως αυτή η ρύθμιση δεν υπάρχει σε έλικες με αυτοπέδηση, οπότε σε ορισμένους τύπους αυτών των ελίκων υπάρχει μηχανική πέδη που δρα ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής του ακραίου τμήματος της έλικας. Οι παλιότερες ανεμογεννήτριες είχαν ανεξάρτητο σύστημα πέδησης που δρούσε με τη φυγόκεντρο δύναμη, όμως σήμερα χρησιμοποιείται ένα κοινό σύστημα πέδησης.

Για να σταματήσει η έλικα τελείως, τοποθετείται μηχανική πέδη στους κυρίους άξονες του κιβωτίου ταχυτήτων. Μπορεί να τοποθετηθεί πέδη στον άξονα με το μεγαλύτερο γρανάζι (την μικρότερη ταχύτητα), όμως οι ροπές που αναπτύσσονται σ' αυτόν τον άξονα είναι πάρα πολύ μεγάλες. Το να τοποθετείται πέδη στον άξονα με τη μεγαλύτερη ταχύτητα είναι συνήθως η φθηνότερη λύση. Είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε ότι τα συστήματα πέδησης θα λειτουργούν σε οποιοσδήποτε συνθήκες ή και σε έκτακτες περιπτώσεις ανάγκης.

### **3.6 Σύστημα προσανεμισμού**

Οι ανεμογεννήτριες με έλικα οριζοντίου περιστροφής έχουν σύστημα προσανεμισμού το οποίο περιστρέφει την άτρακτο σύμφωνα με την κατεύθυνση του ανέμου, χρησιμοποιώντας περιστροφικό μηχανισμό που ζευγνύετε σε δακτυλιοειδή οδοντωτό τροχό που είναι τοποθετημένος στην κορυφή του πύργου στήριξης. Η διεύθυνση του ανέμου πρέπει να είναι κάθετη στο επίπεδο της έλικας κατά την κανονική λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Γι' αυτό χρησιμοποιείται ένα αργό σύστημα ελέγχου κλειστού βρόγχου που οδηγεί τον περιστροφικό μηχανισμό. Η κατεύθυνση του ανέμου γίνεται αισθητή από ανεμούριο που είναι συνδεδεμένο στην κορυφή της ατράκτου. Η εκάστοτε στροφή του ανεμουρίου δίνει το σήμα εισόδου στο σύστημα ελέγχου που οδηγεί τον περιστροφικό μηχανισμό.

Σε μερικά σχέδια η άτρακτος περιστρέφεται έτσι ώστε να αποκλίνει κάπως από την κατεύθυνση του ανέμου, όταν ο άνεμος έχει μεγάλη ταχύτητα. Το σύστημα αυτό αποκλίνει την άτρακτο κατά  $90^\circ$  όταν ο άνεμος είναι θυελλώδης.

Έτσι ρυθμίζεται σταθερά και η ισχύς εξόδου της ανεμογεννήτριας. Αν και το σύστημα ελέγχου προσανεμισμού φαίνεται απλό, εντούτοις είναι ένα από τα πιο δύσκολα μέρη της ανεμογεννήτριας του οποίου η σχεδίαση είναι αρκετά δύσκολη, γιατί τα ασκούμενα δυναμικά φορτία κατά την εκτροπή είναι δύσκολο να προβλεφθούν και ιδιαίτερα όταν επικρατούν ανεμοστρόβιλοι ή και θυελλώδεις άνεμοι.

### **3.7 Πύργος στήριξης**

Συνήθως οι πύργοι στήριξης έχουν κοίλο εσωτερικό και κατασκευάζονται είτε από χάλυβα είτε από σκυρόδεμα (μπετόν). Οι μικρότεροι και φθηνότεροι πύργοι κατασκευάζονται από δικτυωτό χοντρό σύρμα. Οι μεσαίοι καθώς και οι μεγάλοι πύργοι που έχουν κοίλο εσωτερικό επιτρέπουν έτσι την πρόσβαση από τον πύργο στο εσωτερικό της ατράκτου, όταν επικρατούν έξω άσχημες καιρικές συνθήκες. Ο πύργος πρέπει να είναι σχεδιασμένος έτσι, ώστε να αντέχει βαρυτικά και αιολικά δυναμικά φορτία. Η άτρακτος τοποθετείται στην κορυφή του πύργου και επάνω στο δακτυλιοειδή οδοντωτό τροχό προσανεμισμού. Ο πύργος πρέπει να στηρίζεται σε γερά θεμέλια και η φυσική συχνότητα συντονισμού του πρέπει να μην συμπίπτει με τις επαγόμενες συχνότητες από την περιστροφή της έλικας, οι οποίες πρέπει βέβαια να αποσβένονται.

Ο άκαμπτος πύργος έχει φυσική ιδιοσυχνότητα συντονισμού υψηλότερη της επαγόμενης από την περιστροφή της έλικας· το αντίστροφο ισχύει για έναν εύκαμπτο πύργο. Οι εύκαμπτοι πύργοι είναι ελαφρότεροι και φθηνότεροι, αλλά κουνιούνται περισσότερο και δέχονται έτσι μεγαλύτερες πιέσεις. Εφ' όσον η ιδιοσυχνότητα ενός εύκαμπτου πύργου είναι χαμηλότερη της συχνότητας που επάγεται από την περιστροφή της έλικας, θα προκαλείται μεταβατικός συντονισμός κάθε φορά που η ταχύτητα περιστροφής της έλικας θα αυξάνεται. Αν και ο μεταβατικός συντονισμός τραντάζει λίγο τον πύργο και την άτρακτο, εντούτοις δε διαρκεί για μεγάλο χρονικό διάστημα και δε δημιουργεί δυσκολίες.

### **3.8 Σύστημα εποπτείας και ελέγχου**

Για τη λειτουργία και προστασία μιας ανεμογεννήτριας απαιτείται πλήρες αυτόματο σύστημα εποπτείας και ελέγχου. Το σύστημα αυτό πρέπει να είναι ικανό να ελέγχει την αυτόματη απότομη ανύψωση των στροφών, την περιστροφή των πτερυγίων της έλικας για ρύθμιση της γωνίας πρόσπτωσης (για αυτού του τύπου ανεμογεννήτριες) καθώς και την παύση λειτουργίας είτε σε ομαλές ή σε ανώμαλες συνθήκες λειτουργίας.

Πέραν του ελέγχου, πρέπει να εποπτεύεται η κατάσταση λειτουργίας, η παραγωγή ισχύος, η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου κλπ. Κάθε μεγάλη (αλλά και μικρή) ανεμογεννήτρια θα πρέπει να εποπτεύεται μέσω υπολογιστή ο οποίος μπορεί να είναι εγκατεστημένος σε κάποια άλλη τοποθεσία, (τηλεποπτεία).

Έτσι το σύστημα αυτό συνίσταται από διάφορα λειτουργικά τμήματα:

- Έλεγχος σταδιακός απότομης ανύψωσης των στροφών, παύσης λειτουργίας και εποπτεία σημάτων συναγερμού και ελέγχου.
- Εποπτεία του αργού συστήματος ελέγχου κλειστού βρόγχου του προσανεμισμού.
- Εποπτεία του γοργού συστήματος ελέγχου κλειστού βρόγχου της περιστροφής των πτερυγίων της έλικας για ρύθμιση της γωνίας πρόσπτωσης (για ανεμογεννήτριες με αυτό τον τύπο έλικας).
- Επικοινωνία με το σταθμό παραγωγής ή με τον υπολογιστή τηλεποπτείας.

### **3.9 Απόδοση ισχύος**

Η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας δείχνει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου που επικρατεί στο ύψος της άτρακτου

(στο ύψος της πλήμνης της έλικας). Η καμπύλη αυτή προσδιορίζεται είτε με θεωρητικούς υπολογισμούς, είτε με δοκιμές στην πράξη. Οι δοκιμές αυτές γίνονται σύμφωνα με διεθνείς προδιαγραφές και συστάσεις, όπως αυτές του Διεθνούς Πρακτορείου Ενέργειας (1990).

Οι καμπύλες ισχύος που προκύπτουν από αυτές τις δοκιμές καταγράφουν τους μέσους όρους μετρήσεων που λαμβάνονται μέσα σε χρονικά διαστήματα 10 λεπτών. Ο μέσος όρος μιας σειράς μετρήσεων ισχύος εξόδου σε συνάρτηση με την ταχύτητα του ανέμου, που λαμβάνονται μέσα σε δέκα λεπτά δε θα δείξει ποτέ κάποιο μεταβατικό φαινόμενο που συνέβη ενδεχομένως μέσα σ' αυτό το χρονικό διάστημα των 10 λεπτών.

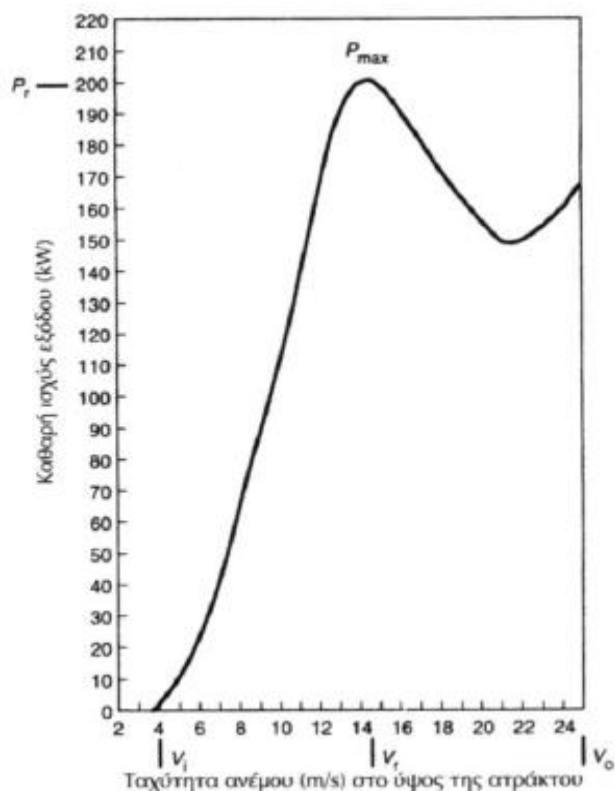
Η απόδοση μιας ανεμογεννήτριας ορίζεται ως ο λόγος της ηλεκτρικής ενέργειας που μετριέται στην έξοδο της γεννήτριας προς την ενέργεια του ανέμου που σαρώνει το εμβαδόν της κυκλικής επιφάνειας που διαγράφεται από την περιστροφή της έλικας.

Στην παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας με έλικα αυτορυθμιζόμενης πέδησης (όχι με ρύθμιση γωνίας πρόσπτωσης). Στην καμπύλη αυτή φαίνονται οι εξής παράμετροι:

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

Στην διάγραμμα επίσης φαίνεται η καθαρή ισχύς εξόδου σε χιλιοβάτ (kW) που λαμβάνεται στην έξοδο της γεννήτριας, απαλλαγμένη από αεροδυναμικές, μηχανικές και ηλεκτρικές απώλειες. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου υπερνικούνται οι μηχανικές τριβές και τα αεροδυναμικά φορτία που ασκούνται στον άξονα περιστροφής της έλικας, οπότε η ροπή που εφαρμόζεται στον άξονα είναι σταθερή. Σταθερή είναι επίσης και η παραγόμενη ισχύς εξόδου δηλαδή η εκτιμητέα ισχύς και αυτό συμβαίνει μέχρι την  $V_o$ . Το ίδιο συμβαίνει και με έλικες ρύθμισης γωνίας πρόσπτωσης (τουλάχιστον έτσι δείχνουν οι μέσες τιμές ανά δεκάλεπτα), αλλά στο

διάγραμμα, η καμπύλη ισχύος ελήφθη από ανεμογεννήτρια με έλικα αυτορυθμιζόμενης πέδησης (αυτοπέδησης).



Εικόνα 3.11: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας 200 kW με έλικα αυτοπέδησης.

### 3.10 Διαθεσιμότητα

Σαν διαθεσιμότητα ορίζουμε το μέρος του χρόνου που η ανεμογεννήτρια μπορεί να παράγει ισχύ. Οι τυπικές διαθεσιμότητες των συγχρόνων ανεμογεννητριών κυμαίνονται από 95 - 99% και είναι καλύτερες και από πετρελαιοκίνητα ηλεκτροπαραγωγό ζεύγη. Το 1 - 5% του χρόνου που δεν είναι διαθέσιμες οφείλεται είτε σε συντήρηση είτε σε επισκευή βλάβης.

Ωφέλιμη ισχύς παράγεται μεταξύ των ταχυτήτων ανέμου  $V_i$  και  $V_0$  και όσο εξαρτάται από τις επικρατούσες συνθήκες ανέμου, η ανεμογεννήτρια θα λειτουργεί σε επίπεδο χαμηλότερο απ' ότι αυτό της διαθεσιμότητας της.

Άλλο μέτρο αξιοποίησης είναι ο συντελεστής φόρτου ή ικανότητας και ορίζεται ως το πηλίκων της πραγματικής ενέργειας που παράγεται για ορισμένο χρονικό διάστημα, προς την εκτιμητέα ενέργεια που θα παράγονταν στο ίδιο χρονικό διάστημα. Για παράδειγμα:

### Συντελεστής εβδομαδιαίου φόρτου

$$= \frac{\text{Ενέργεια που παράγεται ανά εβδομάδα (kWh)}}{\text{Εκτιμητέα ενέργεια ανεμογεννήτριας (kW) \times 168}}$$

Υπάρχουν παρόμοια μέτρα για την αξιοποίηση ενός σταθμού παραγωγής. Προκειμένου να αποφύγουμε τη σύγχυση όταν συγκρίνουμε την απόδοση ενός αιολικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής, οι ακριβείς ορισμοί της διαθεσιμότητας ή του συντελεστή φόρτου πρέπει να έχουν κατανοηθεί.

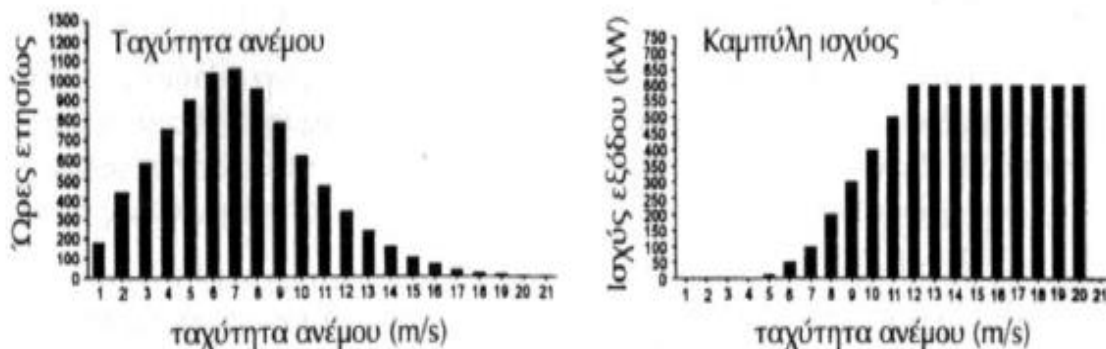
### 3.11 Ετήσιος υπολογισμός ενέργειας

Ο υπολογισμός ετήσιας ενέργειας που παράγεται από μια ανεμογεννήτρια ενέχει ουσιαστική σημασία για την εκτίμηση ενός σταθμού παραγωγής. Η μακροχρόνια κατανομή των ταχυτήτων του ανέμου σε συνδυασμό με την καμπύλη ισχύος μιας ανεμογεννήτριας δίνει την παραγόμενη ενέργεια για κάθε ταχύτητα ανέμου και συνεπώς το σύνολο της ενέργειας κατά τη διάρκεια ενός έτους. Κατά τον υπολογισμό συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται θύλακες του 1 m/s για ταχύτητες ανέμου και αυτό δίνει μια αποδεκτή ακρίβεια.

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του παρακάτω διαγράμματος, τα εξαγόμενα αποτελέσματα του υπολογισμού μπορούν να καταχωρηθούν όπως στον Πίνακα 3.1 και να εκφραστούν με μαθηματικό τύπο, δηλαδή:

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

όπου  $H(i)$  ο αριθμός των ωρών για ταχύτητα ανέμου του θύλακα  $i$  και  $W(i)$  η ισχύς εξόδου που αντιστοιχεί στην ταχύτητα ανέμου του θύλακα  $i$ .



Εικόνα 3.12: Υπολογισμός ετήσιας παραγωγής ενέργειας.

| Υπολογισμός ετήσιας παραγωγής ενέργειας. |              |                   |                          |
|--|--------------|-------------------|--------------------------|
| Θύλακας ταχύτητας ανέμου (m/s)           | Ώρες ετησίως | Ισχύς εξόδου (kW) | Παραγωγή ενέργειας (kWh) |
| 1  | 191          | 0                 | 0                        |
| 2  | 444          | 0                 | 0                        |
| 3  | 592          | 0                 | 0                        |
| 4  | 763          | 0                 | 0                        |
| 5  | 913          | 10                | 9130                     |
| 6  | 1037         | 50                | 51850                    |
| 7  | 1058         | 100               | 105800                   |
| 8  | 954          | 200               | 190800                   |
| 9  | 781          | 300               | 234300                   |
| 10                                       | 613          | 400               | 245200                   |
| 11                                       | 460          | 500               | 230000                   |
| 12                                       | 330          | 600               | 198000                   |
| 13                                       | 235          | 600               | 141000                   |
| 14                                       | 153          | 600               | 91800                    |
| 15                                       | 101          | 600               | 60600                    |
| 16                                       | 61           | 600               | 36600                    |
| 17                                       | 35           | 600               | 21000                    |
| 18                                       | 21           | 600               | 12600                    |
| 19                                       | 12           | 600               | 7200                     |
| 20                                       | 6            | 600               | 3600                     |
| Σύνολο                                   | 8760         |                   | 1639480                  |

Πίνακας 3.1: Υπολογισμός ετήσιας παραγωγής ενέργειας.

### 3.12 Απόδοση συστοιχίας ανεμογεννητριών (Α/Γ)

Η συνολική ισχύς εξόδου ενός σταθμού παραγωγής (μιας συστοιχίας Α/Γ) είναι μικρότερη από το άθροισμα κάθε μιας μεμονωμένης ανεμογεννήτριας, διότι, όταν μια ανεμογεννήτρια βρίσκεται στο κάτω ρεύμα της προηγούμενης ανεμογεννήτριας (αυτή που είναι πίσω από μια άλλη), αποδίδει λιγότερο, επειδή το κάτω ρεύμα έχει μικρότερη ταχύτητα από το άνω ρεύμα. Επίσης κατ' αυτόν τον τρόπο η ένταση της τυρβώδους ροής ανέμου αυξάνεται.

Πρέπει ακόμα να λάβουμε υπόψη, την κόπωση των εξαρτημάτων και τις συχνές μεταβολές της τιμής της παραγόμενης ισχύος. Ανάλογα με τις περιστάσεις οι συνθήκες που επικρατούν σ' έναν αιολικό σταθμό παραγωγής (αιολικό πάρκο) μπορούν να μειώσουν την ισχύ εξόδου κατά 5-15%.

Μπορεί ακόμα να έχουμε απώλειες στους μετασχηματιστές του σταθμού και βέβαια λιγότερες απώλειες στα καλώδια συλλογής της παραγόμενης ισχύος, που μειώνουν ακόμα κατά 1 - 2% τη συνολική ετήσια παραγόμενη ισχύ εξόδου.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ**

### **4.1 Περιγραφή των Αιολικών Πάρκων**

Η πυκνότητα της αιολικής ενέργειας είναι μικρή με αποτέλεσμα για να παραχθεί μια αξιόλογη ποσότητα ενέργειας, συγκρίσιμη με αυτή των συμβατικών σταθμών, να απαιτούνται πολλές ανεμογεννήτριες. Προκειμένου λοιπόν να αυξηθεί η παραγόμενη ενέργεια και να αξιοποιείται όσο το δυνατόν περισσότερο μια περιοχή με καλά ανεμολογικά χαρακτηριστικά, σε συνδυασμό με την επιδίωξη της ελαχιστοποίησης του κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας, οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται μαζί σαν σύνολο, σε συστοιχίες και αποτελούν ένα αιολικό πάρκο.

Αιολικό πάρκο λοιπόν, είναι μία συστοιχία πολλών ανεμογεννητριών, οι οποίες εγκαθίστανται και λειτουργούν σε μία περιοχή με υψηλό αιολικό δυναμικό και διοχετεύουν το σύνολο της παραγωγής τους στο ηλεκτρικό σύστημα. Κάθε ανεμογεννήτρια είναι συνδεδεμένη σε ένα εσωτερικό δίκτυο χαμηλής ή μέσης τάσης το οποίο συνδέεται με το διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης. Υπάρχει βέβαια και η δυνατότητα οι ανεμογεννήτριες να λειτουργούν αυτόνομα, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές που δεν ηλεκτροδοτούνται ή για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας για χρήση σε αντλιοστάσια.

Ανάλογα με την τοποθεσία όπου εγκαθίστανται οι συστοιχίες των ανεμογεννητριών, τα αιολικά πάρκα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, σε χερσαία και υπεράκτια. Χερσαία είναι αυτά τα οποία η εγκατάσταση τους γίνεται στην στεριά και αποτελούν περίπου το 98% των εν λειτουργία αιολικών πάρκων στον πλανήτη ενώ υπεράκτια αυτά τα οποία εγκαθίστανται στις θάλασσες.

Τα αιολικά πάρκα αποτελούν ιδιαίτερα πολύπλοκα τεχνικά έργα αφού για τη δημιουργία τους απαιτούν τη κατασκευή πολλών επιμέρους τεχνικών έργων και μία σειρά από εγκαταστάσεις έτσι ώστε τα έργα αυτά να καταστούν λειτουργικά.

### **4.2 Κριτήρια εγκατάστασης Αιολικού Πάρκου**

Ένα υποψήφιο προς ανέγερση Α/Π πρέπει να πληροί κάποιες βασικές προϋποθέσεις αφενός για να εγκριθεί η κατασκευή του από την αρμόδια δημόσια αρχή, αφετέρου για να εξασφαλίζει την οικονομική βιωσιμότητά του. Είναι γεγονός λοιπόν ότι οι θέσεις των εγκαταστάσεων πρέπει να επιλεγούν με κριτήρια:



- Τη συμβατότητα του έργου με τους περιορισμούς που θέτει το «Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις ΑΠΕ».
- Το υψηλό αιολικό δυναμικό των περιοχών εγκατάστασης.
- Την εύκολη κατά το δυνατόν οδική πρόσβαση προς τις εγκαταστάσεις.
- Τα υψομετρικά χαρακτηριστικά που τεχνικά είναι απαραίτητο να διαθέτουν οι θέσεις των εγκαταστάσεων.
- Την κατά το δυνατόν μεγαλύτερη απόστασή τους από τα όρια των υφιστάμενων οικισμών και αρχαιολογικών χώρων.
- Τη βέλτιστη δυνατή απόκρυψη της εγκατάστασης από το φυσικό ανάγλυφο, ώστε να εξασφαλισθεί η μικρότερη δυνατή οπτική όχληση.
- Τη μικρότερη δυνατή όχληση της ορνιθοπανίδας.

### 4.3 Αιολική διείσδυση

Από την άποψη της ροής ηλεκτρικής ισχύος, ένα αιολικό πάρκο λειτουργεί παράλληλα με το συμβατικό δυναμικό παραγωγής της εταιρείας ηλεκτρισμού για την κάλυψη των απαιτήσεων σε ισχύ του συνδεδεμένου φορτίου. Οι συστοιχίες ανεμογεννητριών μπορεί να αποτελούνται από εκατοντάδες μηχανών με ένα συνδυασμένο δυναμικό ισχύος του αιολικού πάρκου της τάξης των εκατοντάδων MW. Σχεδόν πάντοτε οι συμβατικές πηγές παρέχουν το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος που απαιτείται από το φορτίο.

Γενικά, η αναλογία του δυναμικού αιολικής παραγωγής προς το συνολικό δυναμικό (αιολικό συν συμβατικό) που εξυπηρετεί ένα ηλεκτρικό φορτίο σε οποιαδήποτε δεδομένη χρονική στιγμή υπολογίζεται από την αιολική διείσδυση WP:

$$WP = \text{Αιολικό Δυναμικό} / (\text{Αιολικό Δυναμικό} + \text{Συμβατικό Δυναμικό})$$

Με την τρέχουσα ηλεκτρική τεχνολογία των Α/Γ, η μέγιστη τιμή αιολικής διείσδυσης με την οποία τα περισσότερα ηλεκτρικά συστήματα είναι ασφαλή κυμαίνεται μεταξύ 10 και 15% με στόχους της EWEA (European Wind Energy Association) για το 2020 και το 2030 το ποσοστό διείσδυσης να ξεπεράσει το 14% και να φτάσει έως το 28%, αντίστοιχα. Το άνω όριο στην ποσότητα της αιολικής ενέργειας που μπορεί να απορροφηθεί από ένα ηλεκτρικό σύστημα αντικατοπτρίζει τις ανησυχίες γύρω από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ισχύος που παρέχεται από το αιολικό σύστημα, που είναι

η ποιότητα ισχύος. Ειδικότερα, η ανησυχία σχετίζεται με την επίδραση της χρονικά μεταβαλλόμενης αιολικά παραγόμενης ισχύος στη βραχυπρόθεσμη ευστάθεια της τάσης και της συχνότητας της συνδυασμένης ισχύος που παρέχεται στο φορτίο.

Η αποδεκτή τιμή διείσδυσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, μεταξύ των οποίων είναι οι λεπτομέρειες της αιολικής τεχνολογίας, τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των συμβατικών πηγών παραγωγής, και η δυναμικότητα και το μήκος των γραμμών μεταφοράς που συνδέουν τις πηγές με το φορτίο. Το άνω όριο στην ποσότητα της αιολικής ενέργειας που μπορεί να συνδυαστεί με τις συμβατικές πηγές δεν αποτελεί αυστηρό περιορισμό, και η τιμή του θα αυξηθεί με την απόκτηση περισσότερης λειτουργικής εμπειρίας, τις αλλαγές της τεχνολογίας και την πιο στενή συσχέτιση των συστημάτων ελέγχου των αιολικών και των συμβατικών πηγών.

#### **4.4 Είδη Αιολικών Πάρκων**

Υπάρχουν τρία βασικά είδη αιολικών πάρκων ανάλογα με τον τόπο που εγκαθίστανται: τα χερσαία (onshore), τα πάρκα που βρίσκονται κοντά στην ακτή (nearshore) και τα παράκτια (offshore).

##### **A) Χερσαία Αιολικά Πάρκα (onshore)**

Χερσαία αιολικά πάρκα, ονομάζονται αυτά που κατασκευάζονται στις κορυφογραμμές περιοχών με μεγάλο σχετικά υψόμετρο τουλάχιστον τρία χιλιόμετρα προς το εσωτερικό από την πλησιέστερη ακτογραμμή. Αυτό συμβαίνει για την εκμετάλλευση της λεγόμενης τοπογραφικής επιτάχυνσης, την επιτάχυνση δηλαδή του ανέμου καθώς διασχίζει μια κορυφογραμμή.

Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου οδηγεί και σε αύξηση της παραγόμενης ενέργειας. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην ακριβή τοποθέτηση των ανεμογεννητριών, η οποία γίνεται μετά από αναλυτική παρακολούθηση των τοπικών ανέμων για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα πριν την εγκατάσταση. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η περιοχή στην οποία εγκαθίσταται το αιολικό πάρκο, αλλοιώνεται μόνο οπτικά και παραμένει αξιοποιήσιμη για γεωργία ή κτηνοτροφία.



Εικόνα 4.1: Χερσαίο αιολικό πάρκο.

### **Β) Αιολικά Πάρκα κοντά στην ακτή (nearshore)**

Είναι τα πάρκα που βρίσκονται στην ξηρά εντός της ζώνης των τριών χιλιομέτρων από την ακτογραμμή ή στην θάλασσα εντός της ζώνης των δέκα χιλιομέτρων από την ακτογραμμή. Αυτές οι τοποθεσίες είναι αποδοτικές για εγκατάσταση λόγω του ανέμου που δημιουργείται από την θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ θάλασσας και ξηράς καθημερινά.



Εικόνα 4.2: Αιολικό πάρκο κοντά στην ακτή.

### Γ) Παράκτια Αιολικά Πάρκα (offshore)

Είναι τα πάρκα που είναι εγκατεστημένα σε θαλάσσιες περιοχές πέραν των δέκα χιλιομέτρων από την ακτή. Ακριβώς επειδή η επιφάνεια του νερού είναι ομαλότερη αυτής του εδάφους, η ταχύτητα του ανέμου είναι υψηλότερη από την ξηρά, έτσι ο συντελεστής χρησιμοποίησης ή συντελεστής εκμετάλλευσης (Capacity Factor) είναι υψηλότερος συγκριτικά με των άλλων δυο τύπων αιολικών πάρκων. Ένας από τους βασικούς λόγους για τον οποίο άρχισε να αναπτύσσεται η ιδέα των αιολικών πάρκων στη θάλασσα, είναι το γεγονός ότι δεν υπάρχουν πολλά κατάλληλα μέρη στη στεριά για τη δημιουργία αιολικών πάρκων. Εξίσου σημαντικός λόγος είναι το γεγονός ότι συνήθως οι άνεμοι στη θάλασσα έχουν πολύ μεγαλύτερες τιμές απ' ό τι στη στεριά. Μια αύξηση κοντά στο 20% στην ταχύτητα των ανέμων σε κάποια απόσταση από τη στεριά είναι πολύ σύνηθες φαινόμενο.

Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με το ότι η ενέργεια αυξάνεται με τον κύβο της ταχύτητας, μπορεί να μας δώσει απόδοση ενέργειας ακόμη και 73% περισσότερη. Γενικά έχουν μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης και οι πύργοι είναι ψηλότεροι σε σχέση με τα χερσαία όμως, λόγω του μεγαλύτερου αιολικού δυναμικού που υπάρχει στις υπεράκτιες περιοχές, το αυξημένο κεφαλαιουχικό κόστος και το κόστος συντήρησης αντισταθμίζεται. Η μεταφορά της ενέργειας γίνεται με υποθαλάσσιο καλώδιο και σε περιπτώσεις μεγάλων αποστάσεων από την ακτή χρησιμοποιείται μεταφορά με συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης (HVDC) για ελαχιστοποίηση των απωλειών κατά την μεταφορά.



Εικόνα 4.3: Παράκτιο αιολικό πάρκο.

## 4.5 Διασυνδέσεις Αιολικών Πάρκων

Κάθε αιολικό πάρκο αποτελείται από διάφορα στοιχεία όπως τις ανεμογεννήτριες, το τοπικό δίκτυο των ανεμογεννητριών, τα σημεία σύζευξης των ανεμογεννητριών, ένα σύστημα μεταφοράς και ένα σημείο σύνδεσης με το δίκτυο. Το τοπικό δίκτυο των ανεμογεννητριών συνδέει τις ανεμογεννήτριες στο σημείο σύζευξης όλων των ανεμογεννητριών. Οι ανεμογεννήτριες συνήθως συνδέονται ακτινικά, εκτός και αν η μορφολογία κάποιου πάρκου υποδεικνύει διαφορετικά. Στο σημείο σύζευξης η τάση αυξάνεται σε μία κατάλληλη τιμή για τη μεταφορά. Τότε η ενέργεια μεταφέρεται μέσω του συστήματος μεταφοράς στο σημείο σύνδεσης με το δίκτυο. Στο σημείο διασύνδεσης γίνεται ρύθμιση των επιπέδων της τάσης, της συχνότητας και της άεργου ισχύος με βάση τις απαιτήσεις του δικτύου.

Η καθημερινή λειτουργία ενός αιολικού πάρκου παρακολουθείται και ελέγχεται με τη χρήση ενός συστήματος εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (“Supervisory Control And Data Acquisition”-SCADA). Το σύστημα αυτό συνδέει όλα τα συστατικά μέρη του αιολικού πάρκου σε έναν κεντρικό ηλεκτρονικό υπολογιστή ο οποίος παρέχει τη δυνατότητα στο χειριστή να παρακολουθεί και να ελέγχει τη λειτουργία του αιολικού πάρκου. Το σύστημα παρέχει και αποθηκεύει πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία του αιολικού πάρκου και έτσι μπορούν να εντοπιστούν αστοχίες ή προβλήματα λειτουργίας συγκεκριμένων ανεμογεννητριών. Η μετάδοση των πληροφοριών γίνεται μέσω καλωδίων οπτικών τα οποία ξεκινούν από τους ελεγκτές των ανεμογεννητριών και καταλήγουν στον οικίσκο ελέγχου δημιουργώντας ένα ακτινικό δίκτυο, παρόμοιο με αυτό της μέσης τάσης.

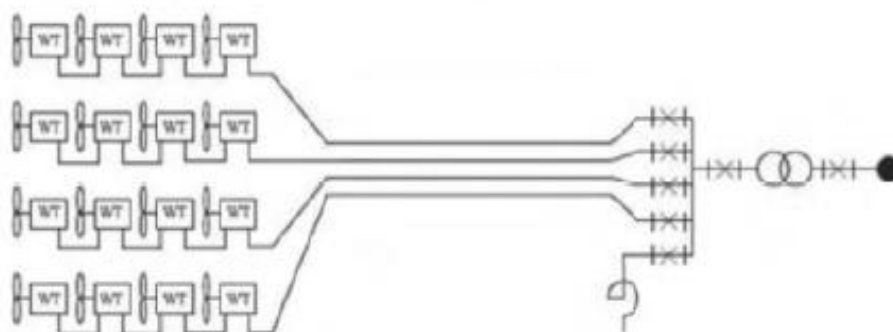
Το σημείο σύνδεσης του αιολικού πάρκου με το δίκτυο έχει ιδιαίτερη σημασία. Οι τρόποι σύνδεσης ποικίλουν ανάλογα με το μέγεθος και το είδος του Α/Π καθώς και με τις αποστάσεις και κατά συνέπεια τα μήκη των καλωδίων της σύνδεσης. Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στις βασικές διασυνδέσεις μεταξύ των αιολικών πάρκων και του δικτύου οι οποίες μπορεί να είναι AC (εναλλασσόμενου ρεύματος) DC (συνεχούς ρεύματος) ή και κάποια μίξη των δύο AC/DC.

### 1) Αιολικά πάρκα με AC σύνδεση

Τα περισσότερα αιολικά πάρκα που έχουν κατασκευαστεί μέχρι σήμερα έχουν ηλεκτρικό σύστημα AC από τις ανεμογεννήτριες στο σημείο σύζευξης με το δίκτυο.

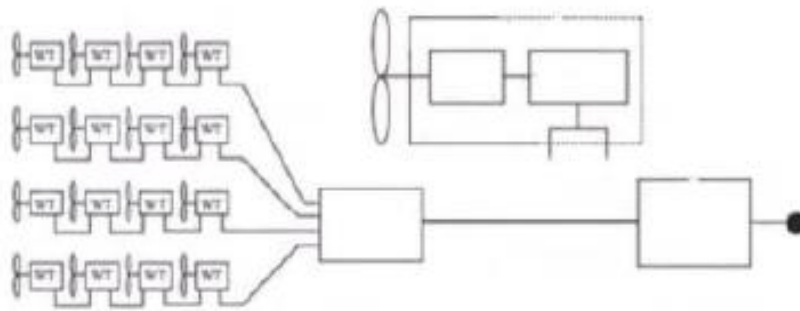
Ανάλογα με το μέγεθος του αιολικού πάρκου υπάρχει περαιτέρω διαχωρισμός σε δύο κατηγορίες.

Η πρώτη αφορά τα μικρά αιολικά πάρκα τα οποία έχουν μικρή απόσταση από το σημείο στο οποίο πρέπει να γίνει η σύνδεση. Το τοπικό δίκτυο των ανεμογεννητριών χρησιμοποιείται τόσο για να συνδέονται ακτινικά οι ανεμογεννήτριες μεταξύ τους, όσο και για τη μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας στο σημείο διασύνδεσης με το δίκτυο. Σε αυτό το σύστημα, τα καλώδια στο τοπικό δίκτυο εγκαθίστανται κατά σειρά ένα προς ένα από τις ανεμογεννήτριες στο σημείο σύνδεσης (κοινός κόμβος). Με αυτήν τη μέθοδο μειώνεται το κόστος της εγκατάστασης μιας και από το σημείο σύνδεσης όλων των ανεμογεννητριών και μετά έχουμε κόστος εγκατάστασης για ένα μόνο καλώδιο.



Εικόνα 4.4: Διάγραμμα σύνδεσης AC μικρού αιολικού πάρκου.

Για τα μεγάλα αιολικά πάρκα, τα χρησιμοποιούμενα συστήματα σύνδεσης είναι πιο παραδοσιακά. Το σύστημα στο οποίο βασίζονται έχει ένα τοπικό δίκτυο ανεμογεννητριών, το οποίο λειτουργεί σε χαμηλότερα επίπεδα τάσης (20kV - 30kV) και είναι συνδεδεμένο σε έναν κοινό μετασχηματιστή και ένα σύστημα μεταφοράς υψηλής τάσης. Για το σύστημα αυτό κάθε καλώδιο έχει το δικό του κόστος εγκατάστασης, μιας και όλα τα καλώδια ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές.

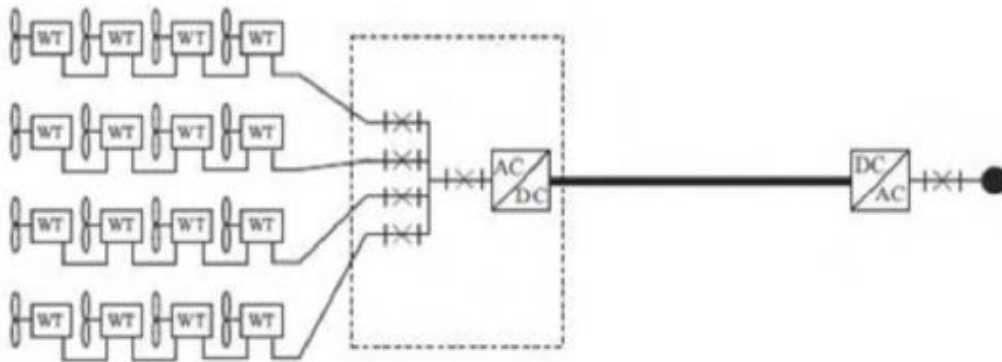


Εικόνα 4.5: Διάγραμμα σύνδεσης AC μεγάλου αιολικού πάρκου.

## II) Αιολικά Πάρκα με AC/DC Σύνδεση

Στο σύστημα αυτό η διαφορά με το προηγούμενο είναι ότι η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από το σημείο ένωσης των ανεμογεννητριών προς το σημείο σύνδεσης με το δίκτυο γίνεται μέσω DC σύνδεσης. Η σύνδεση στα πάρκα αυτά συνήθως αναφέρεται ως AC/DC. Τέτοιου είδους συστήματα προτείνονται όταν το σημείο σύνδεσης με το δίκτυο βρίσκεται μακριά ή αν το τοπικό δίκτυο στο οποίο συνδέεται το πάρκο δεν είναι ισχυρό.

Στο σύστημα αυτό, υπάρχει ένα πλήρως ανεξάρτητο τοπικό AC σύστημα στο οποίο και η τάση αλλά και η συχνότητα είναι πλήρως ελεγχόμενες μέσω ενός μετατροπέα. Το πλεονέκτημα μιας τέτοιας εφαρμογής είναι ότι η αεροδυναμική και ηλεκτρική απόδοση μπορούν να αυξηθούν σημαντικά. Εδώ το κόστος εγκατάστασης των καλωδίων είναι παρόμοιο με αυτό των μεγάλων AC πάρκων. Τα δύο καλώδια που χρησιμοποιούνται για τη DC μεταφορά, ένα για το θετικό πόλο και ένα για τον αρνητικό, συνήθως τοποθετούνται μαζί με αποτέλεσμα να έχει το ίδιο κόστος με το να τοποθετούνταν μόνο ένα.



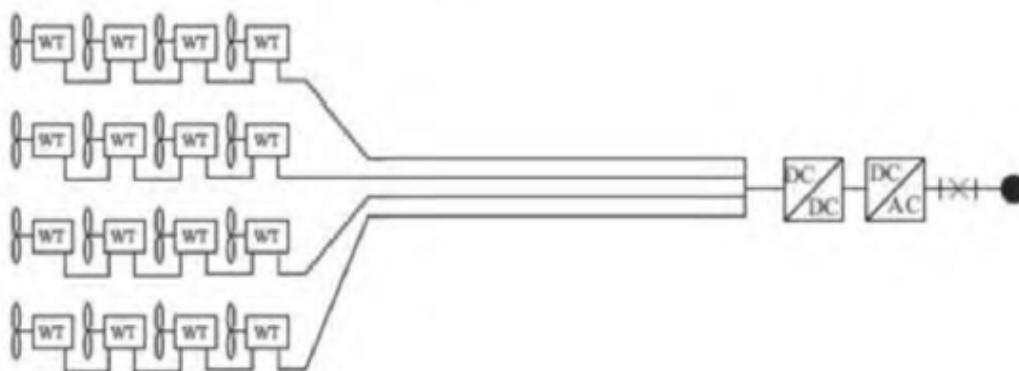
Εικόνα 4.6: Διάγραμμα σύνδεσης αιολικού πάρκου AC/DC.

### III) Αιολικά Πάρκα με DC Σύνδεση

Τα αιολικά πάρκα αυτού του τύπου χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την τοπολογία που χρησιμοποιείται. Οι τρεις διαφορετικές τοπολογίες που υπάρχουν είναι μία για τα μικρά Α/Π, μία για τα μεγάλα Α/Π και μία τρίτη συνδεσμολογία με τις ανεμογεννήτριες συνδεδεμένες σε σειρά.

Η DC διασύνδεση σε μικρό αιολικό πάρκο αποτελεί ένα σύστημα παρόμοιο με αυτό των μικρών πάρκων με AC σύνδεση. Η μόνη διάφορα είναι ότι ο μετασχηματιστής εδώ έχει αντικατασταθεί από έναν DC μετατροπέα και έναν αντιστροφέα.

Προφανώς, είναι απαραίτητη η χρήση ενός ανορθωτή σε κάθε ανεμογεννήτρια για να έχουμε συνεχές ρεύμα. Το πλεονέκτημα των μικρών πάρκων με DC διασύνδεση σε σχέση με τα μεγάλα, είναι το ίδιο που ισχύει και στα μικρά πάρκα με AC διασύνδεση. Το κόστος εγκατάστασης των καλωδίων είναι επίσης αντίστοιχο.

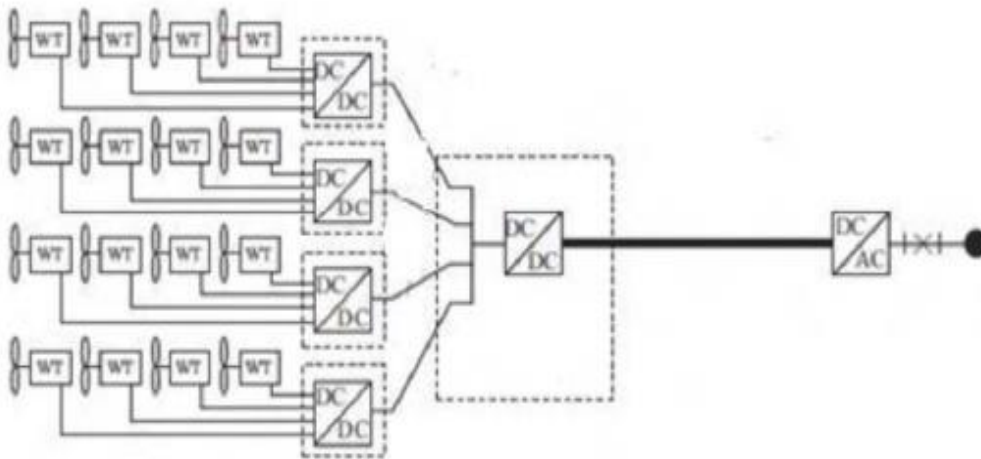


Εικόνα 4.7: Διάγραμμα σύνδεσης DC μικρού αιολικού πάρκου.



Όσον αφορά τώρα τα μεγάλα πάρκα με DC διασύνδεση, αυτά διαφέρουν σχετικά με τα αντίστοιχα AC. Η βασική διαφορά είναι ότι μπορεί να χρειαστούν περισσότεροι του ενός μετατροπείς προκειμένου να φτάσει η τάση των ανεμογεννητριών στο κατάλληλο επίπεδο για μεταφορά. Μόνο όταν η DC τάση των ανεμογεννητριών είναι αρκετά μεγάλη (20kV - 40kV) τότε ένας μετατροπέας μπορεί να είναι αρκετός.

Για χαμηλότερες τιμές (π.χ. 5kV) είναι απαραίτητα τουλάχιστον δυο στάδια μετατροπής. Στην περίπτωση αυτή οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε μικρότερες ομάδες και όλες οι ανεμογεννήτριες σε κάθε ομάδα συνδέονται μία προς μία στο πρώτο επίπεδο μετατροπής. Η πλευρά της υψηλής DC τάσης του μετατροπέα στη συνέχεια συνδέεται σε έναν άλλο μεγαλύτερης ισχύος μετατροπέα στο δεύτερο επίπεδο μετατροπής.

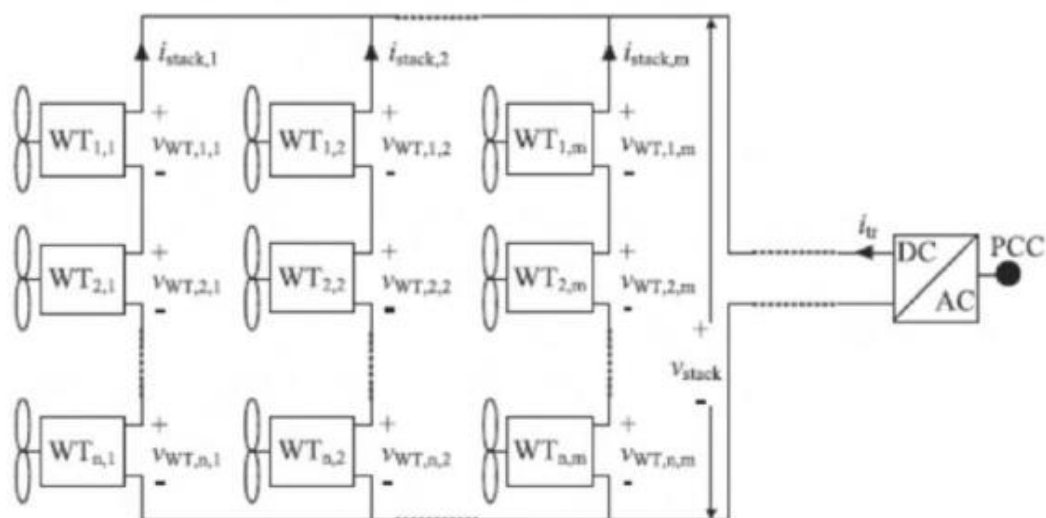


Εικόνα 4.8: Διάγραμμα σύνδεσης DC μεγάλου αιολικού πάρκου.

Στη τρίτη και τελευταία συνδεσμολογία οι ανεμογεννήτριες είναι συνδεδεμένες σε σειρά προκειμένου να μπορούν να παρέχουν την κατάλληλη τάση έτσι ώστε να μπορεί να γίνει απ' ευθείας η μεταφορά. Τα συστήματα αυτού του είδους ονομάζονται εν σειρά DC αιολικά πάρκα. Το πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι παρά το σχετικά μεγάλο μέγεθος του, δεν απαιτείται η χρήση μεγάλων DC μετατροπέων.

Αντίστοιχα, το μειονέκτημα αυτής της τοπολογίας είναι ότι οι DC/DC μετατροπείς στις ανεμογεννήτριες, πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να λειτουργούν σε πολύ υψηλές τιμές τάσεων. Αυτό πρέπει να συμβαίνει γιατί σε περίπτωση που μια ανεμογεννήτρια δεν παρέχει ενέργεια, με αποτέλεσμα να μη μπορεί να παρέχει και

την απαιτούμενη τάση, τότε οι άλλες ανεμογεννήτριες πρέπει να καλύψουν την απώλεια παρέχοντας μεγαλύτερη τάση εξόδου.



Εικόνα 4.9: Διάγραμμα DC σύνδεσης αιολικού πάρκου με τις ανεμογεννήτριες συνδεδεμένες εν σειρά.

#### 4.6 Αιολικά Πάρκα και περιβάλλον

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια θεαματική άνοδος της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος από ανεμογεννήτριες τόσο διεθνώς όσο και στην χώρα μας. Ο μεγάλος ρυθμός ανάπτυξης της αιολικής ενέργειας συνοδεύτηκε, όπως ήταν επόμενο, από την ανησυχία των τοπικών κοινωνιών σχετικά με τις πιθανές επιπτώσεις των ανεμογεννητριών στο περιβάλλον. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι φόβοι που εκφράστηκαν ακούγονται μάλλον υπερβολικοί και κάποιες φορές εξωπραγματικοί. Σε άλλες πάλι περιπτώσεις, οι ενστάσεις που υπάρχουν στην εγκατάσταση ανεμογεννητριών ή αιολικών πάρκων έχουν κάποια βάση και χρειάζονται επιπλέον διερεύνηση. Σε κάθε περίπτωση, πάντως, η αποδοχή ή μη της αιολικής ενέργειας από τις τοπικές κοινωνίες προϋποθέτει την αντικειμενική τους πληροφόρηση για τα οφέλη και τις επιπτώσεις που αυτή θα μπορούσε να έχει ως μία ακόμη επέμβαση του ανθρώπου στη φύση. Θα εξετάσουμε λοιπόν στη συνέχεια τις αναμενόμενες επιπτώσεις στο τοπικό φυσικό περιβάλλον που μπορεί να προκληθούν από τα αιολικά συστήματα οι οποίες διαχωρίζονται στα δύο ξεχωριστά στάδια των έργων: αυτό της κατασκευής και στη συνέχεια της λειτουργίας.

Συνήθως, κατά τη φάση κατασκευής, αναμένονται αρχικά αρνητικές επιπτώσεις στα είδη της χλωρίδας στην περιοχή κατάληψης του έργου (θέσεις ανεμογεννητριών, συνοδά έργα), αλλά οι επιπτώσεις αυτές κρίνονται ασθενείς ως προς την ένταση,

τοπικού χαρακτήρα και είναι σχεδόν ολικά αντιστρεπτές, αφού μετά το πέρας της φάσης κατασκευής είναι δυνατός ο φυσικός επανεποικισμός περιοχών που διαταράχθηκαν και δεν καταλαμβάνονται από τεχνικά έργα. Η οποιαδήποτε φθορά της δασικής βλάστησης με βάση το σχεδιασμό του έργου μπορεί να περιοριστεί στην ελάχιστη δυνατή, ενώ το δασικό περιβάλλον που θα αλλοιωθεί από την όλη επέμβαση μπορεί να αποκατασταθεί, συνήθως με τη χρησιμοποίηση αυτοχθόνων ειδών της περιοχής. Η εγκατάσταση τέτοιων έργων στην Ελλάδα γίνεται συνήθως σε απομακρυσμένες ορεινές περιοχές σε άγονη, ακαλλιέργητη και ανεκμετάλλευτη γη.

Όσον αφορά τη χερσαία πανίδα και αυτή δεν αναμένεται να υποστεί επιπτώσεις από την κατασκευή του έργου. Ενδεχομένως μόνο, κάποια υπάρχοντα κοινά είδη πανίδας, να υποχωρήσουν ελαφρά κατά τη διάρκεια κατασκευής και διαμόρφωσης του αιολικού πάρκου, λόγω των έργων και των δυσμενών συνθηκών (θόρυβοι, σκόνη). Έχει παρατηρηθεί, σε αιολικά πάρκα που λειτουργούν στην Ελλάδα και διεθνώς, ότι η πανίδα μετά τη λήξη των εργασιών επιστρέφει στους φυτικούς βιότοπούς της, διότι στα αιολικά πάρκα δεν υπάρχουν περιφράξεις, παρουσία του ανθρώπου δεν υφίσταται ενώ το ανάγλυφο της περιοχής και η χλωρίδα αποκαθίστανται πλήρως. Η έκταση της καταλαμβανόμενης γης από το αιολικό πάρκο ουσιαστικά αφορά στον οικισμό του κέντρου ελέγχου, τις βάσεις των ανεμογεννητριών και την οποιαδήποτε νέα οδοποιία (εάν χρειάστηκε) και αποτελεί πάρα πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής επιφάνειας του χώρου εγκατάστασης. Έχει αποδειχθεί στο διεθνή χώρο ότι σε ένα αιολικό πάρκο μπορούν να συνυπάρχουν αρμονικά δύο χρήσεις και συγκεκριμένα στο 2% περίπου της επιφάνειάς του οι ανεμογεννήτριες και στο υπόλοιπο 98% η βοσκή ή η αγροτική καλλιέργεια. Επιπρόσθετα, η διάνοιξη της εσωτερικής οδοποιίας σε ένα αιολικό πάρκο καθώς και η τυχόν βελτίωση των οδών προσπέλασης σε αυτό είναι πλέον αποδεκτά ως πλεονέκτημα από τους όποιους άλλους δυνητικούς χρήστες του γηπέδου του αιολικού πάρκου που στη μεγάλη πλειονότητά τους μπορεί να χρησιμοποιηθεί κυρίως για βοσκή.

Κατά τη φάση λειτουργίας τώρα το έργο, λόγω της φύσης του, δε θα επηρεάσει αρνητικά οποιαδήποτε πτυχή της χλωρίδας της περιοχής. Από το σύνολο της πανίδας μόνο τα πουλιά μπορεί να επηρεαστούν από το αιολικό πάρκο κυρίως με θανάτωση (ή τραυματισμό) μετά από προσκρούσεις στους ανεμοκινητήρες. Μακροχρόνιες έρευνες για τα πουλιά έχουν αποδείξει ότι οι θάνατοι (ή τραυματισμοί) από προσκρούσεις σε ανεμογεννήτριες είναι πολύ λιγότεροι από τους θανάτους που προέρχονται από συγκρούσεις πουλιών με διάφορες κατασκευές των ανθρώπων όπως

εναέρια ηλεκτρικά γραμμές, πυλώνες, ιστοί, κινούμενα οχήματα, παράθυρα κτιρίων, κλπ. Συγκεκριμένα, από μελέτες που έχουν γίνει σε ευρωπαϊκές χώρες όπως η Γερμανία, η Ολλανδία, η Δανία και η Αγγλία, υπολογίστηκε ότι στον συνολικό αριθμό πουλιών που σκοτώνονται ετησίως, μόνον 20 θάνατοι οφείλονται σε ανεμογεννήτριες (για εγκατεστημένη ισχύ 1000MW), ενώ αντίστοιχα 1.500 θάνατοι οφείλονται στους κυνηγούς και 2.000 σε πρόσκρουση με οχήματα και τις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (καθότι είναι σχεδόν «αόρατες» για τα πουλιά). Οι επιπτώσεις αυτές συγκριτικά θεωρούνται από πολύ μικρές έως αμελητέες από τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές οργανώσεις του πλανήτη (Greenpeace, WWF, RSPB, κ.ά.). Ασφαλώς βέβαια, το θέμα της προστασίας του πληθυσμού των πουλιών σε ευαίσθητες οικολογικά και προστατευόμενες περιοχές πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη φάση σχεδιασμού και χωροθέτησης του αιολικού πάρκου. Επιπλέον η υγρασία, η θερμοκρασία, η ατμόσφαιρα, τα υπόγεια ύδατα και το κλίμα της περιοχής δεν επηρεάζονται σε καμία περίπτωση από το έργο. Σύμφωνα με τα στοιχεία της διεθνούς βιβλιογραφίας και εμπειρίας σαφώς, μπορεί να λεχθεί ότι η συνήθης ορεινή θέση - βοσκοτόπος του γηπέδου όπου θα εγκατασταθεί το αιολικό πάρκο ευνοεί τη μηδενική επίδραση του πάρκου στην υπόλοιπη πανίδα.

Η τεχνολογία όλων των σύγχρονων ανεμογεννητριών της τάξης των MW (όπως αυτών που πρόκειται να εγκαθίστανται σε τέτοια έργα) είναι ιδιαίτερα υψηλών προδιαγραφών και χρησιμοποιεί προηγμένες τεχνικές μεταβλητών στροφών/αυτόματης ρύθμισης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών που αφενός εξασφαλίζουν τη μέγιστη απόδοση της ισχύος σε κανονική λειτουργία υπό χαμηλές ταχύτητες περιστροφής και αφετέρου εγγυώνται ασφαλή λειτουργία, υποστηρικτική του δικτύου, υπό δυσμενείς συνθήκες λειτουργίας όπως ακόμη και βραχυκυκλωμάτων. Η συχνότητες λειτουργίας όλου του συστήματος ισχύος είναι ιδιαίτερα χαμηλές (μικρότερες των 100Hz) και ως εκ τούτου δεν υφίσταται απολύτως κανένα θέμα «εκπομπής» ηλεκτρομαγνητικής ή οποιασδήποτε άλλης μορφής ακτινοβολίας.

Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο της ηλεκτρογεννήτριας είναι εξαιρετικά ασθενές και περιορίζεται σε μια πολύ μικρή απόσταση γύρω από το κέλυφός της που είναι τοποθετημένο ψηλά στην άτρακτο της ανεμογεννήτριας, τουλάχιστον 50m πάνω από το έδαφος για μία ανεμογεννήτρια των 2MW. Η επίδραση του πεδίου αυτού αποσβένεται εκθετικά με την απόσταση έτσι ώστε ούτε καν κοντά στη βάση της ανεμογεννήτριας να μη δημιουργείται πρόβλημα. Ο μετασχηματιστής, πάλι, όταν δε

βρίσκεται και αυτός στην άτρακτο, περιβάλλεται πάντα από περίφραξη ασφαλείας ή είναι κλεισμένος σε μεταλλικό υπόστεγο. Η περίφραξη είναι τοποθετημένη σε τέτοια απόσταση που το επίπεδο της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι αμελητέο. Μπορούμε λοιπόν να ισχυριστούμε με βεβαιότητα, ότι αυτά που ακούγονται για εκπομπή ραδιενέργειας η ακτινοβολιών άλλου τύπου από τις ανεμογεννήτριες δεν ευσταθούν. Γενικά, τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που εμφανίζονται είναι τα συνήθη ακίνδυνα πεδία που εμφανίζονται στα δεκάδες χιλιάδες χιλιόμετρα του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλής ή μέσης τάσης που τροφοδοτεί και τα σπίτια μας.

Το μόνο πρόβλημα από τις ανεμογεννήτριες προέρχεται από τα κινούμενα πτερύγια που μπορούν να προκαλέσουν αυξομείωση άλλων σημάτων (κυρίως στις συχνότητες εκπομπών FM από τηλεπικοινωνιακούς ή ραδιοτηλεοπτικούς σταθμούς) λόγω ανακλάσεων σε αυτά. Τα πτερύγια των σύγχρονων ανεμογεννητριών όμως κατασκευάζονται από υλικά τα οποία έχουν ελάχιστη επίπτωση στη μετάδοση των σημάτων αυτών εφόσον τηρούνται κάποιες ελάχιστες αποστάσεις από τους αναμεταδότες, πράγμα που άλλωστε προβλέπεται από τη νομοθεσία κατά την αδειοδότηση. Σε σχέση με την συμβατότητα και τις παρεμβολές στις τηλεπικοινωνίες, αξίζει να αναφέρουμε, ότι σε άλλες ευρωπαϊκές χώρες οι πύργοι των ανεμογεννητριών όχι μόνο δεν δημιουργούν εμπόδια, αλλά χρησιμοποιούνται για την εγκατάσταση κεραιών προς διευκόλυνση υπηρεσιών επικοινωνιών, όπως η κινητή τηλεφωνία.

Όσον αφορά στην πιθανή όχληση από εκπομπή θορύβου, θα πρέπει να τονιστεί ότι οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες είναι σχεδόν αθόρυβες. Ο μηχανικός θόρυβος των παλαιότερων μηχανών έχει πρακτικά εκμηδενισθεί, ενώ έχει μειωθεί στο ελάχιστο και ο αεροδυναμικός θόρυβος. Ο θόρυβος που παράγουν είναι διακριτός όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρότερη από 7 – 8 m/s. Σε μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου και σε απόσταση λίγων εκατοντάδων μέτρων από αυτές ο οποιοσδήποτε θόρυβός τους καλύπτεται από το φυσικό θόρυβο του ανέμου που προσπίπτει στο ανάγλυφο του περιβάλλοντος τοπίου (βλάστηση, λόφοι, οικήματα, κλπ). Οι αποστάσεις κάποιων εκατοντάδων μέτρων του γηπέδου που θα εγκατασταθεί το αιολικό πάρκο από τους γύρω οικισμούς σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι προς εγκατάσταση ανεμογεννήτριες ενσωματώνουν όλες τις τελευταίες τεχνολογίες μείωσης του μηχανικού και αεροδυναμικού θορύβου, εξασφαλίζουν ότι το πάρκο δε θα προκαλέσει ιδιαίτερη αύξηση της υπάρχουσας στάθμης θορύβου, πόσο μάλλον

εκτός των νομοθετικά αποδεκτών ορίων. Μόνο κατά τη φάση της κατασκευής, προσωρινή και πλήρως αναστρέψιμη επίπτωση, θα υπάρξει από την παρουσία του εργοταξίου και των μηχανημάτων τόσο στο επίπεδο του θορύβου όσο και στην αλλοίωση του τοπίου.

Οι επιπτώσεις στο τοπίο από την παρουσία του αιολικού πάρκου με μοντέρνες ανεμογεννήτριες χαρακτηρίζονται από τη σαφώς μεγαλύτερη δυνατότητα οπτικής αποδοχής σε σχέση με αυτές παλαιότερης τεχνολογίας, καθότι είναι λεπτές και κομψές στο σχεδιασμό τους, ενώ έχουν ταχύτητα περιστροφής των πτερυγίων τους μικρότερη, γεγονός που δημιουργεί πιο ευχάριστο οπτικό αποτέλεσμα. Γενικότερα, η οπτική όχληση είναι κάτι υποκειμενικό και δύσκολα μπορούν να τεθούν κοινά αποδεκτοί κανόνες. Από έρευνες σε χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης προκύπτει ότι κάποιος που είναι ευνοϊκά διατεθειμένος απέναντι στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, αποδέχεται τις ανεμογεννήτριες και οπτικά πολύ πιο εύκολα από κάποιον που είναι αρνητικός εξαρχής. Από τις ίδιες μελέτες, προκύπτει ότι τα αιολικά πάρκα είναι πιο αποδεκτά από αισθητικής άποψης σε ανθρώπους που είναι ενημερωμένοι για τα οφέλη που προέρχονται από την χρήση τους. Αν κάνουμε μια απλή σύγκριση μεταξύ ενός θερμικού σταθμού παραγωγής (π.χ. λιγνιτικού), και ενός αιολικού πάρκου είναι φανερό ότι η οπτική όχληση που προκύπτει από το πρώτο είναι εμφανώς και αντικειμενικά πολύ μεγαλύτερη. Δεδομένου βεβαίως ότι οι ανεμογεννήτριες είναι κατ' ανάγκη ορατές από απόσταση, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι ιδιαιτερότητες κάθε τόπου εγκατάστασης και να γίνεται προσπάθεια ενσωμάτωσής τους στο τοπίο.



Εικόνα 4.10: Ανεμογεννήτριες και ζώα συνυπάρχουν αρμονικά.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΛΕΤΗ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΧΕΡΣΑΙΩΝ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ**

### **5.1 Κριτήρια χωροθέτησης χερσαίων αιολικών πάρκων**

Η επιλογή της θέσης εγκατάστασης ενός αιολικού πάρκου καθορίζει το σύνολο των επιπτώσεων στο περιβάλλον και τον άνθρωπο, αλλά και την οικονομική αποδοτικότητα της επένδυσης. Έτσι λοιπόν, η επιλογή της θέσης θα πρέπει να γίνεται προσεκτικά, έπειτα από την εξέταση πολλαπλών κριτηρίων και μιας σειράς βημάτων αξιολόγησης που αποσκοπούν στην εύρεση της βέλτιστης θέσης, έτσι ώστε να περιορίζονται οι περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις του έργου.

Τα στάδια που ακολουθούνται για τον προσδιορισμό της θέσης εγκατάστασης, προσδιορίζονται από τον ερευνητή και δεν ακολουθούν κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο. Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, παρουσιάζονται και αναλύονται τα κριτήρια χωροθέτησης των αιολικών πάρκων σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία, με σκοπό την πλήρη κατανόηση των κριτηρίων χωροθέτησης των αιολικών πάρκων που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα κριτήρια πρέπει να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα παραμέτρων οι οποίες εμποδίζουν την ομαλή λειτουργία και αποδοτικότητα του αιολικού πάρκου και που αν δεν ληφθούν υπόψη μπορεί να έχουν αρνητικές συνέπειες στο φυσικό και το ανθρωπογενές περιβάλλον.

Το έτος 2008 εγκρίθηκε το ειδικό πλαίσιο χωροταξικού σχεδιασμού και αειφόρου ανάπτυξης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Σκοπός του είναι η διαμόρφωση πολιτικών χωροθέτησης έργων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και η καθιέρωση κανόνων και κριτηρίων χωροθέτησης με σκοπό τη δημιουργία βιώσιμων εγκαταστάσεων ΑΠΕ με την ταυτόχρονη εξασφάλιση της αρμονικής τους ένταξης στο φυσικό αλλά και το ανθρωπογενές περιβάλλον.

Για την οργάνωση της διαδικασίας χωροθέτησης αιολικών εγκαταστάσεων η επιφάνεια της χώρας χωρίζεται σε κατηγορίες με βάση το εν δυνάμει εκμεταλλεύσιμο αιολικό δυναμικό που διαθέτει καθώς και τα ιδιαίτερα χωροταξικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά που τις συνοδεύουν. Οι μείζονες κατηγορίες είναι η ηπειρωτική χώρα μαζί με την Εύβοια, η μητροπολιτική περιοχή της Αττικής, τα κατοικούμενα νησιά Αιγαίου και Ιονίου πελάγους και τέλος ο υπεράκτιος θαλάσσιος χώρος μαζί με τα χωρίς κατοίκους νησιά. Συμπληρωματικά, η ηπειρωτική χώρα χωρίζεται περαιτέρω σε Περιοχές Αιολικής Προτεραιότητας που διαθέτουν

συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι των υπολοίπων ακολουθούμενες από τις Περιοχές Αιολικής Καταλληλότητας.

Σύμφωνα με το ΕΠΧΣΑΑ για τις ΑΠΕ η χωροθέτηση αιολικών εγκαταστάσεων δεν επιτρέπεται εντός των περιοχών που ονομάζονται «περιοχές αποκλεισμού και ζώνες ασυμβατότητας». Αυτές είναι:

- Οι περιοχές που περιλαμβάνονται σε πολεοδομικά σχέδια ή όρια οικισμών.
- Οι περιοχές που έχουν ανακηρυχθεί ως διατηρητέα μνημεία της παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς, τα μνημείων μικρότερης σημασίας καθώς και οι οριοθετημένες αρχαιολογικές ζώνες προστασίας.
- Οι περιοχές απόλυτης προστασίας της φύσης.
- Οι Υγρότοποι Διεθνούς Σημασίας όπως ορίζονται σύμφωνα με τη συνθήκη Ramsar.
- Οι πυρήνες εθνικών δρυμών, τα μνημεία της φύσης και τα αισθητικά δάση.
- Οι Τόποι Κοινοτικής Σημασίας που ανήκουν στο δίκτυο Natura 2000.
- Οι Περιοχές Οργάνωσης Τουριστικών Δραστηριοτήτων (Π.Ο.Τ.Α) και οι Περιοχές Οργανωμένης Ανάπτυξης Παραγωγικών Δραστηριοτήτων (Π.Ο.Α.Π.Δ) του τριτογενούς τομέα παραγωγής.
- Οι ατύπως διαμορφωμένες (εκτός σχεδίου δόμησης) τουριστικές και οικιστικές περιοχές.
- Οι ακτές κολύμβησης.
- Οι περιοχές που φιλοξενούν λατομεία, και επιφανειακές μεταλλευτικές και εξορυκτικές ζώνες.
- Και τέλος, άλλες περιοχές ή ζώνες που υπάγονται σε ειδικό καθεστώς χρήσεων γης σύμφωνα με το οποίο δεν επιτρέπεται τέτοιου είδους εγκατάσταση.

Επιπροσθέτως, σύμφωνα με το ΕΠΧΣΑΑ των ΑΠΕ, η χωροθέτηση κάθε εγκατάστασης αιολικού πάρκου οφείλει να πληροί καθορισμένες ελάχιστες αποστάσεις από τις γειτνιάζουσες δραστηριότητες, χρήσεις γης και δίκτυα τεχνικών υποδομών. Οι αποστάσεις αυτές διευκρινίζονται στον πίνακα 1 του παραρτήματος.

Περαιτέρω των κριτηρίων που θέτει το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο, σημαντικό ρόλο έχουν τα κριτήρια χωροθέτησης που χρησιμοποιούνται σε μελέτες χωροθέτησης χερσαίων αιολικών πάρκων παγκοσμίως.



Σύμφωνα με την επισκόπηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής, τα κριτήρια που συναντώνται ομαδοποιούνται και παρουσιάζονται ακολούθως.

### **1. Τεχνοοικονομικά κριτήρια**

Στην κατηγορία των τεχνοοικονομικών κριτηρίων χωροθέτησης εντάσσονται κριτήρια που αφορούν τόσο την αποδοτικότητα εγκατάστασης του αιολικού πάρκου όσο και τη δυνατότητα της εγκατάστασης αυτής.

- Ταχύτητα ανέμου

Η συμμετοχή της παραμέτρου της ταχύτητας του ανέμου στη διαδικασία χωροθέτησης ενός αιολικού πάρκου αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση τόσο για την εκτίμηση της καταλληλότητας κάθε μελετώμενης υποψήφιας θέσης όσο και για τον προσδιορισμό της παραγωγικότητας και οικονομικής αποδοτικότητας των ανεμογεννητριών που πρόκειται να εγκατασταθούν.

Οι διερευνώμενες μελέτες χωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες. Αυτές που θέτουν όρια αποκλεισμού περιοχών με βάση τη μέση ταχύτητα ανέμου και αυτές που στα πλαίσια της πολυκριτηριακής ανάλυσης που διεξάγουν αξιολογούν τις υποψήφιες περιοχές χωροθέτησης ανάλογα με αυτή. Αναλυτικότερα, στις διερευνώμενες μελέτες που θέτουν ελάχιστη ταχύτητα ανέμου ως μέσο αποκλεισμού περιοχών, η ελάχιστη απαραίτητη ταχύτητα ανέμου διαφέρει μεταξύ τους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι μελέτες των Baban et al (2001) και Γραμματικογιάννης et al (2010) που θέτουν ως ελάχιστη τιμή τα 7 m/s. Σε αντίθεση με αυτό το σχετικά υψηλό ελάχιστο όριο ταχύτητας ανέμου, οι Latinopoulos και Kechagia (2015) θέτουν ως κατώτατη αποδεκτή τιμή ταχύτητας ανέμου τα 4,5 m/s και οι Tegou et al (2010) τα 4 m/s αμφότεροι για την περιοχή της Λέσβου.

- Κλίση εδάφους

Η κλίση του εδάφους αποτελεί σημαντικό παράγοντα χωροθέτησης ενός αιολικού πάρκου καθ' όσον επηρεάζει σημαντικά την ευκολία πρόσβασης και κατασκευής του κατά συνέπεια και το κόστος της. Παρ' όλο που στη βιβλιογραφία συναντώνται διαφορετικά όρια κλίσης, η συντριπτική πλειοψηφία θέτει ως όριο το 10%. Σημεία αναφοράς αποτελούν οι μελέτες των Watson et al (2015) με περιοχή μελέτης τις

κεντρικές και νότιες περιοχές του Ηνωμένου Βασιλείου, Al-Yahyai (2012) που αφορά τη χώρα του Ομάν και Georgiou et al (2012) που αφορά την περιοχή της Λάρνακας στην Κύπρο.

- Υψόμετρο

Παρ' ότι λιγοστές, συναντώνται μελέτες στις οποίες κατά τη διαδικασία της επιλογής της βέλτιστης θέσης χωροθέτησης ενός αιολικού πάρκου λαμβάνεται υπ' όψιν ο παράγοντας του υψομέτρου. Συνήθως η μεταβλητή του υψομέτρου συμπεριλαμβάνεται όταν οι περιοχές μελέτης περικλείουν υποπεριοχές μεγάλου υψομέτρου. Οι περιοχές αυτές είναι επιθυμητό να αποφεύγονται αφού το υψόμετρο είναι αντιστρόφως ανάλογο με την πυκνότητα του αέρα άρα και με την ζητούμενη αιολική ενέργεια. Παραδείγματα μελετών που χρησιμοποιούν την παράμετρο του υψομέτρου είναι η μελέτη των Noorollahi et al. (2016) με όριο υψομέτρου τα 2 χιλιόμετρα και περιοχή μελέτης το δυτικό Ιράν, των Kazim et al. (2015) που θέτουν ως όριο τα 1500 μέτρα στη μελέτη τους για τμήμα του Τουρκικού χώρου και των Wang et al. (2014) που προτείνουν ως όριο τα 1000 μέτρα για την περιοχή Φουκουσίμα της Ιαπωνίας.

- Απόσταση από υποδομές μεταφορικών δικτύων

Τόσο για την κατασκευή όσο και για τη συντήρηση κάθε αιολικού πάρκου είναι απαραίτητη η σύνδεση του με το οδικό δίκτυο. Για το λόγο αυτό, όσο μικρότερη απόσταση έχει από τη ήδη υπάρχον, τόσο μικρότερο θα είναι το κόστος κατασκευής του τμήματος που υπολείπεται. Στο σύνολο των μελετών προσδιορισμού προτεινόμενων περιοχών χωροθέτησης αιολικών πάρκων, προτείνονται οι περιοχές με τη μικρότερη δυνατή απόσταση. Η μέγιστη απόσταση χωροθέτησης ενός αιολικού πάρκου από το υπάρχον οδικό δίκτυο ορίζεται από τους εκάστοτε μελετητές και επηρεάζεται άμεσα από το υπάρχον οδικό δίκτυο στην κάθε περιοχή μελέτης.

Οι προτεινόμενες μέγιστες αποστάσεις ξεκινούν από τα 100 μόλις μέτρα στη μελέτη των Sliz-Szkliniarz (2010) και τα 200 μέτρα στις Latinopoulos και Kechagia (2015) και αυξάνονται φτάνοντας τα 10 χιλιόμετρα στις Baban et al. (2001) και Tegou et al. (2007). Στο σύνολο τους, οι περιοχές πλησίον των οδικών δικτύων προτείνονται έναντι των πιο απομακρυσμένων.

- Απόσταση από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Η σύνδεση κάθε αιολικού πάρκου με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελεί τόσο απαραίτητη όσο και κοστοβόρα διαδικασία. Γι αυτό το λόγο, κατά τη διαδικασία επιλογής χωροθέτησης ενός αιολικού πάρκου, οι περιοχές με άμεση πρόσβαση προτιμώνται ανάλογα με την απόσταση αυτή και οι απομακρυσμένες από το ηλεκτρικό δίκτυο αποκλείονται.

Η απόσταση από το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται ως κριτήριο χωροθέτησης στις περισσότερες μελέτες. Η διαφοροποίηση γίνεται στα όρια που θέτει κάθε μελετητής σε κάθε περιοχή μελέτης. Για παράδειγμα, στη μελέτη της Tegou et al. (2007), η μέγιστη απόσταση ορίζεται στα 10 χιλιόμετρα για το νησί της Λέσβου. Σε αντίθεση με το σχετικά υψηλό όριο των 10 χιλιομέτρων, οι Sliz-Szkliniarz et al. (2011) θέτουν ως περιορισμό τα 200 μόλις μέτρα στη μελέτη τους για την Πολωνία.

Όπως προκύπτει, τα όρια που τίθενται από τους μελετητές εξαρτώνται άμεσα από την έκταση και την προσβασιμότητα στο ήδη υπάρχον δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας ανά περιοχή.

- Απόσταση από αερολιμένες

Κύρια μέριμνα στις μελέτες χωροθέτησης αιολικών πάρκων είναι η ασφάλεια των κατοίκων αλλά και των χρηστών των περιοχών γύρω από τις εγκαταστάσεις. Για το λόγο αυτό και λόγω του μεγάλου ύψους των ανεμογεννητριών, η απόσταση από τα γειτονικά αεροδρόμια χρησιμοποιείται ως κριτήριο επιλογής της θέσης τους. Όσο μεγαλύτερη η απόσταση κάθε πιθανής θέσης εγκατάστασης ενός αιολικού πάρκου τόσο καλύτερη η αξιολόγηση της ανάμεσα στο σύνολο τους.

Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η ανεπηρέαστη διαθεσιμότητα του εναέριου χώρου. Η ζώνη αποκλεισμού που προτείνεται γύρω από τα αεροδρόμια ορίζεται στις μελέτες των Wang et al. (2014), των Bennui et al. (2007) και των Latinopoulos και Kechagia (2015) στα 3 χιλιόμετρα. Άλλα παραδείγματα μελετών όπως οι μελέτες των Effat et al. (2014) και Wang et al. (2014) η ακτίνα αποκλεισμού ορίζεται στα 2,5 χιλιόμετρα.

## **2. Περιβαλλοντικά κριτήρια**

- Απόσταση από περιοχές αυξημένου οικολογικού ενδιαφέροντος

Η χωροθέτηση ενός χερσαίου αιολικού πάρκου είναι θεμιτό πρωταρχικά να μη συμπίπτει αλλά ακόμα καλύτερα να διατηρεί αποστάσεις από περιοχές με αυξημένο οικολογικό ενδιαφέρον με σκοπό την προφύλαξη της ευαίσθητης οικολογικής ισορροπίας τους. Αναλυτικότερα, για να μη διαταραχθεί οποιοσδήποτε οργανισμός ή η ισορροπία τους, οι μελετητές καθορίζουν μια ακτίνα περιμετρικά των χώρων οικολογικού ενδιαφέροντος ανάλογα με το πόσο ευπαθείς αυτός κρίνεται.

Ενώ η πλειοψηφία των μελετών προστατεύουν τα ευαίσθητα οικοσυστήματα διατηρώντας αποστάσεις του ενός χιλιομέτρου στις περισσότερες περιπτώσεις (Baban et al., 2001; Latinopoulos και Kechagia, 2015; Watson et al., 2015), η μελέτη των Tegou et al. (2010) για τη Λέσβο περιορίζεται στο να μη συμπίπτουν οι υποψήφιες περιοχές χωροθέτησης με τις προστατευόμενες περιοχές προστασίας που έχουν καθοριστεί και ανήκουν στο δίκτυο Natura 2000.

- Απόσταση από επιφανειακούς υδάτινους όγκους

Οι υδάτινοι επιφανειακοί όγκοι αποτελούν κατά κάποιο τρόπο προστατευόμενες περιοχές λόγω της σημαντικότητάς τους αφού αποτελούν συνήθως και καταφύγια άγριας ζωής. Αυτή προκύπτει από την χλωρίδα και την πανίδα που φιλοξενείται σε αυτές τις περιοχές. Ακόμα, ο ρόλος τους ως συλλέκτες νερού είναι σημαντικός και για τα υπόλοιπα κοντινά σε αυτούς οικοσυστήματα και τη διατήρησή τους.

Για να προφυλαχθούν οι υγρότοποι αυτοί, κρίνεται απαραίτητο να διατηρείται μια απόσταση ανάμεσα σε αυτούς και τα αιολικά πάρκα. Ειδικότερα, η μελέτη των Bennui et al. (2007) σχεδιάζει ένα σύστημα χωροθέτησης με βάση το οποίο αποκλείονται οι περιοχές με απόσταση μικρότερη των 200 μέτρων και προτείνονται αυτές με τη μεγαλύτερη. Ακόμα, οι Baban et al. (2001) και οι Tegou et al. (2007) οριοθετούν μια ζώνη αποκλεισμού εγκατάστασης αιολικού πάρκου σε απόσταση 400 μέτρων από τα όρια των υδάτινων όγκων.

Αυξημένα όρια παρουσιάζονται στις μελέτες των Noorollahi et al. (2016) για το Ιράν και των Wang et al. (2014) για την περιοχή Φουκουσίμα της Ιαπωνίας που τα θέτουν σε 500 μέτρα.

### **3. Κοινωνικά κριτήρια**

Κάθε κριτήριο χωροθέτησης που στηρίζεται στην απόσταση των προτεινόμενων προς χωροθέτηση περιοχών από σημεία με αυξημένο κοινωνικό ενδιαφέρον σχετίζεται άμεσα με την κοινωνική αποδοχή την οποία είναι επιθυμητό να επιτυγχάνει κάθε

απόφαση παρέμβασης στο χώρο. Τόσο τα κριτήρια αποκλεισμού όσο και της αξιολόγησης αποτελούν ικανά εργαλεία ανάδειξης της κοινωνικής διάστασης των χωρικών αποφάσεων. Με βάση την κοινή αποδοχή της παραπάνω θέσης, οι μελετητές προτείνουν η εγκατάσταση αιολικών πάρκων να πραγματοποιείται διατηρώντας απόσταση από τα σημεία κοινωνικού ενδιαφέροντος.

- Απόσταση από οικιστικά σύνολα και κατοικημένες περιοχές

Η χωροθέτηση ενός αιολικού πάρκου σε κοντινή απόσταση από ένα οικιστικό σύνολο είναι σχεδόν σίγουρα ικανή να διαταράξει τις συνθήκες ζωής σε αυτό. Γι' αυτό το λόγο στις μελέτες χωροθέτησης χρησιμοποιούνται τόσο ζώνες αποκλεισμού γύρω από τις κατοικημένες περιοχές όσο και ένα σύστημα που χρησιμοποιεί το κριτήριο της απόστασης από κατοικημένες περιοχές όχι για τον αποκλεισμό αλλά για την αξιολόγηση μέσω της υψηλότερης βαθμολόγησης των περιοχών ανάλογα με την απόσταση τους από αυτές. Αναφορικά με το μέγεθος των ζωνών που εφαρμόζονται περιμετρικά των οικιστικών συνόλων, διαφέρει σημαντικά και κυμαίνεται από 500 μέτρα έως και 2,5 χιλιόμετρα.

- Απόσταση από τοποθεσίες αυξημένου κοινωνικού ενδιαφέροντος

Οι χώροι ιστορικής σημασίας αποτελούν περιοχές σημαντικές για το κοινωνικό σύνολο μιας και έχουν τόσο ιστορική όσο και πολιτιστική αλλά και συναισθηματική αξία για τα μέλη των κοινωνιών τις οποίες αφορούν.

Η μελέτη των Tsoutsos et al. (2014) που αφορά την Κρήτη αποτελεί ορόσημο μιας και υιοθετεί κριτήριο αποκλεισμού της τάξης των 3000 μέτρων απόστασης από ιστορικά σημεία με παγκοσμίως αναγνωρισμένη μεγάλη αξία και σημασία για το κοινωνικό σύνολο τα οποία αναφέρονται στον κατάλογο των χαρακτηρισμένων ως ιστορικής σημασίας χώρων του Υπουργείου Πολιτισμού και Τουρισμού της Ελλάδας (νυν Υπουργείο Πολιτισμού και Αθλητισμού). Ο καθορισμός της απόστασης ακολουθεί τους κανόνες χωροθέτησης που αναφέρονται στο Ειδικό Χωροταξικό Σχέδιο των ΑΠΕ για την Ελλάδα. Για τα πολιτισμικά μνημεία και τους αρχαιολογικούς χώρους οριοθετεί ακτίνα αποκλεισμού σε απόσταση 500 μέτρων από αυτά.

- Απόσταση από περιοχές με τουριστική δραστηριότητα

Οι περιοχές με τουριστική δραστηριότητα θεωρούνται ευαίσθητα οικοσυστήματα αφού επηρεάζουν την οικονομική ευρωστία των περιοχών στις οποίες αναπτύσσεται. Για το λόγο αυτό κρίνεται απαραίτητο από τους μελετητές των οποίων οι περιοχές μελέτης έχουν ανεπτυγμένη τουριστική δραστηριότητα ή θα ήθελαν να έχουν, το τοπίο των περιοχών να προστατεύεται από παρεμβάσεις μεγάλου μεγέθους όπως η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου. Παρ' όλη τη διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών των περιοχών μελέτης, τόσο η μελέτη των Bennui et al. (2007) όσο των Latinopoulos και Kechagia (2015) και των Tsoutsos et al. (2015) αποκλείουν από το ενδεχόμενο χωροθέτησης το σύνολο των περιοχών που απέχουν λιγότερο από 1000 μέτρα από τις περιοχές τουριστικής ανάπτυξης και τουριστικών υποδομών. Τόσο για την παραθαλάσσια περιοχή μελέτης της Ταυλάνδης όσο και της Λέσβου και της Κρήτης, το κριτήριο αποκλεισμού είναι το ίδιο.

## 5.2 Έργα υποδομής

Τα έργα υποδομής είναι τα εξής:

### Οδοποιία

Το πιο βασικό έργο υποδομής είναι η οδοποιία. Οι δρόμοι πρόσβασης στο χώρο εγκατάστασης πρέπει να επιτρέπουν τη διέλευση των φορτηγών που μεταφέρουν τα τμήματα των ανεμογεννητριών. Συνήθως, στις ορεινές περιοχές η οδοποιία περιορίζει και το μέγεθος των μηχανών που δεν μπορεί να υπερβεί το 1MW. Μια τυπική διατομή οδοποιίας ενός αιολικού πάρκου φαίνεται στο επόμενο σχήμα και είναι τύπου Δ με επίκλιση στις ευθυγραμμίες 2,5%. Οι κλίσεις των πρανών είναι μεγάλη λόγω της μεγάλης ευστάθειας του εδάφους. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της οδού είναι:

- Πλάτος 5 m
- Κατηγορία C
- Ταχύτητα  $V_c$  50 km/h
- Μέγιστη κλίση 2%

Στην άκρη του δρόμου και από την πλευρά του πρανούς, υπάρχει συνήθως το κανάλι των υπογείων καλωδίων, μπαζωμένο με υλικά λατομείου. Το οδόστρωμα είναι επίσης από συμπιεσμένο υλικό λατομείου (3A), πάχους 10 cm.

Επίσης κατασκευάζεται εσωτερική οδοποιία από ανεμογεννήτρια σε ανεμογεννήτρια με τυπικό πλάτος 4 με 5 μέτρα.

#### «Πλατείες»

Στη βάση κάθε ανεμογεννήτριας είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί μια «πλατεία» (περί το ένα στρέμμα) για τη συναρμολόγηση του ρότορα και την ανέγερση της μηχανής. Ο χώρος της πλατείας αποψιλώνεται και συμπυκνώνεται ώστε να είναι ασφαλής η χρήση των γερανών και των άλλων μηχανημάτων. Μετά την εγκατάσταση, το μεγαλύτερο μέρος της πλατείας μπορεί να αποκατασταθεί με επανατοποθέτηση της φυτικής γης που απομακρύνθηκε, φυτεύσεις κλπ.

#### Ηλεκτρικά δίκτυα

Για τη σύνδεση των μηχανών με το κέντρο ελέγχου / υποσταθμό ανύψωσης τάσης κατασκευάζεται εσωτερικό δίκτυο μέσης τάσης (20.000 V). Το δίκτυο αυτό είναι υπόγειο και οδεύει κατά μήκος της εσωτερικής οδοποιίας. Για τη μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας κατασκευάζεται εξωτερικό δίκτυο μέσης ή (συνήθως) υψηλής τάσης (140 KV) από τον υποσταθμό μέχρι τη γραμμή υψηλής τάσης της ΔΕΗ. Το δίκτυο αυτό είναι εναέριο.

### **5.3 Βέλτιστη τοποθέτηση ανεμογεννητριών**

Σύμφωνα με την κείμενη νομοθεσία, για μία γραμμική ανάπτυξη Α/Γ, εκτός ορίων οικισμών και εκτός ζώνης οικιστικού ελέγχου, η ελάχιστη οριζόντια απόσταση του ακροπερυγίου από τα όρια του οικοπέδου πρέπει να απέχει μισή ακτίνα, δηλαδή απόσταση του κέντρου της Α/Γ από τα όρια 1,5 ακτίνα. Σύμφωνα με το ειδικό πλαίσιο χωροταξικού σχεδιασμού για τις ΑΠΕ η ελάχιστη απόσταση (Α) μεταξύ των Α/Γ με ανάπτυγμα κάθετα στην κατεύθυνση του κυρίαρχου ανέμου είναι 2,5 φορές τη διάμετρο (d) της φτερωτής της Α/Γ ( $A=2.5d$ ). (‘Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης’, 2008)

Σύμφωνα με το εν λόγω ειδικό πλαίσιο, η παράμετρος που θα καθορίσει την κάλυψη ανά Α/Γ είναι η διάμετρος του ρότορα. Σημειώνεται ότι η επίδραση στο τοπίο και γενικότερα η επίπτωση που προκαλεί μία Α/Γ από περιβαλλοντικής και χωροταξικής άποψης, εξαρτάται από τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά τα οποία δεν συνδυάζονται με την ονομαστική της ισχύ. Περαιτέρω, η διάμετρος του ρότορα

καθορίζει σχεδόν μονοσήμαντα όλα τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της Α/Γ (ύψος πυλώνα, πλάτος πυλώνα, μέγεθος ατράκτου κλπ.).

## 5.4 Εργασίες εγκατάστασης

### Οδοποιία



Εικόνα 5.1: Οδοποιία.

### Διαμόρφωση πλατείας



Εικόνα 5.2: Διαμόρφωση πλατείας.



## Θεμελίωση ανεμογεννητριών



Εικόνα 5.3: Θεμελίωση ανεμογεννητριών.

## Μεταφορά ανεμογεννητριών



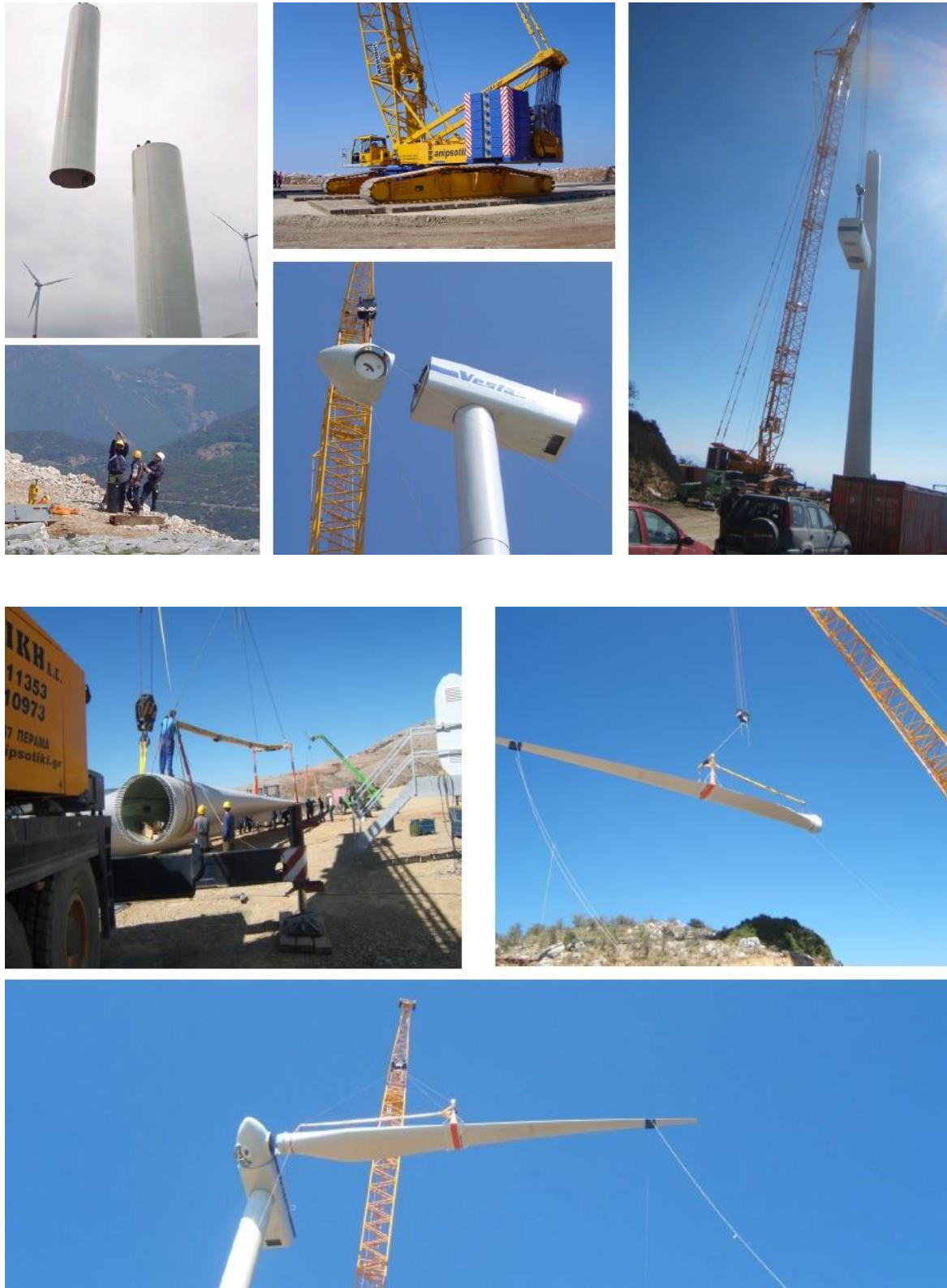
Εικόνα 5.4: Μεταφορά ανεμογεννητριών.

## Ανέγερση ανεμογεννητριών 850 kW



Εικόνα 5.5: Ανέγερση ανεμογεννητριών 850 kW.

## Ανέγερση ανεμογεννητριών 2 MW



Εικόνα 5.6: Ανέγερση ανεμογεννητριών 2 MW.

### Στο εσωτερικό μιας ανεμογεννήτριας



Εικόνα 5.6: Στο εσωτερικό μιας ανεμογεννήτριας.

### Μετασχηματιστής



Εικόνα 5.7: Μετασχηματιστής.

## Γειώσεις



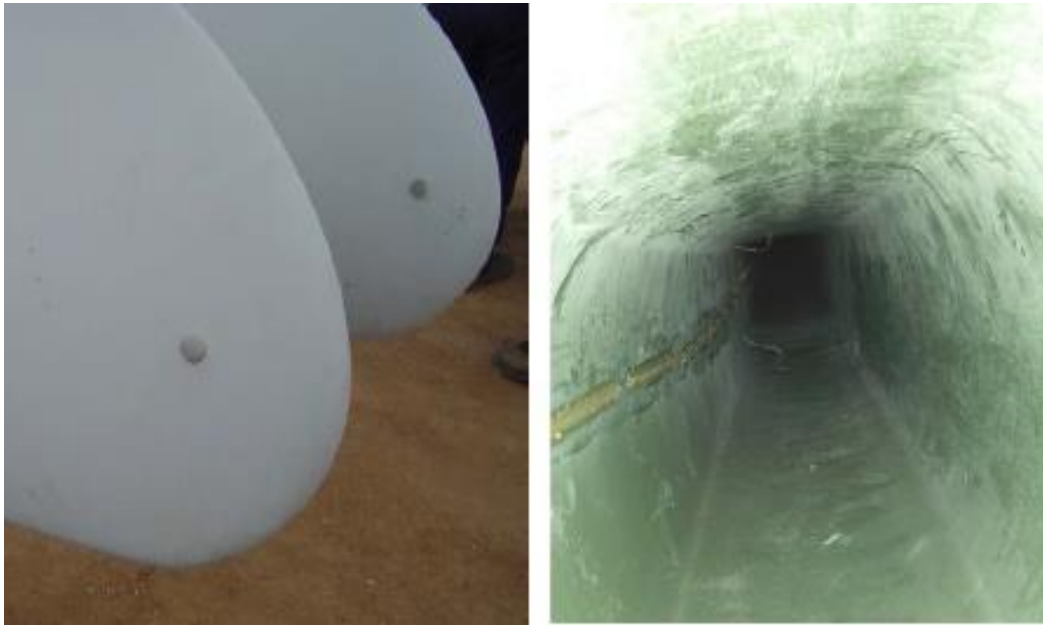
Εικόνα 5.8: Γειώσεις.

## Υποσταθμός



Εικόνα 5.9: Υποσταθμός.

## Αντικεραυνική προστασία



Εικόνα 5.10: Αντικεραυνική προστασία.

## Συνθήκες λειτουργίας και δυσχέρειες



Εικόνα 5.11: Συνθήκες λειτουργίας και δυσχέρειες.

## 5.5 Κύριος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός

Ο κύριος ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός ενός αιολικού πάρκου αποτελείται από ανεμογεννήτριες με τους αντίστοιχους υποσταθμούς ανύψωσης χαμηλής τάσης τον κεντρικό υποσταθμό μέσης τάσης και τον υποσταθμό υψηλής τάσης.

Όλες οι σύγχρονες εμπορικές ανεμογεννήτριες είναι οριζόντιου άξονα. Παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλής τάσεως 400 έως 1000 Volt, το οποίο με την κατάλληλη ανύψωση, διοχετεύεται στο δίκτυο μέσης ή υψηλής τάσεως της ΔΕΗ. Η ανύψωση στη μέση τάση γίνεται μέσω μετασχηματιστών για κάθε ανεμογεννήτρια ξεχωριστά. Ο μετασχηματιστής αυτός βρίσκεται πλησίον των ανεμογεννητριών ή εντός του πυλώνα αυτών.

Στις μεγάλες ανεμογεννήτριες συχνά τοποθετούνται στη κορυφή του πυλώνα, μαζί με τα υπόλοιπα εξαρτήματα της ανεμογεννήτριας.

Το μέγεθος των σημερινών εμπορικών ανεμογεννητριών κυμαίνεται από 800 Kw έως Mw. Τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά μερικών εξ αυτών καθώς και των αντίστοιχων υψηλής τάσης ανύψωσης παρουσιάζονται στην συνέχεια.



Εικόνα 5.12: Α/Γ Νο 1 .

### **Α/Γ Νο 1**

Τύπος/κατασκευαστής: NEG-Micon 750/48 (Δανία)

Ονομ. ισχύς: 750 kW

Διάμετρος/ύψος πύργου: 48.0 m/46.0 m

Ταχύτητα περιστροφής: 22 και 14 RPM

Έλεγχος ισχύος: Αεροδυναμική αποκόλληση (stall controlled)

Ενέργεια σε μέση ταχ. 7,0 m/s: 1.850 MWh/έτος

### **Υ/Σ**

Τύπος/κατασκευαστής: Ελαίου/Schneider Electric Ελλάς

Ονομ. ισχύς: 1000 kVA

Ονομ. Τάση: 0.69/20 kV

Τάση βραχυκυκλώσεως: 5.84 %



Εικόνα 5.13: Α/Γ Νο 2.



## **Α/Γ No 2**

Τύπος/κατασκευαστής: Enercon E-48 (Γερμανία)

Ονομ. ισχύς: 800 kW

Διάμετρος/ύψος πύργου: 48.0 m/46.0 m

Ταχύτητα περιστροφής: 16 έως 32 RPM

Ύψος πτερυγίου από έδαφος: 72.0 m/24.0 m

Έλεγχος ισχύος: Μεταβλητό βήμα - μεταβλητές στροφές (pitch controlledvariable speed)

Ενέργεια σε μέση ταχ. 7,0 m/s: 2.180 MWh/έτος



Εικόνα 5.14: Α/Γ No 3.

### **Α/Γ Νο 3**

Τύπος/κατασκευαστής: Vestas V90 (Δανία)

Ονομ. ισχύς: 3000 kW

Διάμετρος/ύψος πύργου: 90.0 m/90.0 m

Ταχύτητα περιστροφής: 10 έως 14 RPM

Ύψος πτερυγίου από έδαφος: 135.0 m/45.0 m

Βάρος ολικό: 290 t

Έλεγχος ισχύος: Μεταβλητό βήμα - μεταβλητές στροφές (pitch controlled variable speed)

Ενέργεια σε μέση ταχ. 7,0 m/s: 7.000 MWh/έτος



Εικόνα 5.15: Α/Γ Νο 4.

#### **A/Γ No 4**

Τύπος/κατασκευαστής: Enercon E-112 (Γερμανία)

Ονομ. ισχύς: 4.500 έως 6.000 kW

Διάμετρος/ύψος πύργου: 114.0 m/124.0 m

Ταχύτητα περιστροφής: 8 έως 13 RPM

Ύψος πτερυγίου από έδαφος: 180.0 m/68.0 m

Έλεγχος ισχύος: Μεταβλητό βήμα μεταβλητές στροφές (pitch controlled variable speed)

### **5.6 Κεντρικός υποσταθμός μέσης τάσης**

Ο κεντρικός υποσταθμός μέσης τάσης είναι το σημείο διασύνδεσης όλων των ανεμογεννητριών και περιλαμβάνει τον Αυτόματο Διακόπτη Διασύνδεσης (ΑΔΔ) του αιολικού πάρκου (ο οποίος είναι ένας αυτόματος διακόπτης ισχύος) με έναν αποζεύκτη και τους μετασχηματιστές τάσεως και εντάσεως, τους διακόπτες φορτίου των αναχωρήσεων προς τις ανεμογεννήτριες.

Ο Αυτόματος Διακόπτης Διασύνδεσης ελέγχεται από έναν ελεγκτή βιομηχανικού τύπου μέσω των μετασχηματιστών τάσεως και εντάσεως. Ο ελεγκτής αυτός, εκτός από την προστασία, παρέχει τη δυνατότητα τηλεχειρισμού του Αυτόματο Διακόπτη Διασύνδεση και ρυθμίζεται σύμφωνα με τις απαιτήσεις της ΔΕΗ.



Εικόνα 5.16: Τυπικός υποσταθμός μέσης τάσης 0,4/15kV.

## 5.7 Υποσταθμός υψηλής τάσης

Ο υποσταθμός υψηλής τάσης συνδέει το αιολικό πάρκο με το δίκτυο μεταφοράς του Συστήματος. Πρόκειται για συμβατικό υποσταθμό, ο οποίος κατασκευάζεται πλησίον ή μακράν του αιολικού πάρκου. Σε έναν τέτοιο υποσταθμό μπορούν να συνδεθούν και άλλα αιολικά πάρκα. Στην Ελλάδα, κατασκευάζονται σε υψόμετρα κάτω των 1000 μέτρων, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ΔΕΗ, ενώ για μεγαλύτερα υψόμετρα απαιτείται εξοπλισμός ειδικών προδιαγραφών.

Τα βασικά μέρη ενός υποσταθμού υψηλής τάσης είναι ο μετασχηματιστής, ο διακόπτης ισχύος, οι μετασχηματιστές τάσεως και εντάσεως, διάφοροι αποζεύκτες και γειωτές, η μονάδα αντιστάθμισης αέργου ισχύος και οι πίνακες ελέγχου.



Εικόνα 5.17: Τυπικός υποσταθμός υψηλής τάσης 50.000 KVA, 150/21 Kv.

## 5.8 Βοηθητικός εξοπλισμός

Ο βοηθητικός ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός είναι απαραίτητος για την λειτουργία και συντήρηση του αιολικού πάρκου. Αποτελείται από τα παρακάτω:

- Ηλεκτρικό δίκτυο μέσης τάσης και δίκτυο επικοινωνίας (υπόγεια)

- Δίκτυο Υψηλής Τάσης
- Εξοπλισμός οικίσκου ελέγχου
- Μετασχηματιστές υπηρεσίας 50 kVA
- Τηλεφωνικές γραμμές

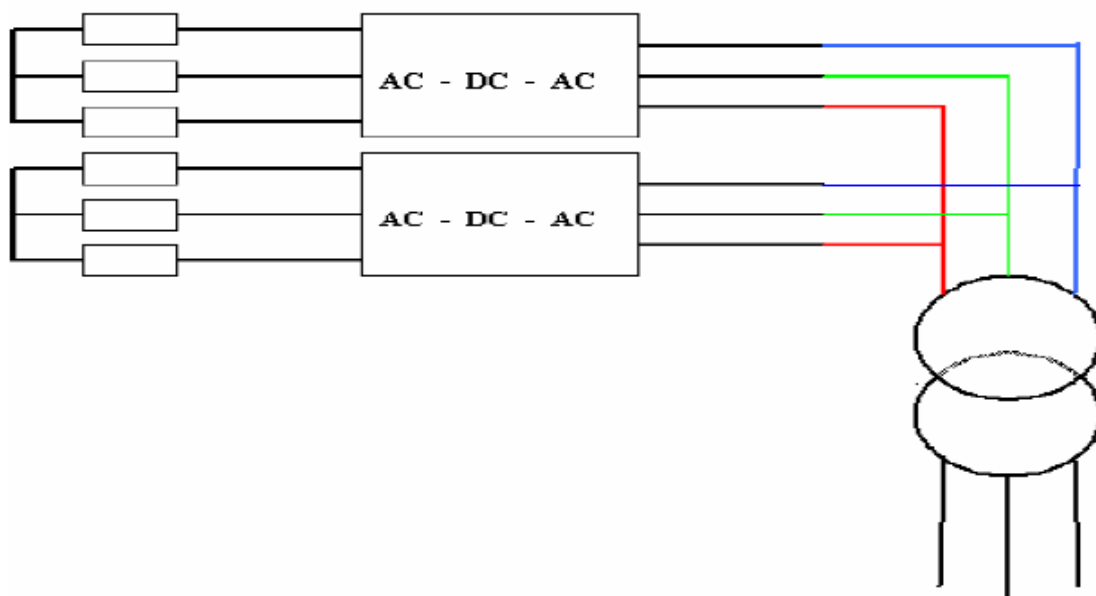
## **5.9 Διασύνδεση Αιολικών Πάρκων με το εθνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος**

Δύο από τους τρόπους διασύνδεσης αιολικών πάρκων με το δίκτυο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι είτε μέσω ηλεκτρονικών μετατροπών ισχύος είτε κατευθείαν. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η πρώτη περίπτωση βασιζόμενοι στον τρόπο διασύνδεσης των ανεμογεννητριών μιας γνωστής γερμανικής εταιρείας ανεμογεννητριών.

Οι ανεμογεννήτριες που κατασκευάζει η συγκεκριμένη εταιρεία έχουν το χαρακτηριστικό ότι η κάθε ηλεκτρογεννήτρια (σύγχρονη) είναι απευθείας οδηγούμενη (direct-driven) από τον ανεμοκινητήρα. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της εταιρείας η τάση που παράγει η μηχανή είναι η ονομαστική (400V) εφόσον ο δρομέας (A/K) περιστρέφεται μέσα στην περιοχή επιτρεπτών ταχυτήτων του και το μόνο μέγεθος που μεταβάλλεται είναι η συχνότητα που παράγει η γεννήτρια, η οποία είναι διαφορετική από 50Hz. (Λόγω του χαρακτηριστικού της ηλεκτρογεννήτριας να διατηρεί σταθερή την τάση της η εταιρεία έχει δώσει ένα ιδιαίτερο όνομα στις γεννήτριες και τις ονομάζει ring generators). Η ταχύτητα περιστροφής του ανεμοκινητήρα εξαρτάται από την ταχύτητα του αέρα.

Συνεπώς για να υπάρχει σύνδεση με το δίκτυο είναι απαραίτητη η ύπαρξη διπλής γέφυρας με ηλεκτρονικά ισχύος, ο λεγόμενος ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος. Ο τελευταίος αναλαμβάνει το ρόλο του συγχρονισμού της σύγχρονης μηχανής με το ισχυρό δίκτυο αφού φροντίζει να οδηγεί στην έξοδο την τάση που παράγει η σύγχρονη γεννήτρια και να μετατρέπει τη συχνότητά της σε 50Hz που είναι η ονομαστική τιμή. Όσον αφορά την τάση που παράγει η σύγχρονη γεννήτρια το ύψος εξαρτάται εκτός της ταχύτητας περιστροφής του δρομέα και από τη διέγερσή του, δηλαδή από το μαγνητικό πεδίο. Η διέγερση φροντίζει ώστε η τάση που παράγεται από τη σύγχρονη γεννήτρια να είναι σταθερή.

Η ανεμογεννήτρια της εν λόγω εταιρείας συνδέεται με το δίκτυο μέσω δύο ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος. Ο λόγος ύπαρξης των δύο ηλεκτρονικών μετατροπέων είναι επειδή υπάρχουν 6 φάσεις στη σύγχρονη γεννήτρια. Ο τρόπος σύνδεσης των τυλιγμάτων της σύγχρονης γεννήτριας με τους ηλεκτρονικούς μετατροπέες ισχύος και κατόπιν με το δίκτυο είναι αυτός που φαίνεται στην εικόνα 5.18. Βλέπουμε από το εν λόγω σχήμα ότι τα τυλίγματα της μηχανής είναι συνδεδεμένα σε αστέρα ανά τρία.



Εικόνα 5.18: Σύνδεση της Σ.Μ. μέσω ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος με το δίκτυο διανομής.

Στη συνέχεια τα τυλίγματα συνδέονται με τον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος και καταλήγουν στο μετασχηματιστή αύξησης τάσης. Όσον αφορά την λειτουργία των ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος θα γίνει μια σύντομη περιγραφή του ενός και τα ίδια ισχύουν και για τον άλλο.

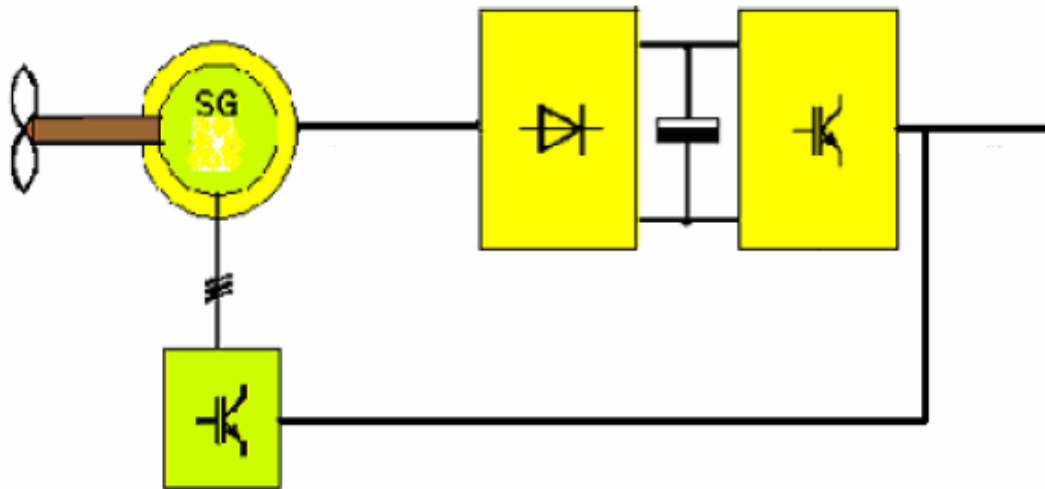
Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος αυτός είναι Ε.Ρ.-Σ.Ρ.-Ε.Ρ. (AC-DCAC) ο οποίος όπως φαίνεται και από την εικόνα 5.19 αποτελείται από δύο μέρη, το μετατροπέα Ε.Ρ.-Σ.Ρ. που είναι στη μεριά της μηχανής, και το μετατροπέα που είναι στη μεριά του δικτύου Σ.Ρ.-Ε.Ρ. Ο μετατροπέας στη μεριά της μηχανής είναι ανορθωτής δηλαδή Ε.Ρ.-Σ.Ρ. ο οποίος μετατρέπει την εκάστοτε εναλλασσόμενη τάση που βγάζει η μηχανή σε συνεχή. Η ανόρθωση γίνεται με διόδους ισχύος όπως φαίνεται στο εν λόγω σχήμα, συνεπώς δεν υπάρχει η δυνατότητα αντιστροφής της φοράς του ρεύματος. Παρόλ' αυτά αν αυτό χρειαζόταν θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί γέφυρα με IGBT ή με αντιπαράλληλες διόδους ισχύος.

Στην πλευρά του μετατροπέα στην οποία επικρατεί συνεχής τάση υπάρχουν και κατάλληλοι πυκνωτές οι οποίοι εξομαλύνουν και διατηρούν σταθερή την τάση. Εν συνεχεία ο μετατροπέας που είναι στην πλευρά του δικτύου είναι γέφυρα με IGBT η οποία είναι ο αντιστροφέας δηλαδή μετατρέπει με κατάλληλο κύκλωμα παλμοδότησης τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη με χαρακτηριστικά 400V-50Hz.

Όσον αφορά την εκκίνηση της σύγχρονης μηχανής αυτή γίνεται με τη βοήθεια του ανέμου ο οποίος έχει το ρόλο της κινητήριας δύναμης. Εφόσον η ταχύτητα του ανέμου είναι κατάλληλη δηλαδή ίση με την ταχύτητα σύζευξης τότε ο ανεμοκινητήρας αρχίζει και περιστρέφεται. Εν συνεχεία με ξεχωριστό κύκλωμα διέγερσης το οποίο όπως φαίνεται στην εικόνα 5.19 αποτελείται από ένα ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος E.P.-Σ.P. ο οποίος ανορθώνει την τάση του δικτύου και τη μετατρέπει σε συνεχή η οποία τελικά θα αποτελέσει τη διέγερση του δρομέα. Καθώς η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται ο εν λόγω μετατροπέας παρακολουθεί τις αλλαγές στην ταχύτητα του A/K και ρυθμίζει ανάλογα τη διέγερση ώστε η τάση να είναι αυτή που πρέπει.

Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος δεν παίζει μόνο το ρόλο που είδαμε, αλλά ρυθμίζει και την άεργο ισχύ της γεννήτριας. Σε περίπτωση που στη μεριά του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος που είναι στο δίκτυο παρατηρηθεί μείωση της τάσης τότε θα μειωθεί και η τάση στην περιοχή του μετατροπέα που επικρατεί συνεχής τάση και κατόπιν η τάση της γεννήτριας, οπότε ο μετατροπέας μέσω πολυάριθμων μικροελεγκτών δίνει εντολή στο κύκλωμα διέγερσης να αυξηθεί το ρεύμα διέγερσης στο δρομέα της σύγχρονης μηχανής οπότε αντίστοιχα θα ανεβεί η τάση της γεννήτριας και η συχνότητα και η γεννήτρια θα τροφοδοτήσει τελικά το δίκτυο με άεργο ισχύ.

Έτσι ο μετατροπέας με τον τρόπο αυτό καθορίζει και τον τρόπο λειτουργίας της σύγχρονης γεννήτριας (χωρητικά ή επαγωγικά).



Εικόνα 5.19: Ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος Α/Γ.

Ο μετατροπέας εκτός από το να πραγματοποιεί όσα αναφέρθηκαν παραπάνω πρέπει να φροντίζει ώστε οι στροφές του ανεμοκινητήρα να είναι κατάλληλες ώστε να πετυχαίνεται λειτουργία του (ανεμοκινητήρα) στο μέγιστο  $C_p$  για κάθε ταχύτητα ανέμου. Συνεπώς απαιτείται να υπάρχουν τέτοιες στροφές του δρομέα ώστε να υπάρχει το  $\lambda_{opt}$  και το  $C_{popt}$ .

Αυτό είναι ευθύνη του αντιστροφέα αφού ρυθμίζει την ενεργό ισχύ που στέλνεται στο δίκτυο συνεπώς με βάση τον τύπο:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot (M_{WIND} - M_{ELEC})$$

επηρεάζεται ο αριθμός περιστροφής του δρομέα. Ο αναγνώστης πρέπει να λάβει υπόψη του ότι η βέλτιστη ταχύτητα  $\Omega_{opt}$  περιστροφής του δρομέα είναι συνάρτηση της ταχύτητας του ανέμου, της ακτίνας του πτερυγίου, της γωνίας pitch και πολλών άλλων παραμέτρων. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος προκειμένου να πετύχει όλα τα παραπάνω πρέπει να επικοινωνεί με πολλαπλούς μικροελεγκτές και φυσικά με τον κεντρικό επεξεργαστή της ανεμογεννήτριας ώστε να πετυχαίνει την αποδοτικότερη, συμφέρουσα και ασφαλέστερη λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Χρειάζεται να επισημανθεί ότι η απρόσκοπτη και εύρυθμη λειτουργία μιας ανεμογεννήτριας και ενός αιολικού πάρκου γενικότερα βασίζεται κυρίως στο θέμα του αεροδυναμικού ελέγχου, ελέγχου ηλεκτρικής ισχύος και εσωτερικού ελέγχου κάθε Α/Γ.



Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος δεν είναι ανεξάρτητος από τα υπόλοιπα μέρη της ανεμογεννήτριας και βρίσκεται σε διαρκή ανταλλαγή δεδομένων διάφορους μικροελεγκτές.

Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας επικοινωνεί και με τον έλεγχο “pitch” ο οποίος όπως τονίστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο βοηθά στην εκκίνηση του ανεμοκινητήρα και ρυθμίζει την αεροδυναμική ισχύ όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική ταχύτητα του δρομέα. Ο έλεγχος “pitch” επικοινωνεί με τον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος μέσω της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας της ανεμογεννήτριας.

Γενικά μπορούμε να πούμε ότι η καρδιά όλων των υποσυστημάτων είναι ο κεντρικός ελεγκτής της ανεμογεννήτριας όπου αν κάτι δεν πάει καλά γίνεται αυτοδιάγνωση και προσπάθεια για διόρθωση του σφάλματος, ειδάλλως υπάρχει κατάσταση εκτάκτου ανάγκης, δίνει εντολή να σταματήσει πλήρως η περιστροφή του ανεμοκινητήρα και του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος.

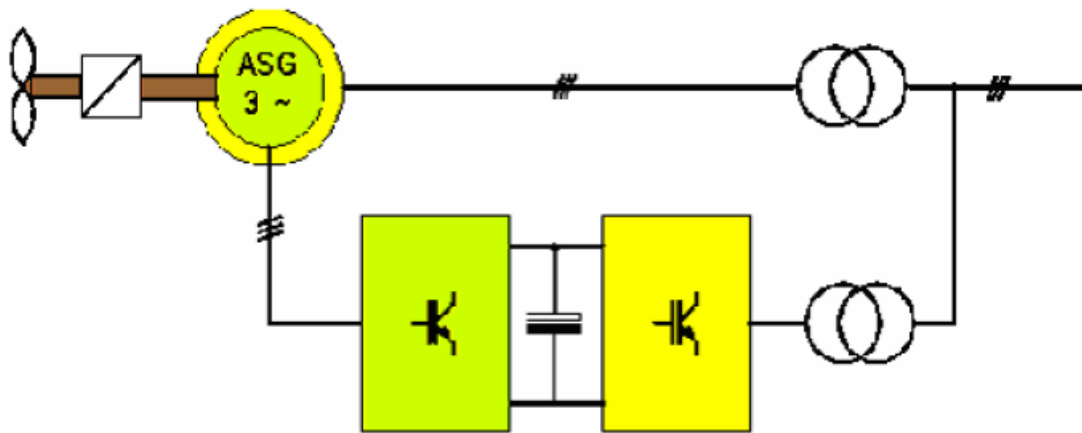
Η λειτουργία τόσο του ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος όσο και η γενικότερη λειτουργία της ανεμογεννήτριας είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία που γνωρίζει μόνο η κατασκευάστρια εταιρεία και μόνο αυτή.

### **Διασύνδεση Αιολικών Πάρκων μεγάλης ισχύος**

Στην ενότητα αυτή θα γίνει περιγραφή του τρόπου της κατευθείαν διασύνδεσης ανεμογεννητριών με το δίκτυο. Η περιγραφή βασίζεται στον τρόπο διασύνδεσης των ανεμογεννητριών γνωστής δανέζικης εταιρείας

Οι ανεμογεννήτριες αυτής της εταιρείας χρησιμοποιούν ασύγχρονη γεννήτρια δακτυλιοφόρου δρομέα. Σύμφωνα με το ενημερωτικό φυλλάδιο του κατασκευαστή ένας χονδρικός τρόπος σύνδεσης φαίνεται στην εικόνα 5.20. Σύμφωνα με αυτό βλέπουμε ότι η ασύγχρονη μηχανή είναι διπλά τροφοδοτούμενη (double-fed). Η γεννήτρια είναι έχει ονομαστικά στοιχεία  $U_n=690V$ ,  $I_n=711A$ ,  $n=1620$  σ.α.λ. Από το σχήμα βλέπουμε ότι ο στάτης είναι κατευθείαν συνδεδεμένος με το δίκτυο ενώ ο δρομέας είναι συνδεδεμένος με ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος. Ο τελευταίος αποτελείται από μια διπλή γέφυρα από στοιχεία IGBT.

Το σύστημα αυτό άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως πρόσφατα στα αιολικά συστήματα (μεταβλητών στροφών).



Εικόνα 5.20: Ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος Α/Γ.

Το κύριο πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος διαπερνάται από ένα ποσοστό της ισχύος της τάξης του 20-30% της συνολικής ισχύος και συνεπώς εμφανίζονται λιγότερες απώλειες σε σχέση με ένα σύστημα απευθείας οδηγούμενο από τον ανεμοκινητήρα. Επίσης το κόστος του ηλεκτρονικού μετατροπέα είναι μικρότερο σε σχέση με αυτό του μετατροπέα σε αιολικά πάρκα όπως είδαμε πριν και δεν χρειάζεται εξωτερικό κύκλωμα διέγερσης αφού αυτή προέρχεται απευθείας από το «δίκτυο».

Η ηλεκτρική γεννήτρια είναι δακτυλιοφόρου δρομέα η οποία είναι διπλά τροφοδοτούμενη και φαίνεται στην εικόνα 5.20. Ως γνωστόν μία μέθοδος μετατόπισης των καμπυλών ροπής-στροφών είναι μέσω διάφορων αντιστάσεων. Ο τρόπος αυτός εκτός του ότι εμφανίζει πολλές απώλειες (ωμικές) δεν έχει και τη δυνατότητα ενεργητικού ελέγχου δηλαδή δεν μπορεί ανά πάσα στιγμή η τιμή της αντίστασης να αλλάζει τόσο λόγω συνδεσμολογίας της όσο και λόγω έλλειψης επικοινωνίας με το υπόλοιπο κύκλωμα.

Αντίθετα με τον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος E.P.-Σ.P.-E.P. ο οποίος ουσιαστικά παίζει τον ρόλο των αντιστάσεων, δεν υπάρχουν ωμικές απώλειες και υπάρχει ανά πάσα στιγμή δυνατότητα ρύθμισης σε μεγάλο εύρος της ροπής εκκίνησης της γεννήτριας μετατοπίζοντας την καμπύλη ροπής-στροφών δεξιά ή αριστερά ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα. Με αυτό τον τρόπο εκτός του ότι υπάρχει η δυνατότητα εκμετάλλευσης ακόμα και των πιο χαμηλών ταχυτήτων αέρα (εφόσον είναι πάνω από την ταχύτητα σύζευξης), και ταυτόχρονα προστατεύεται η ηλεκτρική γεννήτρια από την εμφάνιση υψηλών ρευμάτων κατά την εκκίνηση.

Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος έχει τη δυνατότητα ανά πάσα στιγμή να επικοινωνεί με την Κεντρική Μονάδα Ελέγχου της ανεμογεννήτριας και ρυθμίζει τη συμπεριφορά του σύμφωνα με τις εντολές που λαμβάνει από αυτή (ΚΜΕ). Έτσι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος αλλάζοντας ουσιαστικά την αντίσταση του δρομέα αλλάζει το μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό της μηχανής και πετυχαίνει τη μετακίνηση της καμπύλης  $C_p$ - $\lambda$  στην επιθυμητή τιμή  $\lambda_{opt}$  όπου υπάρχει μέγιστο  $C_p$ . Με αυτό τον τρόπο η ανεμογεννήτρια παρακολουθεί τις αλλαγές του ανέμου και προσαρμόζει τη λειτουργία της. Χάρη στον ηλεκτρονικό μετατροπέα ισχύος υπάρχει μεγάλο εύρος ρύθμισης της τάσης και συνεπώς της αέργου ισχύος.

Συνοψίζοντας, οι λόγοι που δικαιολογούν την ευρεία εφαρμογή των ασύγχρονων διπλά τροφοδοτούμενων ηλεκτρικών γεννητριών είναι ότι οι ηλεκτρονικοί μετατροπείς ισχύος που χρησιμοποιούν εμφανίζουν λιγότερες απώλειες αφού έχουν να διαχειριστούν μικρό μέρος της συνολικής ισχύος 20-30% και το κόστος τους είναι μικρότερο σε σχέση με τον μετατροπέα που χρησιμοποιείται σε απευθείας οδηγούμενες από τον ανεμοκινητήρα σύγχρονες μηχανές. Βέβαια με το μετατροπέα που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα έχουμε πιο αξιόπιστη λειτουργία της ανεμογεννήτριας αφού αυτός αναλαμβάνει εξ ολοκλήρου τη σύνδεση με το δίκτυο άρα μπορεί να υπάρχει άμεσος έλεγχος ενώ εδώ έχουμε κατευθείαν σύνδεση μεταξύ γεννήτριας και δικτύου.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το κλειδί της επίλυσης του ενεργειακού προβλήματος είναι η προώθηση “πράσινων” τεχνολογιών φιλικών προς το περιβάλλον, που θα επιτρέψουν τη μείωση της εξάρτησης από το συνεχώς αυξανόμενο σε κόστος, περιβαλλοντικά και οικονομικά, πετρέλαιο και την αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.

Σε αυτό το πλαίσιο η επιστημονική κοινότητα προσπαθεί να δώσει λύσεις στην προώθηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, τόσο σε ζητήματα που αφορούν τη χωροθέτηση μονάδων παραγωγής ενέργειας, όσο και σε θέματα βελτίωσης στη μετατροπή της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε ηλεκτρική.

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μία ανεξάντλητη πηγή ενέργειας και ιδιαίτερα για χώρες με υψηλό αιολικό δυναμικό όπως η Ελλάδα. Η ενεργειακή εκμετάλλευση του ανέμου γίνεται μέσω των ανεμογεννητριών οι οποίες χωροθετούνται κατάλληλα όπως αναφέραμε και δημιουργούνται τα αιολικά πάρκα. Η χωροθέτηση αιολικού πάρκου αποτελεί επίσης ένα σημαντικό κριτήριο για την ορθή προώθηση των ΑΠΕ. Ένα αιολικό πάρκο αποτελεί μία μεγάλη και πολύπλοκη ανάπτυξη από άποψη κατασκευής και λειτουργίας.

Τα οφέλη που προκύπτουν από την χρήση της αιολικής ενέργειας:

1. Ο άνεμος είναι μια ανεξάντλητη πηγή ενέργειας, η οποία μάλιστα παρέχεται δωρεάν.
2. Η αιολική ενέργεια είναι μια τεχνολογία ώριμη, οικονομικά ανταγωνιστική και φιλική προς το περιβάλλον ενεργειακή επιλογή.
3. Προστατεύει τη Γη κάθε μια κιλοβατώρα που παράγεται από τον άνεμο αντικαθιστά μία κιλοβατώρα που παράγεται από συμβατικούς σταθμούς και ρυπαίνει την ατμόσφαιρα με αέρια του θερμοκηπίου.
4. Δεν επιβαρύνει το τοπικό περιβάλλον με επικινδύνους αέριους ρύπους, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου, καρκινογόνα μικροσωματίδια κ.α, όπως γίνεται με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
5. Ενισχύει την ενεργειακή ανεξαρτησία και ασφάλεια κάτι ιδιαίτερα σημαντικό για την χώρα μας και την Ευρώπη γενικότερα.
6. Βοηθά στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος μειώνοντας τις απώλειες μεταφοράς ενέργειας.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Βιβλία**

- [1] Petersson, A., Analysis, Modeling and Control of DFIG for WT, Chalmers Department of Technology, Goteborg, 2005.
- [2] Αλεξιάκης, Α., Αιολική Ενέργεια, Αθήνα, 2002.
- [3] Ασημακόπουλος, Δ. και Αραμπατζής, Γ., Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, δυναμικό & τεχνολογίες, Θεσσαλονίκη, 2015.
- [4] Γραμματικογιάννης, Η. και Στρατηγέα, Α., Μεθοδολογία Αξιολόγησης Εναλλακτικών Θέσεων Χωροθέτησης Αιολικού Πάρκου, Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, 2010.
- [5] Καούρης, Ι., Συστήματα αιολικής ενέργειας, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Πάτρα, 2016.
- [6] Καπανταϊδάκη, Ε. και Τσούτσος, Θ., Ανάλυση κύκλου ζωής αιολικών συστημάτων στο ελληνικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής, Χανιά 2006.
- [7] Καλδέλλης, Ι., Διαχείριση της Αιολικής Ενέργειας, Αθήνα, 1999.
- [8] Μπεργελές, Γ., Ανεμοκινητήρες, Αθήνα, 1994.
- [9] Μπιτζιώνης, Β. και Μπιτζιώνης, Δ., Εναλλακτικές μορφές ενέργειας, Εκδόσεις Τζιόλα, 2010.
- [10] Παστρωμάς, Σ. Α., Διπλωματική Εργασία: Μελέτη συστημάτων μετατροπής αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική-Κατευθείαν σύνδεση ανεμογεννητριών με το δίκτυο και σύνδεση μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, Πάτρα, 2005.
- [11] Πετροχίλου, Β., Χωροθέτηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας: Η ελληνική πραγματικότητα, Θεσσαλονίκη, 2011.
- [12] Σουσουνής, Μ., Συμβολή στον έλεγχο ανεμογεννητριών μόνιμων μαγνητών με τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Αθήνα, 2011.

### **Ιστοσελίδες**

- [13] <http://www.ypeka.gr/>
- [14] <http://www.rae.gr>
- [15] [www.desmie.gr](http://www.desmie.gr)
- [16] [www.hellasres.gr](http://www.hellasres.gr)
- [17] <http://www.cres.gr/>
- [18] <http://www.kee.gr>

- [19] <http://www.allaboutenergy.gr>
- [20] [www.ewea.org](http://www.ewea.org)
- [21] <https://gwec.net>
- [22] <https://www.vestas.com>
- [23] <https://www.enercon.de/en/>