



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΩΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΩΣ ΑΠΕ



Σκαλτσής Νικόλαος

Επιβλέπουσα: Μαρία Γ. Ιωαννίδου | Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2016





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

## ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΩΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΩΣ ΑΠΕ

Σκαλτσής Νικόλαος

Επιβλέπουσα: Μαρία Γ. Ιωαννίδου | Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Μαρία Παρασκευή Ιωαννίδου  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

\_\_\_\_\_  
Νικόλαος Θεοδώρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

\_\_\_\_\_  
Παναγιώτης Τσαραμπάρης  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2016

.....  
Νικόλαος Δ. Σκαλτσής

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Νικόλαος Δ. Σκαλτσής, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016 στα πλαίσια περάτωσης των προπτυχιακών σπουδών μου στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την καθηγήτρια Ε.Μ.Π κυρία Μαρία Γ. Ιωαννίδου για την άρτια συνεργασία που είχαμε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας καθώς και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου , αναθέτοντάς τη μου.

Επιπλέον, δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τους γονείς μου Δημήτρη και Μαρία και την αδελφή μου Τερέζα για την ανεξάντλητη στήριξη τους κατά τη διάρκεια ολοκλήρωσης αυτής της διπλωματικής εργασίας αλλά και του συνόλου των σπουδών μου.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής είναι η αξιοποίηση των πλωτών ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή στην πράσινη ανάπτυξη , στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε) και στα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια γενική αναφορά στην αιολική ενέργεια ενώ αναλύονται και κάποια βασικά στοιχεία της αεροδυναμικής.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται μια εκτενής αναφορά για τις ανεμογεννήτριες , αναλύονται οι κατηγορίες Α/Γ , η δομή καθώς και τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτών.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται αναλυτικά οι πλωτές ανεμογεννήτριες , τα επιμέρους μέρη από τα οποία αποτελούνται , ο τρόπος λειτουργίας τους όπως και το κόστος κατασκευής και συντήρησης τους.

## Λέξεις κλειδιά

Πλωτή Ανεμογεννήτρια, ΑΠΕ, αιολική ενέργεια.

## **ABSTRACT**

The object of this dissertation is the development of floating wind turbines to produce electricity.

Chapter 1 gives an introduction to green growth, renewable energy sources (RES) and the advantages and disadvantages.

Chapter 2 is a general reference to wind energy are analyzed and some basics of aerodynamics.

Chapter 3 gives a detailed report on wind turbines analyzed grades of wind turbines, the structure and the advantages and disadvantages of these.

Chapter 4 presents the floating wind turbines, the individual parts of which they consist, their mode of operation as the cost of construction and maintenance.

## **Keywords**

Float turbine, renewable energy sources, wind power.



## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>7</b>
<b>Κεφάλαιο 1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....</b>	<b>11</b>
1.1 Τι είναι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	11
1.2 Στόχος αξιοποίησης Α.Π.Ε σε ευρωπαϊκό επίπεδο.....	11
1.3 Μορφές Α.Π.Ε.....	12
1.4 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Α.Π.Ε.....	18
1.5 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.....	20
1.5.1 Αποθήκευση ενέργειας με μπαταρίες.....	20
1.5.2 Αποθήκευση ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα.....	21
1.5.3 Μαγνητική υπεραγώγιμη αποθήκευση ενέργειας.....	21
1.5.4 Αποθήκευση ενέργειας με σφόνδυλο.....	22
1.5.5 Αποθήκευση ενέργειας με αντλιοστάσιο.....	23
1.5.6 Αποθήκευση ενέργειας με υπερπυκνωτή.....	23
<b>Κεφάλαιο 2. Αιολική ενέργεια και Άνεμος.....</b>	<b>24</b>
2.1 Αιολική ενέργεια.....	24
2.1.1 Ιστορική αναδρομή.....	24
2.1.2 Παρούσα συνεισφορά.....	24
2.1.3 Η αιολική ενέργεια στην ελληνική αρχαιότητα.....	25
2.1.4 Ανάλυση αιολικής ενέργειας.....	26
2.1.5 Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας.....	26
2.1.6 Σενάρια για τη χρήση αιολικής ενέργειας παγκοσμίως.....	29
2.2 Άνεμος χαρακτηριστικά και χρήση του.....	30
2.3 Βασικά στοιχεία αεροδυναμικής.....	34
<b>Κεφάλαιο 3. Ανεμογεννήτριες και είδη ανεμογεννητριών.....</b>	<b>36</b>
3.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.....	36
3.1.1 Είδη ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα.....	37
3.1.2 Μέρη ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα.....	38
3.1.3 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα.....	43
3.2 Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα.....	44
3.2.1 Είδη ανεμογεννητριών κάθετου άξονα.....	45
3.2.1.1 Darrieus ανεμογεννήτρια.....	45

3.2.1.2 Savonius ανεμογεννήτρια.....	46
3.2.2 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα ανεμογεννητριών κάθετου άξονα.....	47
3.3 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών.....	48
3.4 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών.....	48
<b>Κεφάλαιο 4. Πλωτές Ανεμογεννήτριες.....</b>	<b>49</b>
4.1 Τι είναι οι πλωτές ανεμογεννήτριες.....	49
4.2 Μοντέλα πλωτών ανεμογεννητριών.....	51
4.2.1 Tension Leg Platform.....	52
4.2.2 Semi-sub.....	53
4.2.3 Spar Βυογ.....	53
4.3 Τρόποι αγκυροβόλησης Π.Α.....	55
4.4 Απαιτούμενοι έλεγχοι στις Π.Α.....	58
4.4.1 Αεροδυναμικός έλεγχος ισχύος.....	58
4.4.2 Έλεγχος απωλειών.....	61
4.4.3 Έλεγχος φορτίων.....	62
4.5 Παράκτια και Υπεράκτια αιολικά πάρκα.....	65
4.6 Κόστος κατασκευής και συντήρηση.....	69
<b>Συμπεράσματα.....</b>	<b>73</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>74</b>

## **Κεφάλαιο 1. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας**

### **1.1 Τι είναι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας**

Ως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ορίζονται οι ανεξάντλητες ενεργειακές πηγές που διατίθενται σε αφθονία στο φυσικό μας περιβάλλον (ήλιος, άνεμος, κ.ά). Αποτελούν την πρώτη μορφή ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος , σχεδόν αποκλείστηκα μέχρι και τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα , όπου στράφηκε στην χρήση άνθρακα και υδρογονανθράκων. Το εκτενές ενδιαφέρον και η τεχνολογική εξέλιξη που αφορά την καλύτερη αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας , παρουσιάστηκε και ενισχύθηκε από τις πετρελαϊκές κρίσεις τόσο του 1973 όσο και του 1979. Η ανανεώσιμη ενέργεια παρέχει ενέργεια σε τέσσερις βασικές κατηγορίες , στην παραγωγή ηλεκτρισμού , στη θέρμανση ή ψύξη του νερού ( για δημόσια η ιδιωτική χρήση ) και στις μεταφορές. Αντίθετα με τις συμβατικές μορφές ενέργειας που είναι συγκεντρωμένες σε περιορισμένο αριθμό χωρών , οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας διατίθενται σε ένα αρκετά μεγάλο αριθμό γεωγραφικών περιοχών , γεγονός που επιτρέπει σε πολλές χώρες να διασφαλίζουν σημαντική ενεργειακή ασφάλεια και οικονομικά οφέλη.

Τα τελευταία χρόνια έχει διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας είναι ο κλάδος ο οποίος ευθύνεται κατά κύριο λόγο για τη ρύπανση του περιβάλλοντος, γεγονός που καθιστά επιτακτική ανάγκη την αντικατάσταση των κλασσικών πηγών ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Παράλληλα σε μία περίοδο στην οποία ακόμα και οι πιο ισχυρές οικονομίες του κόσμου έχουν να αντιμετωπίσουν πολύπλευρα προβλήματα της οικονομικής κρίσης , καθιστά ακόμη πιο αναγκαία την επέκταση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με σκοπό την αντιμετώπιση της ολοένα αυξανόμενης τιμής του πετρελαίου.

### **1.2 Στόχος αξιοποίησης Α.Π.Ε σε ευρωπαϊκό επίπεδο**

Το Ευρωπαϊκό Σχέδιο Δράσης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας , εκπονήθηκε στο πλαίσιο εφαρμογής της Ευρωπαϊκής Ενεργειακής Πολιτικής σε σχέση με την διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας , την εξοικονόμηση ενέργειας και τον περιορισμό των εκπομπών αερίων ρύπων του θερμοκηπίου.

Ειδικότερα για το σύνολο των κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης μέχρι το 2020 προβλέπεται:

- 20% μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 σύμφωνα με την οδηγία 2009/29/ΕΚ ,
- 20% διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας σύμφωνα με την οδηγία 2009/29/ΕΚ και
- 20% εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας.

Καταλήγουμε , λοιπόν, στο συμπέρασμα ότι ο μόνος ουσιαστικός τρόπος για να μπορέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση να ανταποκριθεί στο φιλόδοξο στόχο που έχει θέσει, για αποτελεσματικό περιορισμό των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), είναι να επιταχύνει την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

### **1.3 Μορφές Α.Π.Ε**

#### Αιολική ενέργεια

Η ανάλυσή της παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο (κεφ.2).

#### Ηλιακή ενέργεια

Χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον ήλιο, όπως το φως, η φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα και η ενέργεια ακτινοβολίας. Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη , αφού προέρχεται από τον ήλιο και κατά συνέπεια δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της. Αξιοποιείται χρησιμοποιώντας τεχνολογίες όπως την ηλιακή θέρμανση , τα φωτοβολταϊκά πάνελ (photovoltaics), τα συγκεντρωτικά φωτοβολταϊκά (concentrator photovoltaics), την ηλιακή αρχιτεκτονική (solar architecture) και τη τεχνητή φωτοσύνθεση (artificial photosynthesis). Οι τεχνολογίες αυτές διακρίνονται σε :

- *Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα* : μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα.
- *Παθητικά Ηλιακά και Υβριδικά Συστήματα* : χρησιμοποιώντας κατάλληλες αρχιτεκτονικές δομές και συγκεκριμένα δομικά υλικά βελτιστοποιείται η απευθείας εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για θέρμανση, φωτισμό κ.τ.λ.

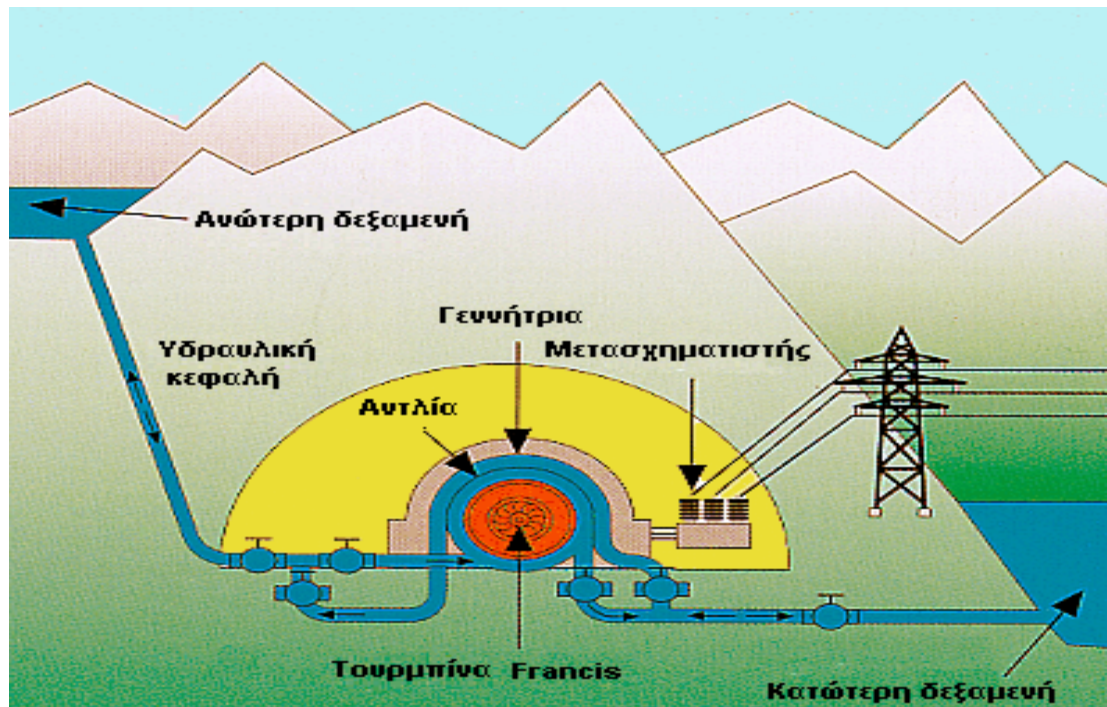
- *Φωτοβολταϊκά Ηλιακά Συστήματα* : μετατρέπουν άμεσα την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν την κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας εκμεταλλευόμενη την ηλιακή.



Εικόνα 1. ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### Υδραυλική ενέργεια

Είναι η ενέργεια που αποταμιεύεται ως δυναμική ενέργεια μέσα σε βαρυτικό πεδίο με τη συσσώρευση μεγάλων ποσοτήτων νερού σε υψομετρική διαφορά από τη συνέχιση της ροής του ελεύθερου και αποδίδεται ως κινητική μέσω της υδατόπτωσης. Η συγκεκριμένη μορφή ενέργειας είναι ακόμα γνωστή από την αρχαιότητα με την χρήση νερόμυλων για άρδευση. Από τον 19<sup>ο</sup> αιώνα και μετά , η υδραυλική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε για τη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω των υδροηλεκτρικών έργων όπως είναι οι υδατοταμιευτήρες , οι κλειστοί αγωγοί πτώσεως ,οι υδροστρόβιλοι , οι ηλεκτρογεννήτριες , οι διώρυγες φυγής και φυσικά τα φράγματα. Με τη χρήση υδραυλικών τουρμπινών μετατρέπεται η κινητική ενέργεια του νερού σε μηχανική ενέργεια η οποία έπειτα μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας γεννήτριας.

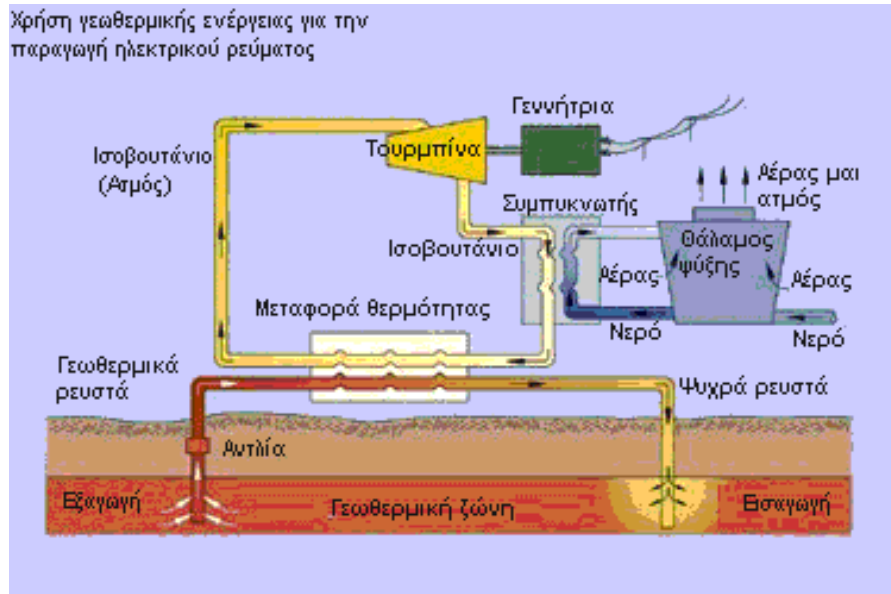


Εικόνα 2. ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### Γεωθερμική ενέργεια

Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται από τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του πυρήνα και της επιφάνειας της γης, έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχόμενη επαγωγή θερμικής ενέργειας σε μορφή θερμότητας από το πυρήνα στην επιφάνεια. Η μετάδοση αυτής της θερμότητας πραγματοποιείται είτε με αγωγή από το εσωτερικό προς την επιφάνεια, είτε με ρεύματα μεταφοράς. Για την αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας δημιουργούνται βαθιές οπές στο έδαφος στις οποίες όταν βρεθεί το κατάλληλο ζεστό γεωθερμικό σημείο, τοποθετούνται σωλήνες που επιτρέπουν τη ροή του θερμού ατμού από το φλοιό στην επιφάνεια. Ο ατμός αυτός εισέρχεται σε στρόβιλο ο οποίος περιστρέφεται και όντας συνδεδεμένος με μια γεννήτρια παράγεται ηλεκτρισμός. Στη συνέχεια διοχετεύεται κρύο νερό από άλλο σωλήνα στο εσωτερικό της γης το οποίο ζεσταίνεται και έτσι συνεχίζεται η διαδικασία. Η γεωθερμική ενέργεια ανάλογα με το θερμοκρασιακό της επίπεδο διακρίνεται σε :

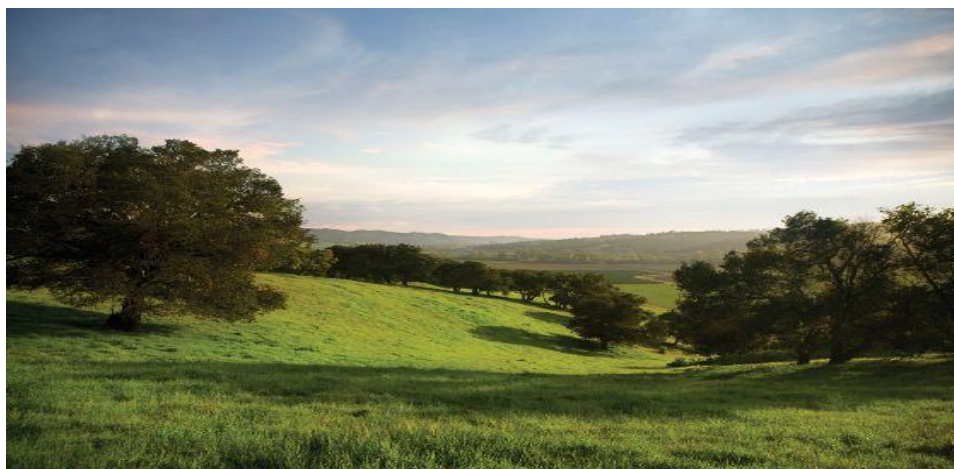
- Υψηλής ενθαλπίας (> 150 C) χρησιμοποιείται κυρίως για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Μέσης ενθαλπίας ( 80 έως 150 C ) χρησιμοποιείται για θέρμανση ή ξήρανση ξυλείας.
- Χαμηλής ενθαλπίας ( 25 έως 80 C ) χρησιμοποιείται για θέρμανση χώρων και για την παραγωγή γλυκού νερού.



Εικόνα 3. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### Βιομάζα

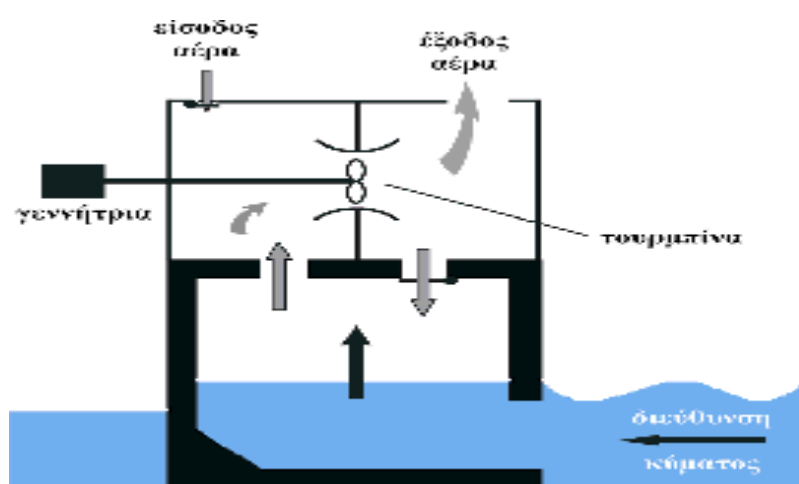
Η βιομάζα είναι η παλαιότερη και πιο διαδεδομένη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης τα φυτά μετασχηματίζουν την ηλιακή ενέργεια σε βιομάζα. Ως πηγή ενέργειας μπορεί να αξιοποιηθεί είτε άμεσα μέσω της καύσης και παραγωγής θερμότητας, είτε έμμεσα μετατρέποντάς τη σε διάφορες μορφές βιοκαυσίμων.



Εικόνα 4. ΒΙΟΜΑΖΑ

## Κυματική ενέργεια

Χαρακτηρίζεται η μορφή ενέργειας που προκύπτει από την κινηματική ενέργεια των κυμάτων. Τα κύματα και η ανώμαλη κίνηση του νερού σε ακτές ωκεανών , είναι ικανά να περιστρέψουν μια κατάλληλα διαμορφωμένη τουρμπίνα , η οποία με τη σειρά της μεταφέρει κινητική ενέργεια σε μια γεννήτρια με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η παραγόμενη ενέργεια είναι ικανή να καλύψει τις ανάγκες μίας οικείας , ενός φάρου , κ.λ.π.

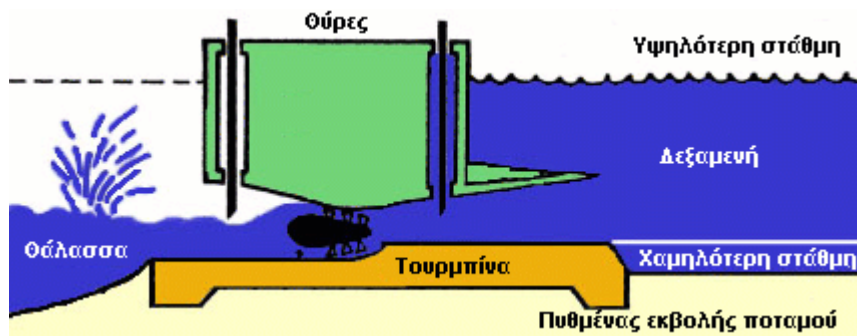


Εικόνα 5. ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

## Παλιρροϊκή ενέργεια

Είναι η μορφή ενέργειας η οποία εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του ήλιου και τις σελήνης που προκαλεί ανύψωση τις στάθμης του νερού. Το νερό αποθηκεύεται με την άνοδό του , ενώ όταν κατεβαίνει διέρχεται μέσω τις τουρμπίνες στην οποία δίνει κίνηση που με τη σειρά τις είναι συνδεδεμένη σε γεννήτρια που παράγει ηλεκτρισμό. Δεν αποτελεί ιδιαίτερα διαδεδομένο τρόπο παραγωγής ενέργειας , αν και εφαρμογές του μπορούν να παρατηρηθούν σε χώρες τις η Αγγλία , η Γαλλία και η Ρωσία.





Εικόνα 6. ΠΑΛΙΡΡΟΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### Ωσμωτική ενέργεια

Η ανάμειξη γλυκού και θαλασσινού νερού απελευθερώνει υψηλές ποσότητες ενέργειας, τις συμβαίνει με την εκβολή τις ποταμού στον ωκεανό. Η ενέργεια αυτή καλείται ωσμωτική ενέργεια ή γαλάζια ενέργεια και ανακτάται όταν το νερό του ποταμού και το θαλασσινό νερό είναι διαχωρισμένα από μία ημι-διαπερατή μεμβράνη και το γλυκό νερό περνάει μέσω τις. Το αποτέλεσμα της αλλαγής εντροπίας από τη διαφορά αλατότητας μεταξύ του γλυκού με το θαλασσινό νερό είναι η παραγωγή τις συγκεκριμένης μορφής ενέργειας.



Εικόνα 7. ΩΣΜΩΤΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

### Αιολική ενέργεια

Η ανάλυση τις παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο ( κεφ.2 ) .

## 1.4 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα ΑΠΕ

### ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Αποτελούν πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας (ήλιος, άνεμος, ποτάμια, οργανική ύλη κ.ά ) και συμβάλουν στη μείωση της εξάρτησης από εξαντλήσιμους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους τις είναι το πετρέλαιο, ο γαιάνθρακας και το φυσικό αέριο.
- Είναι φιλικές τις το περιβάλλον και τον άνθρωπο , γεγονός που καθιστά την αξιοποίησή τις ευρέως αποδεκτή.
- Σε συνδυασμό με την εξοικονόμηση ενέργειας , αποτελούν την κατ' εξοχήν περιβαλλοντικά φιλική λύση για τον περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και την καταπολέμηση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Ταυτόχρονα , με την αντικατάσταση των σταθμών παραγωγής ενέργειας από συμβατικές πηγές , επιτυγχάνεται μείωση των εκπομπών και από τις ρυπαντές , τις είναι τα οξείδια του θείου , του αζώτου , κ.α.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση τις ενεργειακής ανεξαρτησίας και τις ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι γεωγραφικά διάσπαρτες και συνδράμουν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος. Έχουμε έτσι ως αποτέλεσμα τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο , ανακουφίζοντας τα συστήματα υποδομής ενώ ταυτόχρονα μειώνονται οι απώλειες μεταφοράς ενέργειας.
- Παρέχουν τη δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων , καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα ενεργειακών αναγκών των χρηστών (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών , αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή , κ.α. ).
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος , το οποίο δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις τις διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ δημιουργούν σημαντικό αριθμό νέων θέσεων εργασίας , ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.

- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση ανάλογων επενδύσεων ( π.χ. θερμοκηπιακές καλλιέργειες με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας , τηλεθέρμανση οικισμών, μικρών πόλεων κλπ.).
- Οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης των ΑΠΕ είναι σχεδιασμένες να καλύπτουν συγκεκριμένες ανάγκες των χρηστών, τόσο σε μικρή όσο και σε μεγάλη κλίμακα εφαρμογών και έχουν μικρό σχετικά χρόνο κατασκευής , γεγονός που επιτρέπει τη γρήγορη ανταπόκριση τις προσφοράς τις τη ζήτηση ενέργειας.

#### ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

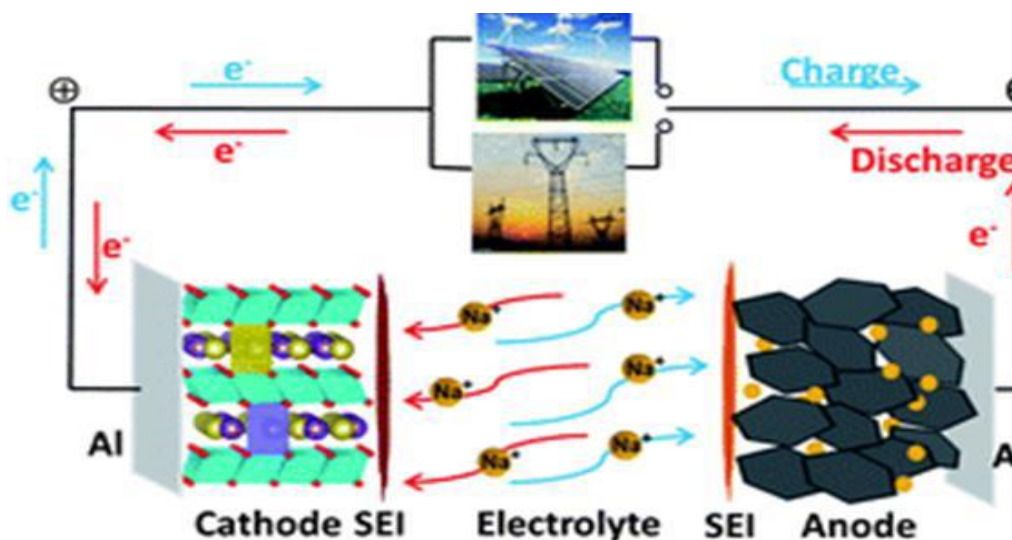
- Έχουν αρκετά μικρό συντελεστή απόδοσης , της τάξης του 30 % και σε πολλές περιπτώσεις ακόμα μικρότερο. Συνεπώς απαιτείται αρκετά μεγάλο αρχικό κόστος εφαρμογής σε μεγάλη επιφάνεια τις γης. Για το λόγο αυτό , μέχρι τώρα οι ΑΠΕ χρησιμοποιούνται ως συμπληρωματικές πηγές ενέργειας και δεν επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών μεγάλων αστικών κέντρων.
- Το κόστος επένδυσης για εγκαταστάσεις ισχύος ΑΠΕ είναι σε πολύ υψηλά επίπεδα συγκριτικά με αυτό των συμβατικών μορφών.
- Η παροχή και η απόδοση τις αιολικής , υδροηλεκτρικής και ηλιακής ενέργειας εξαρτάται από την εποχή του έτους αλλά και από το γεωγραφικό πλάτος και κλίμα τις περιοχής , στην οποία εγκαθίστανται.
- Για τις αιολικές μηχανές υπάρχει η άποψη ότι δεν είναι κομψές από αισθητική άποψη και ότι προκαλούν θόρυβο και θανάτους πτηνών.
- Για τα υδροηλεκτρικά έργα υπάρχει ανησυχία ότι προκαλούν έλκυση μεθανίου από την αποσύνθεση των φυτών που βρίσκονται κάτω από το νερό και έτσι συντελούν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου.

## 1.5 Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Ορισμένες μορφές ενέργειας , όπως η ηλιακή , η αιολική και η υδραυλική αποτελούν κυμαινόμενη πηγή καυσίμου , καθιστώντας τα αποθηκευτικά συστήματα ενέργειας αναγκαία ώστε να εξασφαλιστεί η σταθερή και συνεχής παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Παράλληλα , η αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος είναι απαραίτητη για την αξιοποίηση περίσσειας ενέργειας όταν αυτό κρίνεται αναγκαίο. Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί με αρκετούς τρόπους , οι σημαντικότεροι εκ των οποίων αναφέρονται παρακάτω.

### 1.5.1 Αποθήκευση ενέργειας με μπαταρίες.

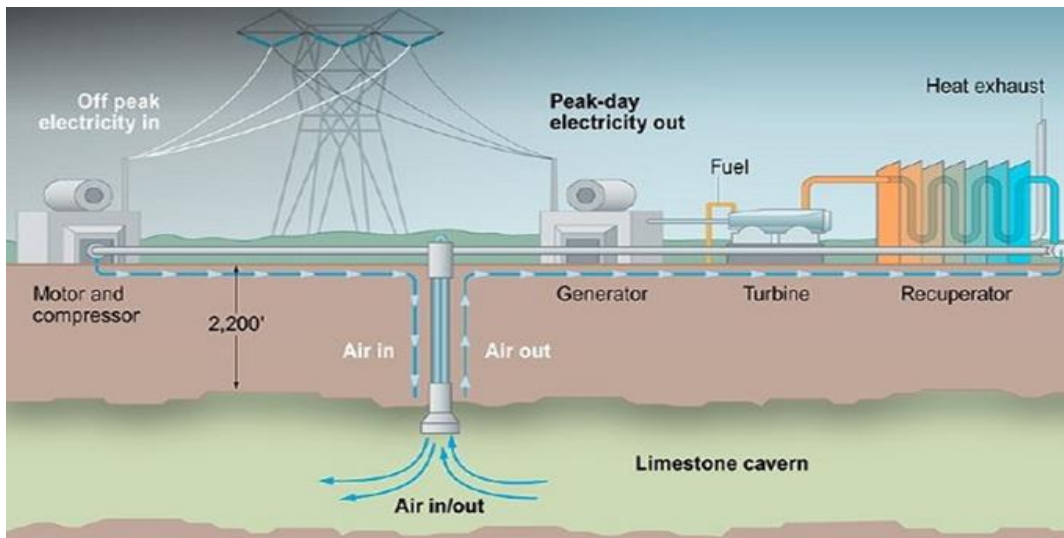
Η βασική λειτουργία των μπαταριών είναι η παροχή εφεδρείας στο δίκτυο σε περίπτωση σφάλματος στο σταθμό παραγωγής ή στη γραμμή μεταφοράς. Ταυτόχρονα αξιοποιούνται για τον έλεγχο της συχνότητας και της τάσης. Λειτουργούν αποθηκεύοντας την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική , ενώ τα βασικά τους χαρακτηριστικά είναι η υψηλή πυκνότητα ενέργειας , η μεγάλη απόδοση , το ελάχιστον αρχικό κόστος και η μεγάλη διάρκεια ζωής.



Εικόνα 8. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ

### 1.5.2 Αποθήκευση ενέργειας με πεπιεσμένο αέρα

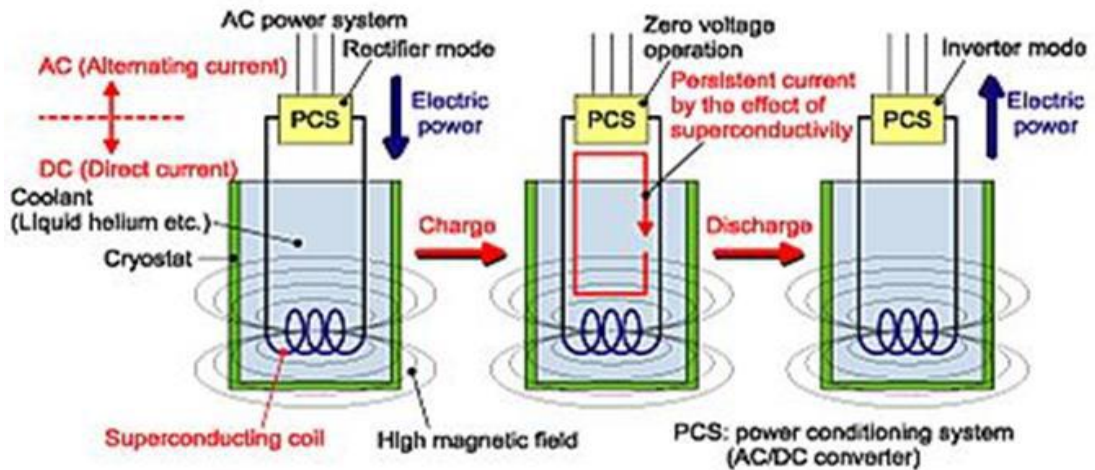
Ο συγκεκριμένος τρόπος αποθήκευσης χρησιμοποιεί μηχανές καύσης, οι οποίες αποθηκεύουν την ενέργεια με σκοπό να χρησιμοποιηθεί όταν η ζήτηση είναι μεγάλη. Η αποθήκευση ενέργειας πραγματοποιείται με την βοήθεια ειδικών συμπιεστών που εισάγουν αέρα υψηλής πίεσης σε μία δεξαμενή. Όταν υπάρξει ζήτηση ενέργειας, ο συμπιεσμένος αέρας εξάγεται από τις δεξαμενές, με την χρήση καυσίμων κατευθύνεται σε κατάλληλες τουρμπίνες εκτόνωσης, οι οποίες είναι συνδεδεμένες με γεννήτρια που παράγει ηλεκτρισμό. Οι συγκεκριμένες εγκαταστάσεις χρησιμοποιούν το 30% του καυσίμου που χρειάζονται οι συμβατικές μηχανές καύσης, συνεπώς είναι περισσότερο φιλικές ως προς το περιβάλλον. Εφαρμογή τέτοιου είδους μηχανών παρατηρείται στις ανεμογεννήτριες χάρη στην ασταθή αιολική ενέργεια.



Εικόνα 9. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΠΕΠΙΕΣΜΕΝΟ ΑΕΡΑ

### 1.5.3 Μαγνητική υπεραγωγίμη αποθήκευση ενέργειας

Η ενέργεια αποθηκεύεται σε ένα μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από ένα συνεχές ρεύμα που διαρρέει ένα υπεραγωγίμο πηνίο. Έχει την ικανότητα να τροφοδοτήσει τόσο με άεργο και ενεργό ισχύ σε υψηλά επίπεδα απόδοσης και μεγάλα ποσά ισχύος. Παρόλα αυτά δεν αποτελεί το προτιμότερο μέσω αποθήκευσης λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής, αλλά και του υψηλού κινδύνου που προκαλεί το μεγάλο μαγνητικό πεδίο στην υγεία του ανθρώπου.



Εικόνα 10. ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΗ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

#### 1.5.4 Αποθήκευση ενέργειας με σφόνδυλο

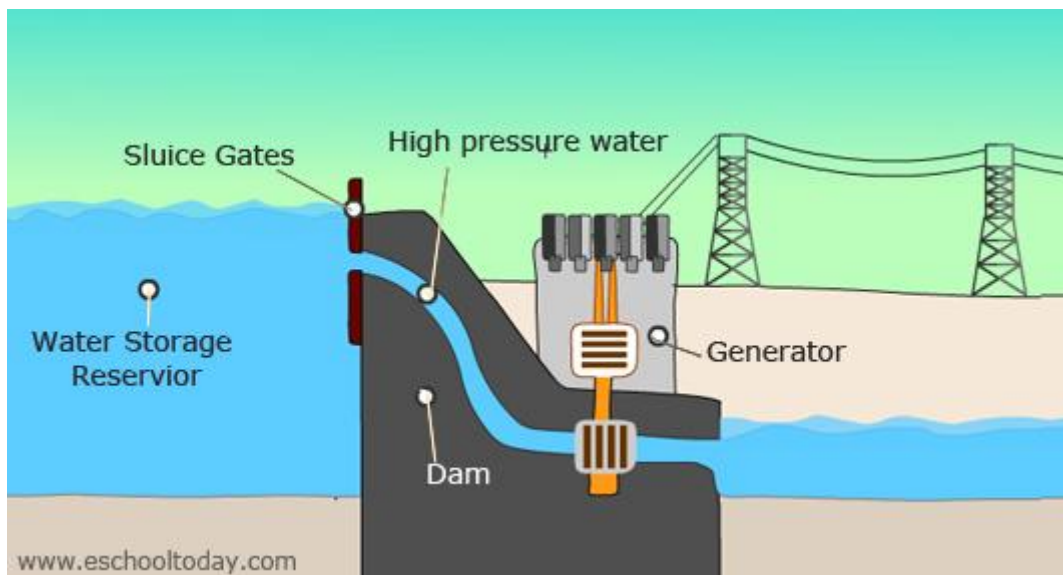
Αποτελεί ένα ηλεκτρομηχανικό σύστημα αποθήκευσης, στο οποίο η ενέργεια αποθηκεύεται σε κινητική ενέργεια ενός περιστρεφόμενου μηχανισμού. Ο σφόνδυλος τροφοδοτείται μέσω μηχανικής ενέργειας από ένα ηλεκτροκινητήρα. Σε σειρά είναι συνδεδεμένη μία γεννήτρια που δίνει ηλεκτρική ενέργεια. Η διαδικασία της φόρτισης πραγματοποιείται όταν ο ηλεκτροκινητήρας τροφοδοτεί με ηλεκτρικό ρεύμα αυξάνοντας έτσι τη ταχύτητα του σφονδύλου. Κατά την εκφόρτισή του, η γεννήτρια παράγει ηλεκτρικό ρεύμα και τροφοδοτεί το δίκτυο, μειώνοντας τη ταχύτητα του. Χρησιμοποιείται για την αντιμετώπιση διακυμάνσεων ενέργειας στις μηχανές καύσης και στις ανεμογεννήτριες και αποτελούν ένα ιδιαίτερα αποτελεσματικό μέσο αποθήκευσης που είναι φιλικό προς το περιβάλλον.



Εικόνα 11. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΣΦΟΝΔΥΛΟ

### 1.5.5 Αποθήκευση ενέργειας με αντλιοστάσιο

Το συγκεκριμένο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας αποτελείται από δύο δεξαμενές οι οποίες είναι τοποθετημένες μεταξύ τους με διαφορά ύψους. Όταν παρουσιαστεί η ανάγκη για παροχή ηλεκτρισμού, το νερό αντλείται από την δεξαμενή με το μεγαλύτερο ύψος, που έχει τοποθετηθεί με τη χρήση ρεύματος εκτός αιχμής, σε εκείνη με το μικρότερο, διερχόμενο από υδροστροβίλους στους οποίους παράγεται κινητική ενέργεια. Μια γεννήτρια είναι συνδεδεμένη με τους υδροστροβίλους και αξιοποιεί την κινητική ενέργεια για τη παραγωγή ηλεκτρισμού. Βασικό πλεονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου αποθήκευσης ενέργειας είναι το χαμηλό κόστος και η συμβολή στη ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου.



**Εικόνα 12. ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΑΝΤΛΙΟΣΤΑΣΙΟ**

### 1.5.6 Αποθήκευση ενέργειας με υπερπυκνωτή.

Ο υπερπυκνωτής είναι ένας πυκνωτής διπλής στρώσης στον οποίο αποθηκεύεται ηλεκτρική ενέργεια χωρίς χημικές αντιδράσεις με τη χρήση ενός πορώδη ηλεκτρολύτη. Η πυκνότητα ισχύος, η χωρητικότητα, ο κύκλος ζωής και το κόστος εξαρτώνται από το συνδυασμό ηλεκτρολύτη και ηλεκτροδίων. Αν και χρησιμοποιούνται σε χαμηλά επίπεδα ισχύος μπορούν να παρέχουν διαρκή ενεργειακή κάλυψη, ενώ η κατασκευή τους, τους κάνει ανθεκτικούς σε ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας.

## Κεφάλαιο 2. Αιολική Ενέργεια και Άνεμος

### 2.1 Αιολική ενέργεια

#### 2.1.1 Ιστορική αναδρομή

Ιστορικά, η αιολική ενέργεια έχει χρησιμοποιηθεί για περισσότερο από 3000 χρόνια. Μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα χρησιμοποιήθηκε για να εξασφαλίζει μηχανικό έργο για άντληση νερού και άλεση σιτηρών. Από την αρχή της βιομηχανικής επανάστασης, η χρήση της στοχαστικής αιολικής ενέργειας περιορίστηκε από τα φυσικά καύσιμα και τον ηλεκτρισμό, που αποτέλεσαν πιο αξιόπιστες λύσεις. Στις αρχές της δεκαετίας του '70, με την πρώτη πετρελαϊκή κρίση, το ενδιαφέρον για την αιολική ενέργεια αναθερμάνθηκε. Αυτή τη φορά η πρόκληση ήταν η χρήση της αιολικής ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού. Σήμερα, η χρήση της αιολικής ενέργειας έχει πλέον αποδειχθεί ως αξιόπιστη λύση σε συνδυασμό με λειτουργία άλλων ενεργειακών πηγών ως εφεδρεία. Αμέσως μετά την εγκατάσταση της πρώτης Ανεμογεννήτριας από τον Thomas Alva Edison το 1880, η ιδέα διαδόθηκε σε όλο τον κόσμο. Οι πρώτες εγκαταστάσεις εκείνης της εποχής είχαν ως κοινό χαρακτηριστικό ότι εγκαταστάθηκαν κοντά στην κατανάλωση, καθώς τα δίκτυα χαμηλής τάσης και συνεχούς ρεύματος χαρακτηρίζονταν από μεγάλες απώλειες μεταφοράς. Με την ανάπτυξη των μετασχηματιστών, η είσοδος και η κυριαρχία του εναλλασσόμενου ρεύματος επέτρεψε τη σύνδεση μονάδων παραγωγής και καταναλωτών σε μεγάλη απόσταση. Το 1920 κάθε μεγάλο αστικό κέντρο στη Δυτική Ευρώπη είχε το δικό του ανεξάρτητο ηλεκτρικό δίκτυο. Με την ανάπτυξη των γραμμών μεταφοράς υψηλής τάσης, η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας έγινε δυνατή σε ακόμα μεγαλύτερες αποστάσεις και σύντομα τα διαφορετικά ηλεκτρικά δίκτυα συνδέθηκαν μεταξύ τους. Η ραγδαία βελτίωση της τεχνολογίας ήρθε στις αρχές της δεκαετίας του '70, ενώ στα τέλη της δεκαετίας του '90, η αιολική ενέργεια αποτελούσε την πιο σημαντική αιεφόρο ενεργειακή πηγή. Τα τελευταία δέκα χρόνια η αιολική εγκατεστημένη ισχύς διπλασιάζεται κάθε τρία χρόνια, ενώ παράλληλα το κόστος έχει πέσει στο ένα έκτο σε σχέση με τις αρχές της δεκαετίας του '80.

#### 2.1.2 Παρούσα συνεισφορά

Η Αιολική Ενέργεια παρουσιάζει μια αλματώδη ανάπτυξη σε όλο τον κόσμο τις τελευταίες δεκαετίες. Επί του παρόντος πέντε χώρες Γερμανία, Ισπανία, ΓΕΙΑ, Ινδία και Δανία- συγκεντρώνουν το 72% της παγκόσμιας εγκατεστημένης αιολικής ισχύος



σύμφωνα με τα στοιχεία της EWEA4 του 2006. Στα περισσότερα δίκτυα του κόσμου, η αιολική ενέργεια συνεισφέρει ένα μικρό ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας ή καθόλου. Βεβαίως, υπάρχουν κάποιες εξαιρέσεις σημαντικής συνεισφοράς, όμως αυτό στις περισσότερες περιπτώσεις συμβαίνει σε περιοχές που συνδέονται με μεγαλύτερα ισχυρά δίκτυα [Ackennann (2005)]. Σύμφωνα με τα στοιχεία της EWEA, στη Δανία τα τελευταία χρόνια η συνεισφορά της αιολικής ενέργειας στην κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών υπερβαίνει το 20% ετησίως. Σε τοπικό επίπεδο, το 2003 στην επαρχία Schleswig-Holstein της Γερμανίας, η συνεισφορά της αιολικής ενέργειας ήταν 31% με αιολική παραγωγή 4200GWh σε συνολική ζήτηση 13353GWh [Ender (2004)]. Στο δίκτυο της εταιρίας διαχείρισης δικτύου Eltra, στις περιοχές Jutland και Funen, η συνεισφορά της αιολικής ενέργειας ήταν 18% με αιολική παραγωγή 3800GWh σε συνολική ζήτηση 20800GWh, ενώ στο νησί Gotland η αιολική συνεισφορά ήταν 22% με αιολική παραγωγή 200GWh σε συνολική ζήτηση 900GWh. Τέλος στο αυτόνομο δίκτυο της Κρήτης η συνεισφορά των αιολικών ξεπέρασε το 10% από τα τέλη της δεκαετίας του '90 [ZervosA. CaralisG. GorgoulisM. ZografakisN. (2000), και το 2006 διαμορφώθηκε στο 13% με αιολική παραγωγή 365G\Wh σε συνολική ζήτηση 2896GWL· [ΔΕΗ (2007)].

### 2.1.3 Η Αιολική ενέργεια στην Ελληνική Αρχαιότητα

Η αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα έχει γίνει από την αρχαιότητα μέσω των ιστιοφόρων για τη ναυσιπλοΐα και αργότερα στο μεσαίωνα μέσω των ανεμόμυλων για άλεσμα δημητριακών και άντληση νερού. Όσο για την ελληνική μυθολογία, αυτή είχε τοποθετήσει τοποτηρητή και χειριστή των οκτώ ανέμων τον Αίοιο. Οι εν λόγω άνεμοι θεωρούνταν βοηθοί του και ήταν: Βορέας, Καικίας (ΒΑ), Απηλιώτης (Α), Εύρος (ΝΑ), Νότος, Λιψ (ΝΔ), Ζέφυρος (Δ), Σκίρων (ΒΔ), και απεικονίζονται στους "Αέρηδες", το μνημείο που βρίσκεται στην Πλάκα. Ενώ έχει παρέλθει η εποχή των δοξασιών για την θεϊκή υπαγόρευση των ανέμων και των καιρικών φαινομένων γενικότερα, η εποχή που στις "Νεφέλες" του Αριστοφάνη το θέμα γινόταν αντικείμενο σκωπτικού φιλοσοφικού διαλόγου, θα επιχειρήσουμε να παρακολουθήσουμε τα βήματα προόδου της χώρας μας στην αναζήτηση θέσεων κατάλληλου Α Δ με στόχο την αξιοποίηση του για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

### 2.1.4 Ανάλυση Αιολικής ενέργειας

Τα χαρακτηριστικά της αιολικής ενέργειας παρουσιάζονται παρακάτω:

- Είναι ελεύθερη, καθαρή και διαθέσιμη σε κάθε χώρα της υφηλίου.
- Μπορεί να καλύψει τη ζήτηση σε ενέργεια, μέσω του παγκόσμιου αιολικού δυναμικού
- Περιορίζει την ατμοσφαιρική ρύπανση και, επομένως, την κλιματική αλλαγή.
- Καλύπτει με ασφάλεια τις ενεργειακές ανάγκες κάθε χώρας και επειδή εγκαθίσταται πιο γρήγορα από τους σταθμούς συμβατικής ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών χωρών με αλματώδη ανάπτυξη και ανάλογη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (πχ Κίνα).
- Διασπείρει γεωγραφικά την παροχή ενέργειας με αποτέλεσμα την απεξάρτηση από συγκεκριμένα κέντρα ενεργειακών πόρων και τη μείωση των απωλειών στις γραμμές μεταφοράς.
- Περιορίζει την εισαγωγή συμβατικών καύσιμων και τους κινδύνους από τις κερδοσκοπικές αυξήσεις των τιμών τους.
- Συμβάλει στην παγκόσμια ειρήνη, αφού εξαλείφονται οι συγκρούσεις για τον έλεγχο περιοχών προνομιακών σε φυσικούς πόρους.
- Μειώνει τις ανισότητες και τη φτώχεια μέσω της αμέριστης πρόσβασης σε ενέργεια, ενώ παράλληλα βελτιώνει την αγροτική ηλεκτροδότηση.
- Δημιουργεί νέα επαγγέλματα (επομένως θέσεις εργασίας), περιφερειακή ανάπτυξη και καινοτομία.

#### 2.1.5 Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας

Τα προηγούμενα πέντε χρόνια η παγκόσμια συνολικά εγκατεστημένη αιολική ισχύς σημείωνε ετήσια αύξηση 28%, κατά μέσο όρο (GWEC, 2006; GWEC, 2005). Η ετήσια εγκατάσταση αιολικής ισχύος παρουσίασε αύξηση 15.8%, κατά μέσο όρο (GWEC, 2006; GWEC, 2005). Η παγκόσμια αγορά αιολικής ενέργειας αναπτύσσεται ταχύτερα από οποιαδήποτε αγορά άλλης ανανεώσιμης πηγής ενέργειας. Από 4800 MW το 1995, η παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς έφτασε στα 59000 MW μέχρι το τέλος του 2005, έχει δηλαδή δωδεκαπλασιαστεί. Η βιομηχανία της αιολικής ενέργειας απέδωσε όφελος περισσότερο από 13 δισεκατομμύρια ευρώ, λόγω της απασχόλησης σε αυτή 150000 εργαζομένων σ' όλο τον κόσμο (GWEC, 2006; GWEC, 2005). Η επιτυχία των επενδύσεων σε μονάδες εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας έχει προσελκύσει επενδυτές από τομείς παραγωγής ενέργειας με συμβατικά μέσα και, γενικότερα, από πιο «παραδοσιακούς» κλάδους της οικονομίας. Σ' ένα μεγάλο αριθμό κρατών η αναλογία της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από αιολική ενέργεια συναγωνίζεται αυτή από τα συμβατικά καύσιμα. Για παράδειγμα, στη Δανία το 20% των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από συστήματα εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας. Στην Ισπανία η συνεισφορά

της αιολικής ενέργειας έχει φτάσει το 8%, με προοπτική το 15% μέχρι το τέλος της δεκαετίας. Οι αριθμοί αυτοί δείχνουν πως η αιολική ενέργεια είναι έτοιμη να καλύψει ένα σημαντικό μέρος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κάθε χώρας, χωρίς εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Αν και η βιομηχανία αιολικής ενέργειας είναι μέχρι τώρα πιο δυναμική στις χώρες της Ευρώπης, εντούτοις αυτό αλλάζει. Οι ΗΠΑ και ο Καναδάς παρουσιάζουν τρομακτική ανάπτυξη, ενώ νέες αγορές ανοίγονται στην Ασία και τη Νότια Αμερική. Επίσης, ένα φυσικό σύνορο στην εξάπλωση της αιολικής ενέργειας, η θάλασσα, έχει τώρα καταρριφθεί με την ανάπτυξη ολοένα και περισσότερων θαλάσσιων αιολικών πάρκων. Αναλυτικότερα, η κατάσταση στην αγορά αιολικής ενέργειας τα προηγούμενα χρόνια είναι η ακόλουθη:

Μόνο κατά τη διάρκεια του 2004, περισσότερα από 8000 MW νέας εγκατεστημένης ισχύος προστέθηκαν στο παγκόσμιο ηλεκτρικό δίκτυο, αντιπροσωπεύοντας έναν επιχειρηματικό τομέα αξίας 8 δισεκατομμυρίων ευρώ. Μέχρι το τέλος του έτους αυτού, η αιολική ισχύς που εγκαταστάθηκε παγκοσμίως προσέγγισε το επίπεδο των 48000 MW περίπου. Η Ευρώπη συνεισέφερε το 73% της ετήσιας ανάπτυξης της αγοράς κατά το 2004. Επιπλέον, άλλες χώρες του πλανήτη άρχισαν να αναδύονται ως δευτερεύουσες αγορές στην αιολική βιομηχανία. Πάνω από 50 χώρες σ' όλο τον κόσμο συνεισέφεραν στο παγκόσμιο σύνολο και ο αριθμός των ανθρώπων που εργάστηκε στην αιολική βιομηχανία ήταν σύμφωνα με εκτιμήσεις 90000-100000, με το 80% από αυτούς στην Ευρώπη (GWEC, 2005). Γενικότερα, το 2004, η τρέχουσα αγορά αιολικής ενέργειας περιοριζόταν σε έναν μικρό αριθμό χωρών. Πάνω από 50% της νέας εγκατεστημένης ισχύος μέσα στο έτος αυτό οφειλόταν σε μόλις 3 χώρες - Γερμανία, Ισπανία και Ινδία, με τις δυο πρώτες να αποτελούν το 40%. Το 66% της συνολικής αιολικής ισχύος που ήταν εγκατεστημένη στον πλανήτη περιοριζόταν σε μόλις τρεις χώρες - Γερμανία, Ισπανία και ΗΠΑ (GWEC, 2005). Η νέα εγκατεστημένη αιολική ισχύς αυξήθηκε παγκοσμίως κατά 11531 MW το 2005 έναντι αυτής του 2004, γεγονός που αντιπροσωπεύει μια αύξηση 40.5% στην παγκόσμια αγορά αιολικής ενέργειας. Η συνολική αξία του νέου εξοπλισμού που εγκαταστάθηκε ήταν πάνω από 12 δισεκατομμύρια ευρώ ή 16 δισεκατομμύρια δολάρια. Η συνολικά εγκατεστημένη αιολική ισχύς είχε φθάσει μέχρι το τέλος του 2005 τα 59091 MW, με μια αύξηση της τάξης του 24% συγκρινόμενη με τη συνολική ισχύ μέχρι το τέλος του 2004 (GWEC, 2006; GWEC, 2005). Οι χώρες με τη μεγαλύτερη συνολικά εγκατεστημένη αιολική ισχύ ήταν; η Γερμανία (18415 MW), η Ισπανία (10028 MW), οι ΗΠΑ (9149 MW), η Ινδία (4430 MW) και η Δανία (3128 MW). Η Ινδία έχει ως εκ τούτου ξεπεράσει τη Δανία σαν η τέταρτη αγορά αιολικής ενέργειας στον κόσμο. Μια ομάδα άλλων χωρών, όπως η Ιταλία, η Μεγάλη Βρετανία, η Ολλανδία, η Κίνα, η Ιαπωνία και η Πορτογαλία έχουν ξεπεράσει τα 1000 MW της εγκατεστημένης ισχύος. Σε ότι αφορά τη νέα αιολική ισχύ που εγκαταστάθηκε μέσα στο 2005, οι ΗΠΑ είναι ξεκάθαρα κυρίαρχη με 2431 MW, ακολουθούμενη από τη Γερμανία (1808 MW), την Ισπανία (1764 MW), την

Ινδία (1430 MW), την Πορτογαλία (500 MW) και την Κίνα (498 MW). Αυτή η εξέλιξη καταδεικνύει ότι νέοι παίκτες, όπως η Πορτογαλία και η Κίνα κερδίζουν έδαφος. Η Ευρώπη ηγείται της αγοράς με πάνω από 40500 MW εγκατεστημένης ισχύος ως το τέλος του 2005 στην ευρωπαϊκή ήπειρο, αντιπροσωπεύοντας το 69% του συνόλου της παγκόσμιας ισχύος. Το 2005 η ευρωπαϊκή εγκατεστημένη αιολική ισχύς αυξήθηκε κατά 18%, παρέχοντας σχεδόν το 3% της μέσης ευρωπαϊκής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ενός έτους. Η ευρωπαϊκή αγορά είχε ήδη φθάσει το στόχο που έχει τεθεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, των 40000 MW ως το 2010, πέντε έτη πριν από τη λήξη της περιόδου. Επιπλέον, η αιολική ενέργεια αναπτύσσεται ταχύτατα σε νέες αγορές, όπως η Πορτογαλία και η Γαλλία. Μέχρι το 2010, η Ευρωπαϊκή Ένωση, μέσω της αιολικής ενέργειας θα έχει επιτύχει να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά το ένα τρίτο της δέσμευσής της σύμφωνα με το Πρωτόκολλο του Κιότο (GWEC, 2006; GWEC, 2005). Το 2006, η συνολικά εγκατεστημένη αιολική ισχύς αυξήθηκε κατά 25% παγκοσμίως, δημιουργώντας νέο εξοπλισμό αξίας 18 δισεκατομμυρίων ευρώ περίπου (24 δισεκατομμυρίων δολαρίων περίπου), με αποτέλεσμα η παγκόσμια εγκατεστημένη αιολική ισχύς να ανέρχεται τώρα πάνω από 74 GW. Αν και η Ευρωπαϊκή Ένωση είναι ακόμη η ηγέτιδα αγορά στην αιολική ενέργεια με πάνω από 48 GW εγκατεστημένης ισχύος, άλλες ήπειροι όπως η Βόρεια Αμερική και η Ασία αναπτύσσονται με τρομακτικά άλματα, καθώς η αγορά αιολικής ενέργειας γίνεται ολοένα και πιο παγκοσμιοποιημένη. Το 2004, η Ευρώπη αντιπροσώπευε το 72% της παγκόσμιας ετήσιας αγοράς, αλλά το μερίδιο αυτό ελαττώθηκε στο 55% το 2005 και στο 51% το 2006. Αυτή η τάση αναμένεται να συνεχιστεί και το 2010, οπότε η Ευρώπη αναμένεται να αντιπροσωπεύει το 44% της παγκόσμιας ετήσιας αγοράς (9.3 GW) και το 55% της παγκόσμιας συνολικά εγκατεστημένης αιολικής ισχύος (82 GW) (GWEC, 2006). Στην Ευρωπαϊκό χώρο, το 2006, η Γερμανία υπήρξε η ηγέτιδα δύναμη της αγοράς, με 2233 MW νέας εγκατεστημένης αιολικής ισχύος μέσα στο έτος αυτό. Ακολουθείται από την Ισπανία, με 1587 MW νέας ισχύος. Τέσσερα άλλα μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης - η Γαλλία (810 MW), η Πορτογαλία (694 MW), η Μεγάλη Βρετανία (634 MW) και η Ιταλία (417 MW) - παρουσίασαν σημαντικές αυξήσεις στην εγκατεστημένη τους αιολική ισχύ κατά τη διάρκεια του 2006. Η Γερμανία έχει επίσης μακράν τη μεγαλύτερη συνολικά εγκατεστημένη αιολική ισχύ, τόσο στην Ευρώπη όσο και παγκοσμίως, με ένα σύνολο 20622 MW ως το τέλος του χρόνου. Ακολουθείται από την Ισπανία, περίπου στο ήμισυ, με 11615 MW, ενώ σε απόσταση αναπνοής βρίσκονται οι ΗΠΑ με 11603 MW (GWEC, 2006).

#### 2.1.6 Σενάρια για την χρήση της αιολικής ενέργειας παγκοσμίως

Τρία διαφορετικά σενάρια προβλέπονται για τη μελλοντική αύξηση της χρήσης της αιολικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο μέχρι το έτος 2030, σύμφωνα με

προβλέψεις της GWEC, της GreenpeaceInternational και του Γερμανικού Αεροδιαστημικού Κέντρου [GermanAerospaceCentre (DLR), από κοινού (GWEC, 2006):

1. Το πιο συντηρητικό, το «Σενάριο Αναφοράς» είναι βασισμένο στην προέκταση της Έκθεσης Προοπτικής της Παγκόσμιας Ενέργειας (WorldEnergyOutlook) του 2004 από τον ΔΟΕ. Αυτή προβλέπει την αύξηση όλων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της αιολικής ενέργειας, μέχρι το 2030. Η εκτίμηση του ΔΟΕ επεκτείνεται κατόπιν μέχρι το 2050, χρησιμοποιώντας στοιχεία από μελέτες του Γερμανικού Αεροδιαστημικού Κέντρου [GermanAerospaceCentre (DLR)]. Σύμφωνα με το σενάριο αυτό, μέχρι το 2010, το ετήσιο ποσοστό αύξησης της συνολικά εγκατεστημένης αιολικής ισχύος προβλέπεται 15%, ακολουθούμενο από ένα ετήσιο ποσοστό 10% έως το 2014. Μετά το έτος αυτό, το ποσοστό αύξησης μειώνεται γρήγορα, πέφτοντας στο 3% το χρόνο, μέχρι το 2031. Το αποτέλεσμα όλων αυτών είναι ότι μέχρι το τέλος αυτής της δεκαετίας, η συνολικά εγκατεστημένη παγκόσμια αιολική ισχύς θα προσεγγίσει τα 113 GW. Μέχρι το 2020, η παγκόσμια αιολική ισχύς θα ξεπεράσει τα 230 GW και μέχρι το 2030 θα προσεγγίσει τα 364 GW. Μέχρι το τέλος της περιόδου του σεναρίου αυτού, το 2050, η συνολική εγκατεστημένη παγκόσμια αιολική ισχύς θα είναι περισσότερο από 577 GW. Η ετήσια αύξηση στην εγκατάσταση της αιολικής ισχύος προβλέπεται κατά μέσο όρο 34 GW.
2. Το «Ενδιάμεσο Σενάριο» λαμβάνει υπόψη όλα τα μέτρα για την υποστήριξη της ανανεώσιμης ενέργειας είτε εν εξελίξει είτε που έχουν προγραμματιστεί, σε όλο τον κόσμο. Επίσης υποθέτει ότι οι στόχοι που έχουν τεθεί από πολλές χώρες για την αιολική ενέργεια και για τις άλλες ανανεώσιμες Θα πραγματοποιηθούν επιτυχώς. Βασική υπόθεση είναι πως η πραγματοποίηση των στόχων που έχουν τεθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση για την αιολική ενέργεια, θα επαναληφθεί και στον υπόλοιπο κόσμο. Σύμφωνα με το Ενδιάμεσο Σενάριο τα ποσοστά αύξησης της συνολικά εγκατεστημένης αιολικής ισχύος είναι ουσιαστικά υψηλότερα απ' ότι στο Σενάριο Αναφοράς. Το ετήσιο ποσοστό αύξησης της συνολικά εγκατεστημένης ισχύος προβλέπεται 19% μέχρι το 2010, 16% από το 2011 ως το 2014 και 15% από το 2015 ως το 2020. Κατόπιν, έως το 2025, μειώνεται σε 10% και στο τελευταίο μέρος της περιόδου του σεναρίου σε 5%. Το αποτέλεσμα είναι ότι μέχρι το 2020, η συνολικά εγκατεστημένη παγκόσμια αιολική ισχύς θα έχει φθάσει στο επίπεδο των 560 GW και μέχρι το 2030 σχεδόν σε 1129 GW. Μέχρι το τέλος της περιόδου πρόβλεψης, το 2050, η συνολικά εγκατεστημένη παγκόσμια αιολική ισχύς θα προσεγγίσει τα 1557 GW. Η

μέση ετήσια αύξηση στην εγκατάσταση της αιολικής ισχύος προβλέπεται 71 GW.

3. Το πιο φιλόδοξο σενάριο, το «Προηγμένο Σενάριο», ακολουθεί μια παρόμοια πορεία εξέλιξης με αυτή που περιγράφεται στις Οδηγίες WindForce 10 και 12, οι οποίες έχουν συνταχθεί από την EWEA, την GWEC και την Greenpeace, από το 1999. Οι Οδηγίες αυτές εξετάζουν κατά πόσο είναι εφικτό το 10%, και αργότερα το 12% της ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως να προέλθει από τη αιολική ενέργεια, μέχρι το 2020. Στο Προηγμένο Σενάριο προβλέπεται ακόμη πιο γρήγορη επέκταση της παγκόσμιας αγοράς αιολικής ενέργειας. Τα ποσοστά αύξησης της συνολικά εγκατεστημένης αιολικής ισχύος είναι μεγαλύτερα στις πρώτες δύο δεκαετίες. Μέχρι το 2015 προβλέπεται ένα ετήσιο ποσοστό αύξησης 20% στην συνολικά εγκατεστημένη αιολική ισχύ, ελαττωμένο στο 17% τα επόμενα πέντε χρόνια. Στη συνέχεια, μέχρι το 2025 μειώνεται περαιτέρω σε περίπου 10%, πριν πέσει κάτω από το 5% τα τελευταία έτη της περιόδου πρόβλεψης. Το αποτέλεσμα είναι πως, μέχρι το τέλος αυτής της δεκαετίας, η συνολικά εγκατεστημένη αιολική ισχύς θα προσεγγίσει τα 154 GW, μέχρι το 2020 τα 1073 GW και μέχρι το 2030 σχεδόν τα 2110 GW. Στο τέλος της περιόδου του σεναρίου, το 2050, η συνολικά εγκατεστημένη αιολική ισχύς θα είναι μεγαλύτερη από 3010 GW. Η πρόβλεψη για την μέση ετήσια αύξηση στην εγκατάσταση της αιολικής ισχύος ανέρχεται σε 71 GW.

## 2.2 Άνεμος , χαρακτηριστικά και χρήση του

Άνεμος ονομάζεται κάθε οριζόντια μετακίνηση μάζας ατμοσφαιρικού αέρα. Ο άνεμος είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών πιέσεων που επικρατούν από τόπο σε τόπο. Οι δυνάμεις που καθορίζουν την κίνηση μιας αέριας μάζας είναι οι παρακάτω: Δύναμη βαροβαθμίδας, ονομάζεται η δύναμη που ασκείται σε μια αέρια μάζα εξαιτίας των διαφορετικών πιέσεων που υπάρχουν σ' αυτήν και η οποία ωθεί την αέρια μάζα από τις ψηλές πιέσεις προς τις χαμηλές.

Η δύναμη *Coriolis* ασκείται σε κάθε σώμα που κινείται πάνω στη γη. Η δύναμη αυτή είναι ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας της γης, της ταχύτητας του σώματος (δηλαδή, της αέριας μάζας, στην περίπτωση του ανέμου) και επίσης είναι ανάλογη του ημιτόνου του γεωγραφικού πλάτους του τόπου στον οποίο λαμβάνει χώρα η κίνηση, είναι δηλαδή πιο μεγάλη στους πόλους (γεωγραφικό πλάτος 90ο) και μηδέν στον ισημερινό, όπου το γεωγραφικό πλάτος είναι μηδέν.

Ο ατμοσφαιρικός αέρας, που περιβάλλει τη γη, βρίσκεται σε συνεχή κίνηση. Οι παράγοντες εκείνοι που δημιουργούν και διαμορφώνουν όλες αυτές τις κινήσεις

είναι η ηλιακή ακτινοβολία, που προσλαμβάνει τόσο η ατμόσφαιρα όσο και η επιφάνεια του εδάφους, η ανομοιογένεια του ανάγλυφου του εδάφους και η περιστροφική κίνηση της γης. Από τις κινήσεις του ατμοσφαιρικού αέρα, εκείνες που παρουσιάζουν ιδιαίτερη σημασία είναι οι οριζόντιες μετακινήσεις του, τις οποίες ονομάζουμε άνεμο. Δηλαδή, άνεμος καλείται κάθε ρεύμα του ατμοσφαιρικού αέρα που έχει κάποια σχετική κίνηση ως προς το έδαφος. Επειδή στις ατμοσφαιρικές κινήσεις η κάθετη συνιστώσα, σε σύγκριση με την οριζόντια είναι πολύ μικρή, ο όρος 'άνεμος' αναφέρεται συνήθως μόνο στην οριζόντια συνιστώσα της κίνησης. Ο άνεμος στα επιφανειακά στρώματα της ατμόσφαιρας παρουσιάζει πολλές μεταβολές, τόσο στη διεύθυνση όσο και στην έντασή του, εξαιτίας της κατακόρυφης θερμοβαθμίδας, των στροβίλων και της τριβής με το ανάγλυφο του εδάφους (Χρονοπούλου-Σερέλη και Φλόκας, 2010). Ο άνεμος αποτελεί μια πολύ βασική μετεωρολογική και κλιματική παράμετρο και η εκτίμηση των χαρακτηριστικών του ανέμου στο ατμοσφαιρικό οριακό στρώμα έχει ποικίλες εφαρμογές, όπως στη διασπορά των ρύπων, στην αιολική ενέργεια, ναυσιπλοΐα, κλπ.

#### ❖ Χαρακτηριστικά του ανέμου

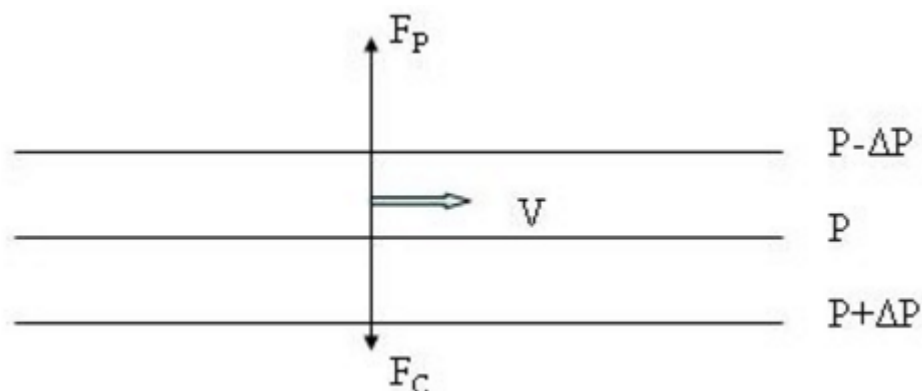
Ο άνεμος προσδιορίζεται από δύο στοιχεία, τη διεύθυνση (direction) και την ένταση (speed), δηλαδή την ταχύτητα με την οποία κινείται η αέρια μάζα. Ως διεύθυνση ορίζεται το σημείο του ορίζοντα από το οποίο πνέει ο άνεμος. Στα μετεωρολογικά τηλεγραφήματα και στις συνομιλίες α/φων με τον πύργο ελέγχου, η διεύθυνση δίνεται σε μοίρες με τρία ψηφία πάντα και η ένταση σε κόμβους (knots) π.χ. wind 0400/ 8 knots σημαίνει ότι ο άνεμος πνέει από διεύθυνση 40 μοιρών και η έντασή του είναι 8 κόμβοι (8 μίλια την ώρα). Η διεύθυνση του ανέμου δεν είναι πάντα εντελώς σταθερή, αλλά μεταβάλλεται ανάμεσα σε δύο ακραίες τιμές. Ως διεύθυνση δίνεται η μέση τιμή των δύο ακραίων τιμών του τελευταίου δεκαλέπτου.

**Μεταβλητός** (variable) ονομάζεται ο άνεμος όταν οι ακραίες αυτές τιμές διαφέρουν περισσότερο από 60ο από τη μέση τιμή του τελευταίου δεκαλέπτου.

**Ριπαίος** (gusty), ονομάζεται ο άνεμος, του οποίου η ένταση ξεπερνάει κατά 10 knots τουλάχιστον τη μέση τιμή του τελευταίου δεκαλέπτου.

**Γεωστροφικός** άνεμος (geostrophic wind). Όταν οι ισοβαρείς είναι ευθείες παράλληλες, τότε ο ατμοσφαιρικός αέρας, δέχεται την επίδραση της δύναμης βαροβαθμίδας (FP), που τον μετακινεί αρχικά από τις ψηλές προς τις χαμηλές πιέσεις και της δύναμης Coriolis (Fc), που τον εκτρέπει προς τα δεξιά (στο Βόρειο Ημισφαίριο). Αν δεν υπάρχουν τριβές στην κίνηση της αέριας μάζας, τότε ο άνεμος πνέει τελικά, όπως δείχνει το πιο κάτω σχήμα, παράλληλα προς τις ισοβαρείς. Ο

άνεμος που δημιουργείται από την ισορροπία των δύο αυτών δυνάμεων, ονομάζεται γεωστροφικός άνεμος.



Σχήμα 1.

Όσο πιο πυκνές είναι οι ισοβαρείς καμπύλες σε ένα χάρτη επιφανείας, τόσο πιο μεγάλη είναι η δύναμη βαροβαθμίδας και άρα τόσο μεγαλύτερη και η ταχύτητα του ανέμου. Στην περίπτωση που οι ισοβαρείς είναι ευθείες παράλληλες, αλλά η κίνηση γίνεται κοντά στο έδαφος, τότε η δύναμη της βαροβαθμίδας ( $F_P$ ) αντισταθμίζεται από τη συνισταμένη της δύναμης Coriolis ( $F_C$ ) και της δύναμης της τριβής ( $F_T$ ). Στην περίπτωση αυτή ο άνεμος δεν πνέει παράλληλα προς τις ισοβαρείς, αλλά έχει στραφεί προς τις χαμηλές πιέσεις.

Ημερήσιοι άνεμοι. Στην κατηγορία αυτή των ανέμων, ανήκουν οι άνεμοι εκείνοι που δημιουργούνται στη διάρκεια του 24ώρου, εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας που παρατηρείται τόσο κατά την ημέρα όσο και κατά τη νύχτα, ανάμεσα στην ξηρά και στη θάλασσα ή ανάμεσα σε πεδινές και ορεινές περιοχές. Στη διάρκεια της μέρας η ξηρά θερμαίνεται γρηγορότερα και ισχυρότερα από τη θάλασσα, γιατί η θάλασσα έχει μεγαλύτερη θερμοχωρητικότητα και είναι διαπερατή σε μεγάλο βάθος από τις ηλιακές ακτίνες. Ο αέρας που βρίσκεται πάνω από την ξηρά θερμαίνεται κι αυτός πιο γρήγορα και πιο ισχυρά από τον αέρα που βρίσκεται πάνω από τη θάλασσα με αποτέλεσμα η πίεση πάνω από την ξηρά να είναι μικρότερη από ότι πάνω από τη θάλασσα και να δημιουργείται μια ροή ατμοσφαιρικού αέρα από τη θάλασσα προς την ξηρά. Ο άνεμος αυτός ονομάζεται θαλάσσια αύρα ή μπάτη. Η ένταση της θαλάσσιας αύρας αυξάνεται όσο αυξάνει η θερμοκρασία και γίνεται μέγιστη κατά τις πρώτες απογευματινές ώρες, όταν σημειώνεται η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά ανάμεσα στην ξηρά και τη θάλασσα. Στη συνέχεια ελαττώνεται και η θαλάσσια αύρα παύει να πνέει τις πρώτες νυχτερινές ώρες. Κατά τη διάρκεια της νύχτας η ξηρά ψύχεται γρηγορότερα από τη θάλασσα με αποτέλεσμα η πίεση πάνω από την ξηρά να γίνεται μεγαλύτερη, τι πάνω από τη



θάλασσα και να δημιουργείται μια ροή αέρα από την ξηρά προς τη θάλασσα. Ο άνεμος αυτός λέγεται απόγεια αύρα και πνέει περίπου μέχρι την ανατολή του ήλιου. Η ένταση και το ύψος της απόγεια αύρας είναι πολύ μικρότερα από την ένταση και το ύψος της θαλάσσιας αύρας. Αυτό συμβαίνει, γιατί οι θερμοκρασιακές μεταβολές ξηράς-θάλασσας είναι μεγαλύτερες την ημέρα παρά τη νύχτα.

Η τοπογραφική διαμόρφωση διαφόρων περιοχών της γης, σε συνάρτηση και με ορισμένες καιρικές συνθήκες, δημιουργεί τοπικούς ανέμους με χαρακτηριστικές πολλές φορές ονομασίες. Οι άνεμοι αυτοί, που χαρακτηρίζονται τοπικοί, είναι μικρής κλίμακας.

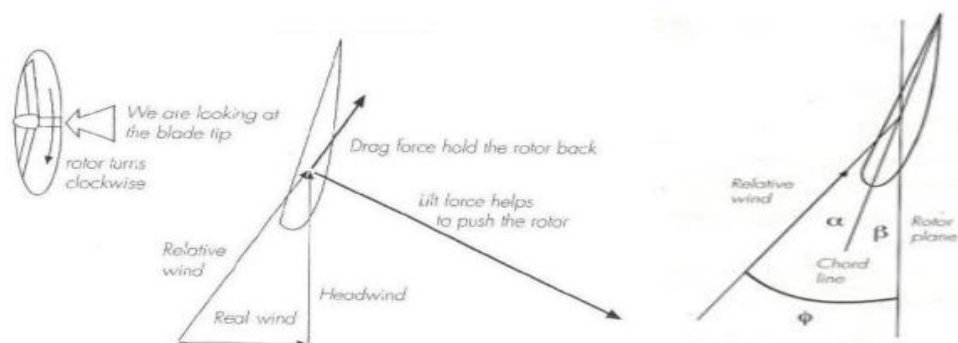
Etesians (μελτέμια). Είναι σταθεροί άνεμοι, συνήθως ΒΑ-ΒΔ διεύθυνσης που πνέουν στην ανατολική λεκάνη της Μεσογείου και ιδιαίτερα στο Αιγαίο πέλαγος από το Μάιο μέχρι και τον Οκτώβριο. Η μεγαλύτερη συχνότητα των ανέμων αυτών παρατηρείται από τα μέσα Ιουλίου μέχρι τα μέσα Σεπτεμβρίου. Η έντασή τους είναι μέτρια στο Ιόνιο και ισχυρή στο Αιγαίο. Οφείλονται στο θερινό βαρομετρικό χαμηλό των Ινδιών που εκτείνεται μέχρι την Κύπρο και τον Αντικυκλώνα των Αζορών, που επεκτείνεται μέχρι τα Βαλκάνια το καλοκαίρι, ή και σε επεκτάσεις αντικυκλώνων της Ευρώπης και της Ρωσίας.

Άνεμος τύπου Foehn. Είναι ισχυρός, ξηρός και θερμός άνεμος που αναπτύσσεται στην υπήνεμη πλευρά ενός ορεινού όγκου όταν ο ατμοσφαιρικός αέρας αναγκαστεί να υπερπηδήσει τον ορεινό αυτό όγκο. Οι αέριες μάζες, κατά την ανύψωσή τους στην προσήνεμη πλευρά, εκτονώνονται αδιαβατικά και ψύχονται στην αρχή με ρυθμό ίσο με την ξηρή αδιαβατική θερμοβαθμίδα ( $\Xi.A.\Theta.$   $10^{\circ}C/1000m$ ). Από το επίπεδο συμπύκνωσης και πάνω ο ρυθμός ψύξης ελαττώνεται και είναι ίσος με την τιμή της υγρής αδιαβατικής θερμοβαθμίδας ( $Y.A.\Theta.$ ). Τα ορογραφικά νέφη που σχηματίζονται δίνουν, συνήθως, βροχή κι έτσι ελευθερώνονται μεγάλα ποσά υδρατμών. Στη συνέχεια, ο αέρας που ξεπερνά τις κορυφές των ορεινών όγκων, κατεβαίνει στην υπήνεμη πλευρά, συμπιέζεται αδιαβατικά και θερμαίνεται. Ο ρυθμός θέρμανσής του είναι ίσος με την τιμή της  $\Xi.A.\Theta.$  κι έτσι ο αέρας φτάνει στα χαμηλά υψόμετρα σαν θερμός και πολύ ξηρός. Οι άνεμοι τύπου Foehn είναι γνωστοί με διαφορετικά ονόματα στα διάφορα μέρη του πλανήτη μας. Στην Ελλάδα τέτοιου τύπου άνεμος είναι ο Λίβας. Foehn ονομάζεται κυρίως στις Άλπεις όπου μελετήθηκε πρώτα, ενώ στα Βραχώδη όρη ονομάζεται chinook.

### **2.3 Βασικά στοιχεία Αεροδυναμικής**

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία αναφορά σε βασικά στοιχεία αεροδυναμικής και περιγράφεται συνοπτικά το σύστημα προσανατολισμού και του αεροδυναμικού συστήματος προστασίας furling. Η έλικα αποτελείται από τρία πτερύγια, έχει οριζόντιο άξονα περιστροφής και είναι κατασκευασμένη από σουηδικό πεύκο. Η κατασκευή της έλικας από ξύλο έχει δοκιμαστεί και σε μεγάλες ανεμογεννήτριες, αλλά χρησιμοποιείται αρκετά σπάνια εξαιτίας προβλημάτων αποσύνθεσης, των απαιτήσεων συντήρησης, καθώς και της δυσκολίας μαζικής παραγωγής. Τα βασικά πλεονεκτήματα του ξύλου είναι πως είναι ελαφρύ, εύκολο στην επεξεργασία, έχει καλή αντοχή και το σημαντικότερο δεν παρουσιάζει προβλήματα κόπωσης. Έτσι, ενδείκνυται για μικρές κατασκευές που πραγματοποιούνται χωρίς καλούπια.

Οι μελέτες πάνω στην αεροδυναμική των πτερυγίων των ανεμογεννητριών βασίστηκαν πάνω σε μελέτες αεροδυναμικής για αεροσκάφη. Οι αεροτομές που χρησιμοποιούνται στα πτερύγια ανεμογεννητριών συχνά είναι οι ίδιες που χρησιμοποιούνται σε αεροσκάφη. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η αεροτομή του άκρου ενός πτερυγίου που στρέφεται δεξιόστροφα. Η ακμή της αεροτομής στην οποία προσπίπτει ο άνεμος ονομάζεται ακμή πρόσπτωσης (leading edge) και η άλλη ακμή ονομάζεται ακμή διαφυγής (trailing edge). Η ευθεία γραμμή που ενώνει την ακμή διαφυγής με το μέσο της ακμής πρόσπτωσης ονομάζεται χορδή της αεροτομής. Θεωρώντας το άκρο του πτερυγίου ακίνητο «φαίνονται» δύο ταχύτητες του ανέμου: η πραγματική ταχύτητα ανέμου και η ταχύτητα του ανέμου που προκαλείται από την περιστροφή του πτερυγίου και ισούται με τη μεταφορική ταχύτητα του άκρου του πτερυγίου. Η συνιστάμενη ταχύτητα ανέμου όπως φαίνεται από την ακίνητο άκρο ενός πτερυγίου είναι η σχετική ταχύτητα ανέμου  $u_r$ . Έτσι, ασκούνται στο άκρο του πτερυγίου δύο δυνάμεις. Η μία είναι η δύναμη τριβής του αέρα (drag force) που έχει την κατεύθυνση της σχετικής ταχύτητας και η άλλη είναι η δύναμη άνωσης (lift force). Η δύναμη άνωσης είναι αυτή που επιτρέπει στην άκρη του πτερυγίου να κινείται με μεγαλύτερη μεταφορική ταχύτητα από την ταχύτητα του ανέμου.



Σχήμα 2.

Η δύναμη άνωσης είναι υπεύθυνη για την περιστροφική κίνηση των πτερυγίων, ενώ η δύναμη τριβής αντιτίθεται στην κίνηση. Για να επιτευχθεί υψηλός αεροδυναμικός συντελεστής του δρομέα χρειάζεται ο λόγος της τριβής προς την άνωση να είναι ο ελάχιστος. Ο λόγος αυτός εξαρτάται από την γωνία πρόσπτωσης  $\alpha$  (attack) που ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της σχετικής ταχύτητας του ανέμου και της χορδής της αεροτομής και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Η βέλτιστη γωνία πρόσπτωσης μετά από μελέτες σε αεροσήραγγες είναι περίπου  $4^\circ$ . Γενικά όσο αυξάνεται η γωνία  $\alpha$  αυξάνεται η άνωση μέχρι μία οριακή τιμή από την οποία το πτερύγιο περνάει στην κατάσταση stall. Στο ίδιο σχήμα παριστάνεται η γωνία βήματος  $\beta$  (pitch) μεταξύ της χορδής της αεροτομής και του επίπεδου περιστροφής. Σημειώνουμε πως η γωνία  $\alpha$  εξαρτάται από την πραγματική ταχύτητα του ανέμου, ενώ η γωνία  $\beta$  είναι κατασκευαστικό χαρακτηριστικό του πτερυγίου. Τέλος, ορίζεται η γωνία ροής (flow)  $\phi$  που είναι η γωνία μεταξύ της σχετικής ταχύτητας του ανέμου και του επίπεδου περιστροφής και ισούται με το άθροισμα των γωνιών  $\alpha$  και  $\beta$ . Επειδή η μεταφορική ταχύτητα  $\omega \cdot r$  δεν είναι σταθερή σε όλο το μήκος του πτερυγίου αλλά μειώνεται όσο κινούμαστε προς το εσωτερικό του, για να παραμένει σταθερή η γωνία  $\alpha = 4^\circ$  θα πρέπει η γωνία  $\beta$  να μεταβάλλεται. Έτσι, κοντά στον άξονα περιστροφής όπου η μεταφορική ταχύτητα είναι μικρή η γωνία  $\beta$  πρέπει να είναι μεγάλη, ενώ όσο κινούμαστε προς το άκρο που η μεταφορική ταχύτητα αυξάνεται, η γωνία  $\beta$  μειώνεται.

### **Κεφάλαιο 3. Ανεμογεννήτριες και είδη ανεμογεννητριών**

Ως ανεμογεννήτρια καλείται η συσκευή που μετατρέπει την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρισμό. Η ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας , η χρήση και ανάπτυξη των πρώτων ανεμόμυλων σχεδόν μια χιλιετία πριν , αλλά και η ανάγκη του ανθρώπου για να στραφεί στην εύρεση και αξιοποίηση νέων μορφών ενέργειας , είχαν ως αποτέλεσμα τη δομή και τη μεγάλη ποικιλία των σύγχρονων ανεμογεννητριών. Οι εφαρμογές των ανεμογεννητριών ποικίλουν ανάλογα με το μέγεθος τους. Οι πιο μικρές ανεμογεννήτριες χρησιμοποιούνται για τη φόρτιση μπαταριών , για βοηθητική τροφοδότηση σκαφών , τροχόσπιτων ακόμα και για τα προειδοποιητικά σήματα της κυκλοφορίας. Οι ελαφρώς μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες αξιοποιούνται για την οικιακή αυτονομία καθώς και για την πώληση της περίσσειας ενέργειας στον κεντρικό πάροχο του δικτύου μέσω του ηλεκτρικού δικτύου. Τέλος, στην ανώτερη κλίμακα έχουμε τις μεγάλες συστοιχίες ανεμογεννητριών , γνωστές και ως αιολικά πάρκα , που αποτελούν μία από τις βασικότερες μορφή ανανεώσιμης πηγής ενέργειας και αξιοποιούνται παγκοσμίως τόσο για την κάλυψη ενός μεγάλου ποσοστού της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των χωρών , όσο και για την προσπάθεια απεξάρτησης μας από τις συμβατικές πηγές ενέργειας , όπως τα ορυκτά καύσιμα.

Τις ανεμογεννήτριες πλέον τις χωρίζουμε σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο περιστρέφεται ο στρόβιλος. Προκύπτουν έτσι οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα ,όπου περιστρέφονται γύρω από ένα οριζόντιο άξονα (Horizontal Axis Wind Turbine) και τις ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα , οι οποίες αντίστοιχα περιστρέφονται γύρω από ένα κάθετο άξονα (Vertical Axis Wind Turbine).

### **3.1 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα**

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα είναι το πιο διαδεδομένο είδος ανεμογεννητριών και έχουν επικρατήσει στην παγκόσμια αγορά σε ποσοστό 90%. Έχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά με τους παραδοσιακούς ανεμόμυλους , τα πτερύγια των οποίων μοιάζουν με έλικα και περιστρέφονται γύρω από έναν παράλληλο στο έδαφος άξονα. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα έχουν το ρότορα και την γεννήτρια στη κορυφή και είναι απαραίτητο να είναι τοποθετημένες στη διεύθυνση του ανέμου για τη σωστή λειτουργία τους. Η χρήση τους είναι ενδεδειγμένη σε μη κατοικημένες περιοχές λόγω της έκτασης που απαιτούν οι εγκαταστάσεις τους, ενώ το ποσό ισχύος που παράγουν κυμαίνεται από 1KW έως 6MW και εξαρτάται από τη διάμετρο του ρότορα και το ύψος του πύργου. Η μεγαλύτερη ανεμογεννήτρια σήμερα , είναι η Haliade 150 , η οποία βρίσκεται εγκατεστημένη στα ανοιχτά του λιμανιού της Οστάνδης

στο Βέλγιο. Η ισχύς της είναι 6MW , έχει έλικες μήκους 73 μέτρων και πύργο ύψους 78 μέτρων, ενώ η ενέργεια που παράγει είναι ικανή να καλύψει τις ανάγκες 5.000 σπιτιών.



**Εικόνα 13. ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ**

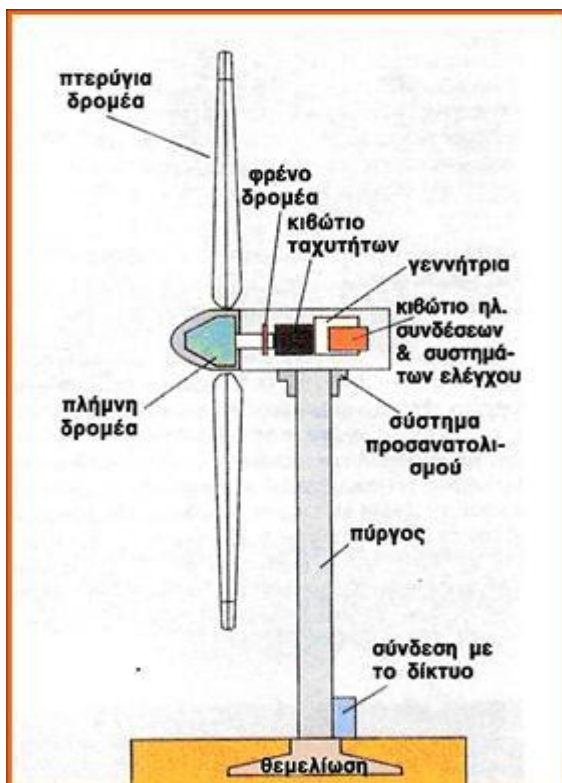
### 3.1.1 Είδη ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα

Για την βέλτιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας απαιτείται η κατάλληλη τοποθέτηση της ανεμογεννήτριας σχετικά με την διεύθυνση του ανέμου. Ο πύργος προκαλεί αναταράξεις στον άνεμο για αυτό και οι ανεμογεννήτριες βρίσκονται αντίθετα από την διεύθυνση του ανέμου. Τα πτερύγια τους είναι κατασκευασμένα από άκαμπτο υλικό και τοποθετούνται στην κατάλληλη απόσταση από το πύργο έτσι ώστε να μη ταλαντώνονται από υψηλούς ανέμους, αλλά και στη περίπτωση αυτή να αποφεύγεται η επαφή τους με το πύργο. Πολύ σπάνιο είναι πλέον το φαινόμενο οι ανεμογεννήτριες να τοποθετούνται και να λειτουργούν στη διεύθυνση του αέρα , στις οποίες παραλείπεται ο μηχανισμός για τον προσανατολισμό τους ενώ τα πτερύγια τους είναι πιο εύκαμπτα για να μπορούν να μειώνουν την αντίσταση του ανέμου. Στη τελευταία περίπτωση καλείται πολύ συχνά να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο διαταράξεως του ανέμου που προκαλείται από το πύργο.

Ένας ακόμη τρόπος να διαχωρίσουμε τις ανεμογεννήτριες είναι με βάση τον αριθμό των πτερυγίων τους. Υπάρχουν ανεμογεννήτριες με ένα πτερύγιο , που χρησιμοποιούνται σπάνια λόγω της επίδρασης του πύργου και της έλλειψης

σταθερότητας που τις χαρακτηρίζει. Το πλεονέκτημά τους είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής και το βάρος τους. Στη συνέχεια, έχουμε τις ανεμογεννήτριες δύο πτερυγίων, οι οποίες όμως έχουν να αντιμετωπίσουν τα ίδια προβλήματα με εκείνες του ενός πτερυγίου, αλλά σε μικρότερο βαθμό. Οι πλέον σύγχρονες ανεμογεννήτριες, όπου η εφαρμογή τους είναι πιο διαδεδομένη, είναι τριών πτερυγίων, και χαρακτηρίζονται από την σταθερότητα που τις διακατέχει, την ανθεκτικότητα σε υψηλούς ανέμους, την περιορισμένη επίδραση από τον πύργο καθώς και από την υψηλότερή τους απόδοση. Υπάρχουν ανεμογεννήτριες με περισσότερα από τρία πτερύγια. Συνηθίζεται τις ανεμογεννήτριες με πολλά πτερύγια να τις αποκαλούν ανεμογεννήτριες χαμηλής ταχύτητας, καθώς σε χαμηλές ταχύτητες ανέμων υπάρχει υψηλή αναλογία αξιοποίησης αυτού και ροπής. Αντίθετα οι ανεμογεννήτριες με λίγα πτερύγια ονομάζονται υψηλής ταχύτητας, αφού για να πετύχουν την ίδια αναλογία απαιτείται μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου και αυτός είναι ο λόγος όπου τα πτερύγια τους είναι αρκετά ελαφρύτερα.

### 3.1.2 Μέρη ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα



Εικόνα 14. ΜΕΡΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΥ ΑΞΟΝΑ

#### Πτερύγια

Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών χρησιμοποιούνται για να εξάγουν την κινητική ενέργεια του ανέμου. Είναι σχεδιασμένα με αεροδυναμική διατομή και εκμεταλλεύονται τον άνεμο με τη δύναμη της ανύψωσης που δημιουργείται λόγω της διαφοράς πίεσης που βρίσκεται ανάμεσα στις πλευρές των πτερυγίων. Για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση, τα πτερύγια των σύγχρονων ανεμογεννητριών έχουν κωνοειδή μορφή και την ικανότητα να στρέφονται ώστε να λάβουν την καταλληλότερη γωνία σχετικά με τη διεύθυνση του ανέμου. Στις πρώτες εφαρμογές των ανεμογεννητριών, τα πτερύγια ήταν κατασκευασμένα από ξύλο, ένα υλικό με φυσική σύνθετη δομή χαμηλής ποιότητας. Η μειωμένη του όμως αντοχή σε ακραίες καιρικές συνθήκες και υγρασία καθώς και το υψηλό κόστος επεξεργασίας τους, ανάγκασε τους κατασκευαστές να στραφούν στην αναζήτηση ενός άλλου, πιο κατάλληλου υλικού. Στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες, λοιπόν, η κατασκευή των πτερυγίων γίνεται από ίνες γυαλιού το οποίο είναι ενισχυμένο με πλαστικό ( carbon fibre reinforced plastic - CFRP), όπως είναι η εποξική και ο πολυεστέρας. Η εποξική έχει το πλεονέκτημα ότι είναι κατά 30% πιο ελαφρύ υλικό σε σύγκριση με την πολυεστερική ρυτίνη.

### Πύργος

Ο πύργος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μέρη μιας ανεμογεννήτριας. Στο πύργο γίνεται η στήριξη της ατράκτου και του κόμβου του ρότορα. Το ύψος του πύργου είναι μία βασική μεταβλητή στην εξίσωση παραγωγής της ενέργειας από ανεμογεννήτριες αφού όπως έχει προαναφερθεί η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται όσο αυξάνεται το ύψος ενώ οι διαταραχές μειώνονται. Κατά συνέπεια, λοιπόν, οι ψηλότεροι πύργοι επιτρέπουν στην ανεμογεννήτρια να συλλάβει περισσότερη ενέργεια και να παράγει μεγαλύτερες ποσότητες ηλεκτρισμού. Το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένοι, είναι σωληνοειδής χάλυβας, σκυρόδεμα ή πλέγμα χάλυβα. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι πτερυγίων, αλλά οι πιο διαδεδομένοι είναι οι παρακάτω.

- Οι σωληνοειδής πύργοι (Tubular Tower) οι οποίοι κατασκευάζονται από τυλιγμένες πλάκες χάλυβα συγκολλημένες με πλέγματα πάνω κάτω. Έχουν θύρες για την τοποθέτηση σκαλών που επιτρέπουν την πρόσβαση στο μηχανισμό εκτροπής και τα καλώδια τροφοδοσίας, ενώ υπάρχουν και σκάλες στο εξωτερικό του πύργου για τη συντήρηση, τους ελέγχους και την αντιμετώπιση προβλημάτων που τυχόν παρουσιαστούν στον άτρακτο.
- Ο καλωδιωτός πύργος ( Guyed Tower ) που αποτελεί μία αρκετά ανθεκτική και οικονομική κατασκευή η οποία όμως απαιτεί για την εφαρμογή της περισσότερο χώρο γύρω από το πύργο.

- Ο πύργος πλέγμα ( Lattice Tower ) ο οποίος είναι κατασκευασμένος από ιδανικά διαμορφωμένους ράβδους χάλυβα που είναι τοποθετημένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να σχηματίζουν ένα ενιαίο πλέγμα. Το συγκεκριμένο είδος πύργου αποτελεί ίσως τη πιο συνηθισμένη επιλογή των κατασκευαστών αφού διακρίνεται για την αντοχή, την εύκολη τοποθέτηση καθώς και για το χαμηλό κόστος.
- Τέλος για την παραγωγή αιολικής ενέργειας καταναλωτών χρησιμοποιούνται πύργοι με κλίση προς τα πάνω ( Tilt up Tower ) , οι οποίοι έχουν το δικό τους σύστημα κλειδώματος που δίνει τη δυνατότητα ενώ ο στρόβιλος είναι κλειδωμένος, οι ανεμογεννήτριες να λειτουργούν.

### Κόμβος του ρότορα (HUB)

Είναι το σημείο που συνδέονται τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας με το κύριο άξονα. Τα πτερύγια είναι τοποθετημένα στα πέλματα του κόμβου ενώ οι οπές του μπορούν να αυξομειωθούν ώστε να μπορεί να προσαρμοστεί η γωνία του ακροπτερυγίου. Ο κόμβος μπορεί να είναι άκαμπτος ή να ταλαντεύεται. Ένα από τα βασικότερα προβλήματα του κόμβου είναι ότι θα πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτικός στη φθορά του μετάλλου, γεγονός όμως που δύσκολα μπορεί να επιτευχθεί σε μεγάλο βαθμό, καθώς πρόκειται για συγκολλημένη κατασκευή. Στις ανεμογεννήτριες με τρία πτερύγια το hub είναι σχετικά άκαμπτο συνεπώς δεν επηρεάζει τη συνολική δυναμική συμπεριφορά. Αντίθετα στις ανεμογεννήτριες δύο πτερυγίων όπου ο κόμβος έχει την ικανότητα να ταλαντεύεται, η δυναμική αντίδραση της εξαρτάται από τις ιδιότητες απόσβεσης και ελαστικότητας του συστήματος.

### Άτρακτος

Η άτρακτος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μέρη της σύγχρονης ανεμογεννήτριας, αφού περιλαμβάνει βασικά στοιχεία αυτής, όπως το κιβώτιο ταχυτήτων και τη γεννήτρια. Είναι κατασκευασμένη από χάλυβα και σχετικά άκαμπτη συνεπώς δε συμβάλει στη δυναμική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας. Τέλος, στα νέα μοντέλα ανεμογεννητριών υπάρχει δυνατότητα πρόσβασης στην άτρακτο μέσω του πύργου, γεγονός που βοηθάει στην αντιμετώπιση προβλημάτων που ίσως προκύψουν.

### Σύστημα πέδησης



Η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη με το κύβο της ταχύτητας του ανέμου. Από την εξίσωση αυτή προκύπτει ότι σε περίπτωση μεγάλου ανέμου, η ισχύς μπορεί να φτάσει σε ανεξέλεγκτα υψηλά επίπεδα. Για την αντιμετώπιση τέτοιων καταστάσεων, οι ανεμογεννήτριες διαθέτουν δύο διαφορετικά συστήματα πέδησης, που διασφαλίζουν την ομαλή και ασφαλή λειτουργία τους.

- Μηχανικά φρένα: Χρησιμοποιούνται συνήθως για να ακινητοποιήσουν πλήρως την ανεμογεννήτρια. Βρίσκονται ανάμεσα στο ρότορα και στο κιβώτιο ταχυτήτων, ενώ υπάρχουν περιπτώσεις, όπου η ροπή στον άξονα χαμηλής ταχύτητας μπορεί να είναι πολύ μεγάλη, με αποτέλεσμα οι κατασκευαστές να επιλέγουν η τοποθέτηση να γίνεται μεταξύ κιβωτίου ταχυτήτων και γεννήτριας. Το μηχανικό φρένο αποτελείται από ένα δισκόφρενο φτιαγμένο από χάλυβα, είναι ένα σύστημα ασφαλείας που ενεργοποιείται σε περίπτωση βλάβης του συστήματος και η ενεργοποίησή του γίνεται με υδραυλική πίεση λαδιών ή με ένα ισχυρό ελατήριο.
- Αεροδυναμικά φρένα: Τα φρένα αυτά λειτουργούν καθορίζοντας τη γωνία των πτερυγίων σε σχέση με τη διεύθυνση του ανέμου προκειμένου να αποφευχθούν ισχυρές αεροδυναμικές αντιστάσεις. Τα συστήματά τους μπορεί να είναι υδραυλικά ή και σε πολλές περιπτώσεις να λειτουργούν με ειδικά ελατήρια ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα λειτουργίας σε περίπτωση διακοπής του ηλεκτρικού ρεύματος. Οι κατασκευαστές δείχνουν να τα προτιμούν από τα μηχανικά φρένα ως σύστημα πέδησης της ανεμογεννήτριας, καθώς δεν καταπονούν τόσο τα μέρη του συστήματος που χρησιμοποιούν.

### Κιβώτιο ταχυτήτων

Σκοπός του κιβωτίου ταχυτήτων είναι η επιτάχυνση της ταχύτητας περιστροφής του άξονα χαμηλής ταχύτητας πριν αυτός συνδεθεί με τη γεννήτρια. Η αναλογία του κιβωτίου εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων καθώς και από τον τύπο της γεννήτριας. Το κιβώτιο ταχυτήτων θα πρέπει να είναι αρκετά ανθεκτικό σε ένα εύρος δυναμικών φορτίων, καθώς υπάρχουν σταθερά και μεταβλητά φορτία που επιδρούν στην φθορά της γεννήτριας.

### Ανεμόμετρο

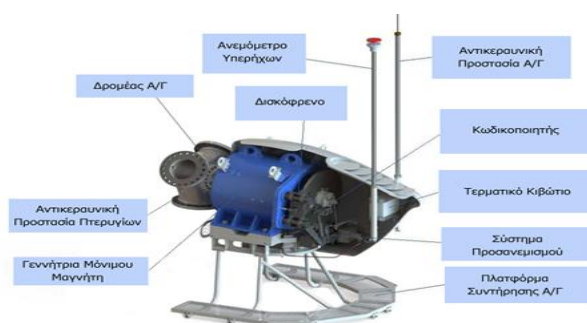
Το ανεμόμετρο είναι η συσκευή που χρησιμοποιούν οι ανεμογεννήτριες για τη μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου. Ταυτόχρονα το ανεμόμετρο έχει ενσωματωμένους ανεμοδείκτες οι οποίοι προσδιορίζουν την ακριβή κατεύθυνση του ανέμου, ώστε να ενημερώσουν, μέσω ενός συστήματος επικοινωνίας, το σύστημα εκτροπής (3.1.2.8) και εκείνο με τη σειρά του να στρέψει την ανεμογεννήτρια κατάλληλα για να εκμεταλλευτεί στο μέγιστο βαθμό την ισχύ του ανέμου. Το ανεμόμετρο τοποθετείται στη κορυφή της ατράκτου και άλογα με τον τρόπο λειτουργίας του, υπάρχουν πολλά είδη στην αγορά, όπως τα περιστροφικά, τα θερμοηλεκτρικά και αυτά που λειτουργούν με αλλαγή φάσης.

### Σύστημα εκτροπής

Για να επιτευχθεί η μέγιστη εκμετάλλευση της ισχύς του ανέμου και κατά συνέπεια μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητο ο άξονας του ρότορα να βρίσκεται στην ακριβή διεύθυνση της ταχύτητας του ανέμου. Για να επιτευχθεί αυτό, έχουν αναπτυχθεί μηχανισμοί εκτροπής, οι οποίοι λαμβάνοντας από τον ανεμοδείκτη, την πληροφορία σχετικά με τη διεύθυνση του ανέμου, στρέφουν την ανεμογεννήτρια στη κατάλληλη κατεύθυνση.

### Γεννήτρια

Η μετατροπή της μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική γίνεται μέσω της γεννήτριας. Στις ανεμογεννήτριες συνήθως χρησιμοποιούνται ασύγχρονες γεννήτριες ή γεννήτριες επαγωγής. Οι γεννήτριες επαγωγής έχουν πλεονέκτημα τη μηχανική τους λιτότητα, την αντοχή, τη δύναμή τους και το κλειστό σύστημα ψύξης τους. Παρουσιάζουν όμως ένα βασικό μειονέκτημα έναντι των σύγχρονων μηχανών και αυτό είναι το γεγονός ότι ο στάτης για να μπορέσει να ξεκινήσει τη λειτουργία του θα πρέπει πρώτα να μαγνητιστεί από το δίκτυο.



Εικόνα 15. ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

### 3.1.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα

#### ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Τα πτερύγια μεταβλητού βήματος δίνουν τη δυνατότητα βέλτιστης γωνίας προσβολής του ανέμου με αποτέλεσμα η ανεμογεννήτρια να εκμεταλλεύεται στο μέγιστο την αιολική ενέργεια.
- Το ύψος του πύργου επιτρέπει τη πρόσβαση σε ισχυρότερους ανέμους. Ειδικά σε περιοχές όπου οι διαβαθμίσεις του αέρα είναι μεγάλες, παρατηρείται ότι κάθε δέκα μέτρα προς τα πάνω, η ταχύτητα του ανέμου μπορεί να αυξηθεί έως και 20% ενώ η ισχύς εξόδου κατά 34% αντίστοιχα.
- Υψηλή απόδοση καθώς τα πτερύγια κινούνται συνεχώς κάθετα στη διεύθυνση του ανέμου κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής, αντίθετα με τις ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα οι οποίες εφαρμόζουν τεχνικές όπου οι επιφάνειες αεροτομών εκτελούν παλινδρομική κίνηση για να οπισθοδρομήσουν ενάντια στον αέρα.
- Η πρόσοψη ενός πτερυγίου ανεμογεννήτριας οριζοντίου άξονα , διατηρεί μία συγκεκριμένη γωνία, γεγονός που εξασφαλίζει μία συνεπή πλευρική φόρτωση ανέμου σε μία πλήρη περιστροφή.

#### ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Οι ψηλοί πύργοι και κατ' επέκταση τα αντίστοιχα πτερύγια τους έχουν αρκετά δύσκολη και ακριβή μεταφορά και τοποθέτηση, κοστίζοντας περίπου το 20% των δαπανών εξοπλισμού.
- Απαιτείται ισχυρότερη και πιο ογκώδης κατασκευή πύργου ώστε να είναι ικανός ο πύργος να εξασφαλίσει τη στήριξη των βαριών πτερυγίων, του κιβωτίου των ταχυτήτων και της γεννήτριας.
- Για την τοποθέτηση των ψηλών ανεμογεννητριών μεγάλοι και ακριβοί γερανοί, καθώς και εξειδικευμένο ανθρώπινο δυναμικό για να τις χειριστεί.
- Οι παρεμβολές των ανεμογεννητριών μπορούν να επηρεάσουν τις εγκαταστάσεις των ραντάρ και να προκαλέσουν σύγχυση στα σήματά τους.
- Απαιτούν πρόσθετο μηχανισμό ελέγχου εκτροπής για να στρέφουν την ανεμογεννήτρια προς τον άνεμο.
- Τα πτερύγια των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα έχουν παρόμοιο σχεδιασμό με τα πτερά ενός αεροπλάνου, γεγονός που προκαλεί δύναμη

άνωσης με αποτέλεσμα όταν τα διαπερνά ο άνεμος να προκαλούν ηχορύπανση.

- Το μεγάλο τους ύψος, τις καθιστά ορατές από μεγάλες αποστάσεις, επεμβαίνοντας στην ομορφιά και ομαλότητα των τοπίων

### 3.2 Ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα είναι ένα είδος ανεμογεννητριών στο οποίο ο κύριος άξονας του ρότορα τίθεται εγκάρσια προς τον άνεμο. Το χαμηλό τους ύψος τις καθιστά ιδανικές για την σύλληψη χαμηλότερης ταχύτητας ανέμου σε κατοικημένες και αστικές περιοχές. Τα βασικά τους μέρη, όπως είναι το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια, αντίθετα με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, βρίσκονται στη βάση τους. Το συγκεκριμένο είδος ανεμογεννήτριας περιστρέφεται γύρω από ένα κάθετο άξονα και τα πτερύγια του είναι έτσι τοποθετημένα ώστε να εκμεταλλεύονται τον άνεμο οποιαδήποτε και αν είναι η διεύθυνσή του. Η ικανότητα αυτή απλουστεύει το σύστημα της ανεμογεννήτριας αφού δε χρειάζεται κάποιο σύστημα εκτροπής για να παράγεται η μέγιστη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος είναι ιδανικές για ιδιόκτητες εφαρμογές σε ακίνητα και επιχειρήσεις, αφού είναι αισθητά πιο αθόρυβες, χρειάζονται λιγότερα έξοδα συντήρησης και απαιτούν μικρότερο κόστος μεταφοράς και εγκατάστασης.



Εικόνα 16. ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΚΑΘΕΤΟΥ ΑΞΟΝΑ

### 3.2.1 Είδη ανεμογεννητριών κάθετου άξονα

Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα διακρίνονται σε δύο επιμέρους υποκατηγορίες, τις Darrieus και τις Savonius.

#### 3.2.1.1 Ανεμογεννήτρια Darrieus

Το όνομά τους προέρχεται από τον εφευρέτη τους Γάλλο Georges Darrieus. Οι ανεμογεννήτριες Darrieus έχουν αρκετά υψηλή απόδοση αλλά καλούνται να αντιμετωπίσουν προβλήματα τα οποία προκύπτουν από τη μεγάλη ροπή την οποία παράγουν. Με την παραγωγή υψηλών επιπέδων ροπής υπάρχει μεγάλη κυμάτωση και καταπόνηση στον πύργο. Στην προσπάθεια αντιμετώπισης αυτής της κυμάτωσης έχει παρατηρηθεί ότι τα τρία η περισσότερα πτερύγια, παρόλο που έχουν μικρότερη απόδοση σε σχέση με εκείνη των δύο πτερυγίων, προσφέρουν μεγαλύτερη σταθερότητα του ρότορα και μειώνουν το φαινόμενο της κυμάτωσης. Ένα ακόμη πρόβλημα που αντιμετωπίζει το συγκεκριμένο είδος ανεμογεννήτριας είναι ότι η γωνία προσβολής μεταβάλλεται καθώς ο στρόβιλος στρέφεται, με αποτέλεσμα κάθε λεπίδα να παράγει μέγιστη ροπή μόνο δύο φορές σε κάθε κύκλο. Επιπρόσθετα, η κύρια μάζα του περιστρεφόμενου μηχανισμού βρίσκεται στη περιφέρεια και όχι στο κόμβο του ρότορα δημιουργώντας ανεπιθύμητες φυγόκεντρες δυνάμεις. Τέλος έχουν χαμηλή ροπή εκκίνησης με αποτέλεσμα να απαιτείται εξωτερική πηγή τροφοδοσίας για την ομαλή εκκίνηση και λειτουργία τους.



**Εικόνα 17. ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ DARRIEUS**

### 3.2.1.2 Ανεμογεννήτρια Savonius

Οι ανεμογεννήτριες Savonius αποτελούν εφεύρεση του Φιλανδού μηχανικού Siguard Savonius. Η χρήση τους περιορίζεται στην άντληση νερού ή στην άλεση σιτηρών, αφού έχουν χαμηλή απόδοση συγκριτικά με άλλα είδη ανεμογεννητριών. Το χαρακτηριστικό τους είναι ότι η ταχύτητα περιστροφής τους δε μπορεί να ξεπεράσει τη ταχύτητα του ανέμου, γεγονός που τις καθιστά αναποτελεσματικές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα βασικά τους πλεονεκτήματα είναι, ότι μπορούν να λειτουργήσουν σε χαμηλές ταχύτητες ανέμου όπου η ροπή είναι μεγάλη, ενώ χαρακτηρίζονται για τη λιτότητα της κατασκευής τους, το χαμηλό κόστος τους και το γεγονός ότι είναι ιδιαίτερα αθόρυβες.



**Εικόνα 18. ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑ SAVONIUS**

### 3.2.2 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Ανεμογεννητριών κάθετου άξονα

#### ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Έχουν την ικανότητα να αξιοποιούν τον άνεμο ανεξάρτητα από τη διεύθυνση και την έντασή του, χωρίς τη χρήση μηχανισμού εκτροπής και ελέγχου του βήματος της γωνίας των πτερυγίων.
- Έχουν χαμηλότερες αρχικές ταχύτητες ανέμου, συγκριτικά με τις αντίστοιχες των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα.
- Δεν απαιτούν ογκώδεις και πολυδάπανες κατασκευές υψηλών πύργων, αφού συνήθως τοποθετούνται σε χαμηλά επίπεδα
- Το κιβώτιο ταχυτήτων καταπονείται λιγότερο, μειώνοντας σημαντικά τις πιθανότητες βλάβης του. Ακόμα και σε περίπτωση όμως που

απαιτείται επιδιόρθωση ή αντικατάσταση, το γεγονός ότι το κιβώτιο βρίσκεται στη βάση του και όχι στη κορυφή, καθιστά τη διαδικασία πιο απλή και σημαντικά πιο οικονομική.

- Μπορούν να εγκατασταθούν σε ένα αιολικό πάρκο, δίπλα σε ήδη υπάρχουσες ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα, αυξάνοντας την ισχύ και την απόδοσή του.
- Είναι αισθητά πιο αθόρυβες από αυτές του οριζόντιου άξονα.
- Μπορούν να τοποθετηθούν σε περιοχές όπου η νομοθεσία απαγορεύει τις ψηλές δομές και κατασκευές.

## ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- Η υψηλή ενέργεια του ανέμου σε μεγάλα ύψη μένει ανεκμετάλλευτη λόγω του χαμηλού τους ύψος.
- Στα πτερύγια των ανεμογεννητριών κάθετου άξονα ασκούνται πολύπλευρες δυνάμεις κατά τη διάρκεια μιας περιστροφής, με αποτέλεσμα να τα καταπονούν και να τους προκαλούν βλάβες.
- Για εφαρμογές ανοιχτού πεδίου δεν είναι οικονομικά ανταγωνιστικές συγκριτικά με τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα.
- Χαρακτηρίζονται από χαμηλή αποδοτικότητα, γεγονός που περιορίζει την ανάπτυξή τους.

### 3.3 Ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών

Οι ανεμογεννήτριες σταθερών στροφών έχουν σταθερή ταχύτητα περιστροφής ανεξάρτητα από την ταχύτητα του ανέμου. Σε αυτό το είδος ανεμογεννήτριας η γεννήτρια συνδέεται απευθείας στο δίκτυο μέσω ενός μετασχηματιστή ρυθμιστή επιπέδου τάσης. Η συχνότητα περιστροφής της γεννήτριας και τις ανεμογεννήτριας καθορίζεται από τη συχνότητα του δικτύου. Βασικό πλεονέκτημα τους είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής καθώς δεν απαιτούν συσκευές για το συγχρονισμό και επιπλέον ηλεκτρονικά ισχύος. Το μειονέκτημά τους είναι η αδυναμία ελέγχου των διακυμάνσεων της ισχύος εξόδου που προέρχεται από τις διακυμάνσεις του αέρα και από τα μεγάλα ρεύματα εκκίνησης.

### 3.4 Ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών

Οι ανεμογεννήτριες μεταβλητών στροφών διαμορφώνουν την ταχύτητα περιστροφής τους ελεγχόμενα ανάλογα με τη ταχύτητα του ανέμου. Η σύνδεση της ανεμογεννήτριας με το δίκτυο απαιτεί την ύπαρξη ηλεκτρονικών ισχύος ώστε η γεννήτρια να αποδεσμεύεται από την συχνότητα του δικτύου. Τα πλεονεκτήματα των ανεμογεννητριών σταθερών στροφών είναι ότι αξιοποιούν καλύτερα την αιολική ισχύ έχοντας καλύτερη απόδοση, αποδίδουν σταθερή ροπή, ελέγχεται η άεργος ισχύς καθώς και υπάρχει μικρότερη καταπόνηση στα μηχανικά μέρη της ανεμογεννήτριας αφού αποσβένονται οι διακυμάνσεις του ανέμου και της μηχανικής ροπής. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι εξαιτίας της χρήσης σύγχρονων ηλεκτρονικών ισχύος αυξάνεται το κόστος της εγκατάστασης ενώ παράλληλα πολλαπλασιάζονται οι απώλειες ισχύος.

## **Κεφάλαιο 4. Πλωτές Ανεμογεννήτριες**

### **4.1 Τι είναι οι πλωτές ανεμογεννήτριες**

Τον Ιανουάριο του 2007, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή παρουσίασε μια ανεξάρτητη δέσμευση σε μια έκθεση με τίτλο «Ενεργειακή πολιτική για την Ευρώπη». Η πρόταση αποσκοπεί στη μείωση των εκπομπών αερίων κατά 20% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, με υποχρεωτικό στόχο για χρήση τουλάχιστον 10% βιοκαυσίμων και 20% των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Commission of the European Communities, 2007). Η αιολική ενέργεια είναι η ισχυρότερα αναπτυσσόμενη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας στον κόσμο την τελευταία δεκαετία, ιδιαίτερα στην Ευρώπη, όπου αντιπροσωπεύει το 6,3% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται, και το 21,4% της ενέργειας που μπορεί να παραχθεί με βάση τις ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις (European Wind Energy Association [EWEA], 2012). Ωστόσο, οι υπάρχουσες παγκόσμιες εγκαταστάσεις για την παραγωγή αιολικής ενέργειας δεν έχουν επεκταθεί περαιτέρω και αυτό οφείλεται εν μέρει:

1. Στο χαμηλό κόστος των υφιστάμενων πηγών παραγωγής ενέργειας,
2. Στις ανησυχίες σχετικά με την ομαλή ηλεκτρική λειτουργία του δικτύου που οφείλεται στη διαλείπουσα μορφή της αιολικής ενέργειας,
3. Στις δυσκολίες σχετικά με τη χωροθέτηση των αιολικών πάρκων λόγω του περιορισμού της ύπαρξης κατάλληλων συνθηκών ανέμου, και
4. Στη δημόσια αντίσταση στην εγκατάσταση ανεμογεννητριών κοντά σε κατοικημένες περιοχές ή σε παρθένα περιβάλλοντα.



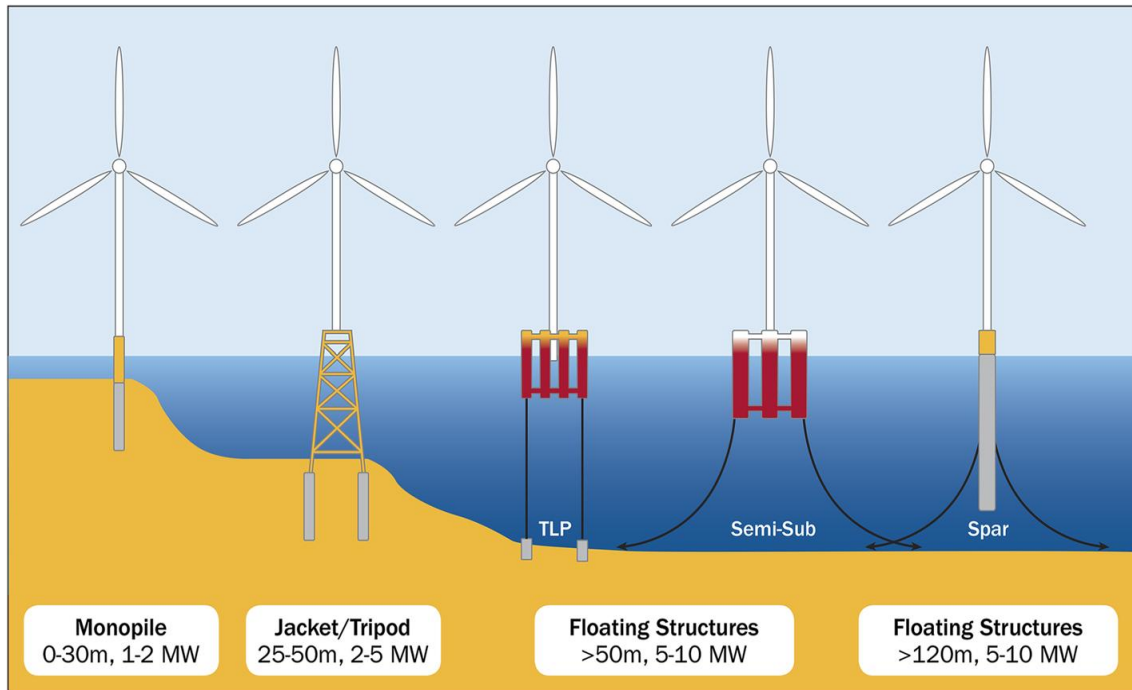
Για την εξάλειψη αυτών των παραγόντων, κατά τις τελευταίες δύο δεκαετίες, η βιομηχανία της αιολικής ενέργειας ξεκίνησε την επέκτασή της σε θαλάσσιες περιοχές, επιδιώκοντας την μεγαλύτερη διαθεσιμότητα τοποθεσιών εγκατάστασης και ισχυρών ανέμων που εντοπίστηκαν πάνω από το νερό. Ο μεγαλύτερος περιορισμός με τις συμβατικές θαλάσσιες ανεμογεννήτριες είναι το βάθος του νερού στο σημείο εγκατάστασης. Οι συμβατικές βάσεις στήριξης τύπου monopile περιορίζονται σε βάθος νερού περίπου 30 m ενώ οι πιο προηγμένες κατασκευές τύπου tripod ή jacket-type περιορίζονται σε 60 μέτρα βάθος. Σε μεγαλύτερα βάθη, οι απαιτήσεις κατασκευής καθιστούν τα σχέδια οικονομικά ανέφικτα (Schwartz et al., 2010). Αυτό έχει περιορίσει σε μεγάλο βαθμό την έκταση των τοποθεσιών στις οποίες η θαλάσσια αιολική ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί. Επιπλέον, οι θαλάσσιες τοποθεσίες με κατάλληλο άνεμο μπορεί συχνά να είναι πιο κοντά σε μεγάλα παράκτια κέντρα πληθυσμών σε σχέση με τις χερσαίες περιοχές με υψηλή αιολική ενέργεια (Musial και Butterfield, 2004). Επιβάλλεται επομένως, η διατήρηση μιας ελάχιστης απόστασης από την ακτή, ώστε να αποφευχθεί ο θόρυβος και οι αισθητικοί περιορισμοί, επιτρέποντας τον σχεδιασμό εγκαταστάσεων μεγαλύτερης κλίμακας για την επίτευξη υψηλότερων αποδόσεων. Οι εγκαταστάσεις μεγαλύτερου μεγέθους σε θαλάσσιο περιβάλλον είναι περαιτέρω επιθυμητές λόγω της σχετικής ευκολίας με την οποία μπορούν να μεταφερθούν πάνω από το νερό σε σχέση με τη γη. Τέλος, δεδομένου ότι οι ταχύτητες του ανέμου σε μεγαλύτερα βάθη είναι γενικά υψηλότερες και τα επίπεδα των αναταράξεων χαμηλότερα (Jonkman, 2007), μπορεί να επιτευχθούν υψηλότερες ενεργειακές αποδόσεις. Αυτό ώθησε το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη νέων σχεδίων ανεμογεννητριών κατάλληλων για βαθιά νερά προκειμένου να επωφεληθούν από την υπεράκτια αιολική ενέργεια, περιοχές σε όλο τον κόσμο που δεν έχουν ρηχές θάλασσες (Henderson και Witcher, 2010). Έτσι, χρησιμοποιώντας μια πλωτή δομή στήριξης της ανεμογεννήτριας αντί για την εγκατάστασή της στον πυθμένα, εξουδετερώνεται ο περιορισμός του βάθους και αυξάνονται δραστικά οι επιλογές τοποθέτησης, ενώ δυνητικά απλοποιείται η εγκατάσταση, η συντήρηση, και οι εργασίες παροπλισμού. Με τα σχοινιά πρόσδεσης και τα καλώδια μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας να είναι η μόνη σύνδεση με τον θαλάσσιο πυθμένα, οι πλωτές ανεμογεννήτριες πλεονεκτούν όταν συναρμολογηθούν στην ακτή και στη συνέχεια ρυμουλκηθούν στο χώρο τοποθέτησης, αποφεύγοντας έτσι τις επιπλοκές της επί τόπου συναρμολόγησης (Roddier et al., 2010). Όμοια, οι πλωτές ανεμογεννήτριες θα μπορούσαν να σύρονται στην ακτή για μεγαλύτερες επισκευές. Για τους λόγους αυτούς, οι πλωτές ανεμογεννήτριες διαθέτουν πολλές δυνατότητες για την αύξηση της αποδοτικότητας της παραγωγής της αιολικής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στις βαθύτερες περιοχές της Βόρειας Θάλασσας και του Ειρηνικού και Ατλαντικού Ωκεανού, η δυνατότητα για εγκατάσταση πλωτών ανεμογεννητριών είναι τεράστια (EWEA, 2013). Σύμφωνα με τους Breton και Moe (2009), το αιολικό δυναμικό κατά μήκος της ακτής των Η.Π.Α. (μέχρι 50 ναυτικά μίλια από την ακτή), ισούται με

τέσσερις φορές την ετήσια κατανάλωση ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών. Το 90% της περιοχής αυτής όμως, έχει βάθη μεγαλύτερα από 30 μέτρα, για αυτό και το ενεργειακό δυναμικό για πλωτές ανεμογεννήτριες είναι τεράστιο.

#### **4.2 Μοντέλα πλωτών ανεμογεννητριών**

Τα υπάρχοντα σχέδια θεμελίων για παράκτιες ανεμογεννήτριες προσαρμόζονται για μεγαλύτερα βάθη νερού. Ωστόσο, σε επαρκή βάθη οι νέοι τύποι ανεμογεννητριών σε πλωτές εξέδρες αναμένεται να γίνουν ανταγωνιστικοί από άποψη κόστους κύκλου ζωής (Myhr et al., 2014). Οι πρώτες ανεμογεννήτριες εγκαταστάθηκαν σε περιοχές κοντά στην ακτή και σε μικρά βάθη και βασίζονταν κυρίως στην κατασκευή του μονού πυλώνα και στην εκμετάλλευση της βαρύτητας. Με την αύξηση της απόστασης από την ακτή και του βάθους του νερού, νέες τεχνολογίες ενσωματώθηκαν στη δημιουργία των πλωτών ανεμογεννητριών. Στις μέρες, μας διάφορες τεχνολογίες και μοντέλα έχουν δοκιμαστεί για τη δημιουργία πλωτών ανεμογεννητριών. Οι τρεις βασικές κατηγορίες ανήκουν στους τύπους Tension Leg Platform (TLP), Semi-submerged (Semi-sub) και Spar Buoy (Spar). Σε παγκόσμιο επίπεδο, έχουν εγκατασταθεί τέσσερις μεγάλης κλίμακας πλωτές ανεμογεννήτριες. Η ανεμογεννήτρια Hywind ήταν η πρώτη μεγάλης κλίμακας πλωτή δομή που αναπτύχθηκε από την Statoil και εγκαταστάθηκε το 2009 στο Stavanger της Norway. Πρόκειται για μια ανεμογεννήτρια τύπου Tension Leg Platform (TLP) εξοπλισμένη με μία 2,3 MW υπεράκτια ανεμογεννήτρια της Siemens (Arapogianni et al., 2013). Μια άλλη πλωτή ανεμογεννήτρια τύπου Semi-Submersible και ισχύος 2 MW, που ονομάζεται WindFloat εγκαταστάθηκε από την εταιρεία Principal Powers έξω από τις ακτές της Πορτογαλίας το 2011 (Arapogianni et al., 2013) και πρόσφατα δύο πλωτές ανεμογεννήτριες ισχύος 2 MW, η πρώτη τύπου Spar και η δεύτερη τύπου Semi-Submersible εγκαταστάθηκαν με επιτυχία το 2013 στα ανοικτά των νησιών Kabashima και Φουκουσίμα της Ιαπωνίας.



Εικόνα 19 : Οι τύποι θεμελίωσης των ανεμογεννητριών σε θαλάσσιο περιβάλλον. Οι τεχνολογίες στήριξης τύπου Monopile και Tripod/Jacket θεωρούνται δεδομένες. Οι πλωτές κατασκευές χρησιμοποιούν τριών ειδών τεχνολογίες που έχουν υιοθετηθεί από τη βιομηχανία πετρελαίου και αερίου: Tension Leg Platform (TLP), Semi-submersible (Semi-sub), and Spar Buoy (Spar) (Πηγή: EWEA, 2013).

#### 4.2.1 Tension Leg Platform (TLP)

Ο σχεδιασμός τύπου Tension Leg Platform (TLP) χρησιμοποιεί τεντωμένα σχοινιά πρόσδεσης σταθερά στον βυθό, προκειμένου να επιτευχθεί σταθερότητα. Η κατασκευή αποτελείται από μια μεγάλη κύρια στήλη στην οποία συνδέονται αρκετές γραμμές πρόσδεσης. Οι γραμμές συνδέονται με τις άγκυρες του πυθμένα κάτω από την πλωτή κατασκευή (Εικόνες 1 & 2). Η προένταση των γραμμών αγκυροβόλησης είναι κρίσιμη αφού μια αποτυχία εδώ θα οδηγήσει στην ανατροπή της κατασκευής. Το σύστημα αγκυροβόλησης μπορεί να βασίζεται στη βαρύτητα ή στην αναρρόφηση και συνήθως εξαρτάται περισσότερο από τις συνθήκες του εδάφους σε σύγκριση με τις άλλες τύπου πλωτές ανεμογεννήτριες. Η συναρμολόγηση στην ξηρά ή στην αποβάθρα είναι δυνατή, αλλά πιθανότατα απαιτούνται ειδικού τύπου πλοία κατά τη διάρκεια της ρυμούλκησης σε υπεράκτια

θέση, προκειμένου να διατηρηθεί η σταθερότητα. Η TLP έχει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων τύπων, που θα μπορούσαν να μειώσουν το κόστος της ενέργειας για τις πλωτές ανεμογεννήτριες. Η σχετικά μικρή κατασκευή σε σύγκριση με αυτές του τύπου Spar και Semi-submersible συνεπάγεται λιγότερα έξοδα για τις πρώτες ύλες. Το συγκεκριμένο σύστημα αγκυροβόλησης επίσης, συνεπάγεται ελάχιστο ίχνος στο βυθό, επιτρέποντας την διευκόλυνση των θαλάσσιων δράσεων όπως είναι η αγκυροβόληση και η καλωδίωση (ORECCA, 2011).

#### 4.2.2 Semi-submerged (Semi-sub)

Η Semi-submersible κατασκευή, όπως και η πλωτή ανεμογεννήτρια WindFloat που βρίσκεται στις ακτές της Πορτογαλίας, αποτελείται από μια τριγωνική κατασκευή τύπου πλωτήρα που επιτυγχάνει τη σταθερότητα μέσω της άνωσης. Κάθε γωνία της πλατφόρμας έχει κάθετες σωληνοειδείς στήλες που συνδέονται μεταξύ τους με μεταλλικές κατασκευές. Οι στήλες κρατούν τα έρμα για να διατηρείται το σωστό επίπεδο πλευστότητας. Ο πύργος της ανεμογεννήτριας είναι τοποθετημένος σε μία από τις στήλες. Η κατασκευή έχει ένα σχετικά μικρό βύθισμα και το σύστημα πρόσδεσης αποτελείται από 3-6 γραμμές αγκυροβόλησης. Το βύθισμα της πλατφόρμας μπορεί να είναι ακόμα και 10 μέτρα, γεγονός που επιτρέπει την πλήρη συναρμολόγηση σε ένα λιμάνι και τη μεταφορά στην περιοχή εγκατάστασης από ένα σκάφος ρυμούλκησης. Το χαμηλό βύθισμα συνεπάγεται επίσης ότι η συγκεκριμένου τύπου ανεμογεννήτρια μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ρηχά νερά ως 40-50 μέτρων. Μία αρνητική συνέπεια της ύπαρξης ενός μεγάλου τμήματος της κατασκευής κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια είναι ότι επηρεάζεται περισσότερο από το φορτίο του πάγου και τη διάβρωση. Αυτός ο τύπος κατασκευής θα επηρεαστεί επίσης περισσότερο με ακραίες συνθήκες κύματος (Butterfield et al., 2007). Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτής της ανεμογεννήτριας είναι, η δυνατότητα ρυμούλκησης ολόκληρη της κατασκευής στην ακτή σε περίπτωση μείζονος δυσλειτουργίας, όπου η επισκευή μπορεί να γίνει σε σημαντικά χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με μεγάλες επισκευές που γίνονται υπεράκτια.

#### 4.2.3 Spar Buoy (Spar)

Η πλωτή ανεμογεννήτρια Hywind της Statoil είναι τύπου Spar buoy, όπου για την επίτευξη στατικής σταθερότητας χρησιμοποιούνται έρματα που βρίσκονται σε έναν κυλινδρικό κοίλο πυλώνα και ρυθμίζουν την πλευστότητα της κατασκευής. Το επάνω τμήμα της κατασκευής είναι πολύ ελαφρύτερο από το κάτω τμήμα, γεγονός

το οποίο ανεβάζει το κέντρο της άνωσης (EWEA, 2013). Η τεχνολογία απαιτεί μια πολύ μεγάλη κατασκευή, η οποία αυξάνεται με το βαρύτερο πύργο και τα συστατικά της ανεμογεννήτριας. Η μεγάλη και βαθιά κατασκευή έχει ως αποτέλεσμα ένα μεγάλο βύθισμα, που κάνει την χρήση της συγκεκριμένης πλωτής ανεμογεννήτριας δύσκολη σε ρηχά νερά.

Πίνακας Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των 3 τύπων πλωτών ανεμογεννητριών (+ : σχετικό πλεονέκτημα, - : σχετικό μειονέκτημα, κενό: ουδέτερο αποτέλεσμα) (τροποποιημένο από Butterfield et al., 2007).

Σχεδιαστικές προκλήσεις πλωτής πλατφόρμας	Αξιολόγηση Σταθερότητας της πλατφόρμας		
	<i>Semi-submersible</i>	<i>TLP platform</i>	<i>Spar Buoy</i>
<i>Εργαλεία και μέθοδοι σχεδιασμού</i>	-	+	-
<i>Κόστος/Πολυπλοκότητα άνωσης</i>	-	+	-
<i>Κόστος/Πολυπλοκότητα συστήματος πρόσδεσης</i>	-	+	-
<i>Κόστος/Πολυπλοκότητα άγκυρας</i>	+	-	+
<i>Κόστος/Πολυπλοκότητα Φόρτωσης</i>	+	-	
<i>Απλότητα εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας στην τοποθεσία</i>	+	-	+
<i>Παροπλισμός &amp; Συντήρηση</i>	+	-	+
<i>Αντοχή στην διάβρωση</i>	-	+	+
<i>Ανεξαρτησία από το βάθος της θάλασσας</i>	+	-	-
<i>Ευαισθησία στην κατάσταση του πυθμένα</i>	+	-	+
<i>Ελάχιστο αποτύπωμα</i>	-	+	-
<i>Ευαισθησία στο κύμα</i>	-	+	-
<b>Επίδραση της σταθερότητας στο σχεδιασμό της ανεμογεννήτριας</b>			
<i>Βάρος ανεμογεννήτριας</i>	+	-	-
<i>Κίνηση του πάνω μέρους του πύργου</i>	-	+	-
<i>Πολυπλοκότητα Ελέγχων</i>	-	+	-
<i>Μέγιστη γωνία μετατόπισης</i>	-	+	-

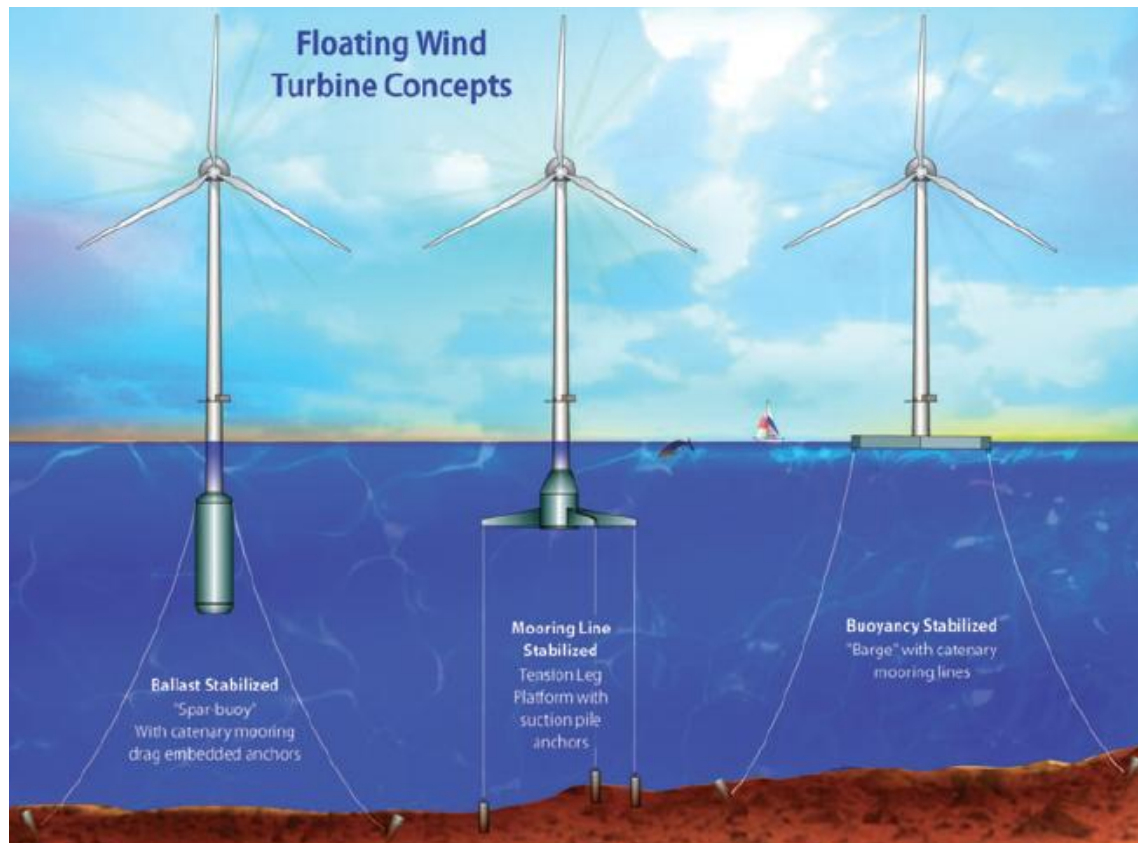
ΠΙΝΑΚΑΣ 1.

Η κατασκευή τύπου Spar είναι συνήθως ένας κύλινδρος από σκυρόδεμα ή χάλυβα όπου τα έρματα μπορεί να είναι είτε νερό ή και ένα στερεό υλικό. Το μεγάλο βύθισμα οδηγεί σε χαμηλή κινήσεις ανυψώσεως και υψηλή αντοχή σε περιστροφικές κινήσεις (pitch και roll). Η δομή είναι σχετικά ευέλικτη στις λειτουργίες περιστροφής, αλλά πιο δύσκαμπτη όταν πρόκειται για γραμμικές κινήσεις (surge, heave and sway). Για να διατηρηθεί η ανεμογεννήτρια στη θέση της, οι γραμμές πρόσδεσης συνδέονται με τον πυθμένα της θάλασσας με άγκυρες. Αυτές οι γραμμές αγκυροβόλησης μπορεί να είναι είτε συμβατικές γραμμές αγκυροβόλησης (catenary moorings) είτε συρματόσχοινα υπό προένταση (taut-leg moorings). Το μεγάλο βύθισμα του τύπου spar buoy καθιστά την προσυναρμολόγηση ολόκληρης της ανεμογεννήτριας στην ξηρά δύσκολο, το οποίο οδηγεί σε υψηλό κόστος που συνδέεται με τη συναρμολόγηση της ανεμογεννήτριας στη θάλασσα. Ωστόσο, η ύπαρξη λιμανιών με κατάλληλα βάθη μπορεί να επιτρέψει τη ρυμούλκηση της δομής σε υπεράκτιες θέση του. Καινοτόμες λύσεις διερευνούνται ωστόσο προκειμένου να είναι δυνατή η συναρμολόγηση στην ξηρά, όταν τα βάθη των λιμένων είναι ανεπαρκείς. Η ανεμογεννήτρια τύπου Spar είναι μια αρκετά απλή κατασκευή και είναι σχετικά εύκολο να παραχθεί. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου μεγέθους της, το κόστος εγκατάστασης είναι αρκετά υψηλό.

#### 4.3 Τρόποι αγκυροβόλησης των πλωτών ανεμογεννητριών

Το σύστημα πρόσδεσης χρησιμοποιείται για να συγκρατήσει την πλωτή δομή σε μια συγκεκριμένη θέση και θα μπορούσαν να διακριθούν σε 3 κατηγορίες. Οι κύριες διαφορές μεταξύ αυτών των συστημάτων είναι ότι οι γραμμές αγκυροβόλησης καταλήγουν στο βυθό στην πρώτη κατηγορία σχεδόν οριζόντια (catenary mooring), στη δεύτερη περίπτωση κάθετα (vertical mooring) και στην τρίτη ομάδα σε γωνία (taut leg mooring). Άρα ο τύπος πρόσδεσης taut leg mooring είναι σε θέση να αντέχει τόσο οριζόντιες όσο και κάθετες δυνάμεις, και οι δυνάμεις αποκατάστασης δημιουργούνται από την ελαστικότητα των σκοινιών πρόσδεσης (Bjerkseter και Ågotnes, 2013). Για τη θεμελίωση της ανεμογεννήτριας τύπου TLP χρησιμοποιείται συνήθως το κάθετο σύστημα με πρόσδεση τύπου taut mooring στις άγκυρες στο κάτω μέρος, ενώ οι semi-submersible και spar κατασκευές χρησιμοποιούν συνήθως τον τρόπο πρόσδεσης τύπου catenary. Αυτή η μέθοδος είναι η πιο εφαρμοσμένη τεχνολογία και λειτουργεί καλά. Το σύστημα αυτό θα μπορούσε ωστόσο να είναι προβληματικό σε μικρότερα βάθη νερού γιατί θα απαιτούσε μια δραματική αύξηση

στο μήκος των γραμμών ώστε να επιτευχθεί ο προτιμώμενος τύπος πρόσδεσης (Bjerkseter και Ågotnes, 2013). Προκειμένου να μειωθεί το κόστος και να βελτιωθούν οι μεταφορές θα ήταν προτιμότερο να συνδεθούν αρκετές ανεμογεννήτριες σε μια άγκυρα υψηλών δυνατοτήτων και έτσι να μειωθεί το συνολικό κόστος των αγκυρών. Υπάρχουν διάφορων ειδών άγκυρες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τον τύπο πρόσδεσης που χρησιμοποιείται. Όταν για τη θεμελίωση της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιείται ο τύπος πρόσδεσης catenary, συνήθως χρησιμοποιείται μια ειδική άγκυρα που εμφυτεύεται καθώς σύρεται (drag embedment anchor, DEA), η οποία είναι ο πιο δημοφιλής τρόπος αγκυροβόλησης. Η άγκυρα αυτή έχει σχεδιαστεί για να διεισδύει στο βυθό της θάλασσας, είτε εν μέρει είτε πλήρως. Η ικανότητα συγκράτησης της άγκυρα τύπου DEA δημιουργείται από την αντίσταση του εδάφους μπροστά από την άγκυρα και είναι πολύ κατάλληλη για αντίσταση σε μεγάλα οριζόντια φορτία, αλλά γενικά όχι σε κατακόρυφα φορτία, όπως στην πρόσδεση των ανεμογεννητριών τύπου TLP (Vryhof, 2010). Όταν χρησιμοποιείται το κάθετο σύστημα πρόσδεσης, επιλέγεται μια άγκυρα αναρρόφησης (suction pile anchor), που είναι ουσιαστικά ένας κούλος χαλύβδινος κύλινδρος που εγκαθίσταται δημιουργώντας μια διαφορά πίεσης από μια αφαιρούμενη αντλία, θεμελιώνοντας την άγκυρα στο βυθό της θάλασσας. Για την άγκυρα αναρρόφησης, η τριβή του εδάφους κατά μήκος του κυλίνδρου και η εγκάρσια αντίσταση του εδάφους δημιουργεί την ικανότητα συγκράτησης και κάνει την άγκυρα ανθεκτική τόσο σε οριζόντια όσο και σε κάθετα φορτία (Vryhof, 2010). Η απαιτούμενη αυτή τριβή προϋποθέτει τις κατάλληλες συνθήκες εδάφους, σε σύγκριση με τις άλλες εναλλακτικές επιλογές αγκυροβόλησης. Για το σύστημα πρόσδεσης τύπου taut leg, οι γραμμές πρόσδεσης φτάνουν στον πυθμένα σε γωνία περίπου 45° και η χρήση μιας άγκυρας ικανής να αντέχει το κατακόρυφο φορτίο είναι μια αναγκαιότητα και θεμελιώνεται πολύ βαθύτερα από τις άγκυρες τύπου DEA προκειμένου να αντέχουν τις δυνάμεις από την πρόσδεση τύπου taut leg (Vryhof, 2010).



Εικόνα 20 : Οι διαφορές στην πλατφόρμα, στο σύστημα πρόσδεσης και στον τύπο άγκυρας των επικρατέστερων τύπων πλωτών ανεμογεννητριών (Jonkman, 2009).

Άλλες κατηγορίες αγκυρών είναι οι ακόλουθες:

- Άγκυρες βασισμένες στη βαρύτητα (gravity-base anchor)
- Άγκυρες οδηγούμενες από στύλο (driven pile anchor)
- Άγκυρες που εμφυτεύονται με τορπίλη (torpedo embedded anchor)
- Άγκυρες οδηγούμενες από στύλο όπου απαιτείται η διάνοιξη οπής (drilled and grouted pile)

Στην Ελλάδα υπάρχουν πολλές ιδιαιτερότητες που πρέπει να λάβουμε μια μελέτη τέτοιου είδους πολύ σοβαρά. Το κυριότερο θέμα που ισχύει σε κάθε τέτοια κατασκευή είναι η σεισμική πρόληψη. Η χώρα μας χαρακτηρίζεται ως μια αρκετά σεισμογενής περιοχή και αυτό επιφέρει μια ιδιαίτερη προσοχή σε οποιαδήποτε στατική μελέτη. Ένας λόγος που κάνει πιο συγκεκριμένη μια τέτοια μελέτη είναι και οι αλλαγές του υλικού του βυθού κάθε περιοχής. Πολλές φορές αλλάζουν τα υλικά που συνθέτουν το ανάγλυφο της υποθαλάσσιας περιοχής. Αυτό μπορεί να είναι από μια πεδινή περιοχή με άμμο μέχρι μια βραχώδη γεμάτη πετρώματα και ξέρες. Η θεμελίωση ενός αιολικού πάρκου εξαρτάται από το βάθος του πυθμένα, το είδος του διαθέσιμου υπεδάφους αλλά και τη διαθεσιμότητα ειδικού εξοπλισμού για την κατασκευή μεταφορά αλλά και τοποθέτηση των διαφόρων τύπων θεμελιώσεων. Το βάρος της κάθε θεμελίωσης εξαρτάται κυρίως από το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί



για την κατασκευή της (σκυρόδεσμα ή χάλυβας) αλλά και τον τρόπο που θα στηριχθεί στον πυθμένα. Το τελευταίο κριτήριο για κάθε λύση είναι το κόστος. Μεταξύ των κριτηρίων που έχουν τεθεί για την προκαταρκτική χωροθέτηση αιολικών υπεράκτιων πάρκων στην Ελλάδα, είναι και το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος των 50 μέτρων το οποίο αποκλείει πλωτές ανεμογεννήτριες και μεγάλα θαλάσσια βάθη.

#### **4.4 Απαιτούμενοι έλεγχοι στις πλωτές ανεμογεννήτριες**

Σε αυτή την ενότητα, για κάθε τμήμα μιας πλωτής ανεμογεννήτριας, οι τυπικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν για τις χερσαίες ανεμογεννήτριες ή άλλες υπεράκτιες δομές θα επανεξεταστούν. Ειδικότερα, θα επισημανθούν νέες προκλήσεις σε αυτούς τους τομείς στην περίπτωση των πλωτών ανεμογεννητριών.

##### 4.4.1 Ο αεροδυναμικός έλεγχος ισχύος

Οι περισσότερες μεγάλες υπεράκτιες ανεμογεννήτριες είναι μεταβλητής ταχύτητας και μεταβλητού βήματος. Δηλαδή, μπορούν να μεταβάλλουν την γωνία βήματος των πτερυγίων τους και την ταχύτητα της γεννήτριας εντός ορισμένων ορίων. Κατά συνέπεια, το σύστημα ελέγχου έχει δύο κύρια μέσα επιρροής: τη γωνία βήματος του πτερυγίου, η οποία ελέγχει τις αεροδυναμικές δυνάμεις, και τη ροπή της γεννήτριας, η οποία εξισορροπεί την αεροδυναμική ροπή επί του δρομέα. Ο κύριος στόχος του ελεγκτή είναι να μεγιστοποιηθεί η σύλληψη ισχύος, διατηρώντας παράλληλα την ανεμογεννήτρια εντός ασφαλών ορίων, αλλά μπορεί επίσης να υπάρχουν και πρόσθετοι στόχοι για την εξισορρόπηση (Quarton, 1998):

- Βελτίωση της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας τις βραχυπρόθεσμες διακυμάνσεις στην απόδοση ισχύος.
- Μείωση των φορτίων του στύλου, ελέγχοντας την ώθηση του δρομέα σε αντιστοιχία με τις μετρήσεις της επιτάχυνσης στην κορυφή του στύλου

- Μείωση των φορτίων του δρομέα, με κυκλικές μεταβολές των πτερυγίων ανεξάρτητα η μία από την άλλη.
- Σε πλωτές ανεμογεννήτριες, περιορίζοντας την κίνηση της πλατφόρμας και ελέγχοντας την ώθηση του δρομέα.

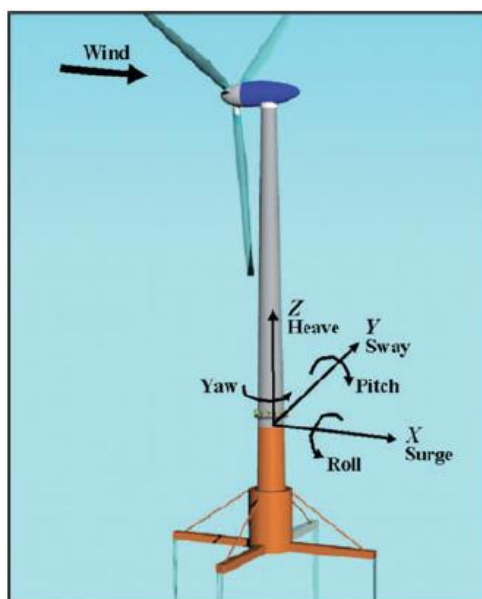
Τυπικά ο ελεγκτής αποτελείται από δύο Proportional-Integral-Derivative (PID) βρόχους ελέγχου, έναν για τη γωνία κλίσης του πτερυγίου και ένα για την ροπή της γεννήτριας. Σε χαμηλότερες ταχύτητες ανέμου, η γωνία βήματος του πτερυγίου διατηρείται σταθερή και η ροπή της γεννήτριας μεταβάλλεται για να διατηρηθεί η βέλτιστη ταχύτητα του δρομέα, η οποία καθορίζει τις βέλτιστες αεροδυναμικές συνθήκες για μέγιστη σύλληψη ισχύος. Καθώς η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται πέρα από το σημείο όπου δημιουργείται η μέγιστη ονομαστική ισχύς της ανεμογεννήτριας, ο δεύτερος βρόχος ελέγχου αρχίζει να στρέφει τα πτερύγια ώστε να μειώσει την ενέργεια του ανέμου και να διατηρήσει σταθερή την ισχύ (Burton et al. 2011). Γενικά για πλωτές ανεμογεννήτριες, παρόμοιοι ελεγκτές χρησιμοποιούνται, αλλά πρέπει να γίνουν τροποποιήσεις για να αποφευχθούν οι διεγερμένες κινήσεις της πλατφόρμας (Nielsen et al, 2006; Larsen και Hanson 2007). Αν και το βασικό σύστημα ελέγχου αποτελείται από γραμμικούς βρόχους ανάδρασης, υπάρχουν πολλές αιτίες της μη γραμμικής συμπεριφοράς που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την οικοδόμηση ενός γραμμικού μοντέλου για όλο το σύστημα των ανεμογεννητριών. Ο περιορισμός της μηχανικής ισχύος εισόδου, έτσι ώστε η ονομαστική να μην υπερβαίνεται, είναι μια ουσιαστική παράμετρο στις ανεμογεννήτριες. Αυτό μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας διαφορετικές εναλλακτικές λύσεις, όπως για παράδειγμα, ο έλεγχος του βήματος του πτερυγίου (pitch control), ο έλεγχος παθητικής απώλειας στήριξης (passive stall control), και ο έλεγχος ενεργητικής απώλειας στήριξης (active stall control). Οι τελευταίες δύο εναλλακτικές χρησιμοποιούνται συνήθως σε μια ανεμογεννήτρια σταθερής ταχύτητας, ενώ η πρώτη επιλογή χρησιμοποιείται σε μια ανεμογεννήτρια μεταβλητής ταχύτητας.

**Ο έλεγχος της παθητικής απώλειας στήριξης** χρησιμοποιεί τη γεωμετρία του πτερυγίου του δρομέα που περιορίζει τη δύναμη της άνωσης, όταν η ταχύτητα του ανέμου γίνεται πάρα πολύ υψηλή, δημιουργώντας ένα στροβιλισμό πίσω από ένα πτερύγιο. Μία ανεμογεννήτρια ελεγχόμενου βήματος περιορίζει την ισχύ εξόδου περιστρέφοντας ή στρέφοντας τα πτερύγια εκτός ανέμου.

**Ο έλεγχος ενεργητικής απώλειας στήριξης** είναι παρόμοιος με τον έλεγχο βήματος κατά μία έννοια, γιατί χρησιμοποιεί τον μηχανισμό του βήματος του πτερυγίου για τον περιορισμό της ισχύος εξόδου. Όταν η ισχύς εισόδου φτάσει στην ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας, ο ελεγκτής στήριξης μετακινεί το πτερύγιο σε μια τέτοια

κατεύθυνση που αυξάνει τη γωνία προσβολής, που είναι στην αντίθετη κατεύθυνση από τον ελεγκτή βήματος του πτερυγίου.

Για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες από την ονομαστική αξία, ο μηχανισμός ενεργής στήριξης επιτρέπει μια ανεμογεννήτρια να λειτουργεί σε σχεδόν σταθερή απόδοση ισχύος. Ένα άλλο πλεονέκτημα του μηχανισμού ενεργής απώλειας στήριξης, είναι ότι μπορεί να αποφύγει μια ενεργή υπέρβαση ισχύος πέρα από την ονομαστική ισχύ. Πρώτον, η πραγματική ισχύς της ανεμογεννήτριας μετράται και συγκρίνεται με την ενεργό τιμή αναφοράς της ισχύος, η οποία είναι ίση με την ονομαστική ισχύ της ανεμογεννήτριας. Το σφάλμα μεταξύ της αναφοράς και των πραγματικών τιμών της ενεργής ισχύος διέρχεται μέσω ενός συστήματος ελέγχου που παρέχει μια τιμή αναφοράς για τη γωνία του βήματος του πτερυγίου. Προκειμένου να περιοριστεί ο ρυθμός του βήματος, η τιμή αναφοράς διέρχεται μέσω ενός περιοριστή βήματος. Επιπλέον, η περιορισμένη τιμή αναφοράς τροφοδοτείται σε έναν ενεργοποιητή βήματος. Ο ενεργοποιητής βήματος διαμορφώνεται ως ένα σύστημα χρονικής υστέρησης πρώτης τάξης, προκειμένου να διαμορφώσει το υδραυλικό σύστημα του ενεργοποιητή.



Εικόνα 21: Η πλωτή πλατφόρμα και οι διάφορες δυνάμεις που ασκούνται (Jonkman, 2009).

Προκειμένου να αποφευχθούν οι άσκοπες συνεχείς αλλαγές στη γωνία βήματος, η οποία μπορεί να φθείρει το μηχανισμό βήματος του πτερυγίου, το βήμα μεταβάλλεται με τη χρησιμοποίηση ενός ελεγκτή δοκιμής και διατήρησης (sample and hold) σε συνδυασμό με έναν ελεγκτή ορίου (Jauch et al., 2005). Ο μηχανισμός αυτός επιτρέπει το βήμα του πτερυγίου να μεταβάλλεται μόνο για κάθε ορισμένη χρονική περίοδο και εφόσον η διαφορά μεταξύ του νέου και του παλιού σημείου

ρύθμισης υπερβαίνει μια ορισμένη ελάχιστη τιμή. Για μελέτες σταθερότητας όμως, ο μηχανισμός αυτός μπορεί να αποκλειστεί από το μοντέλο. Τέλος, ο έλεγχος προσανατολισμού της έλικας (Yaw control), είναι η γωνία περιστροφής της ατράκτου γύρω από τον κάθετο άξονά της. Ο αποτελεσματικός έλεγχος εκτροπής είναι απαραίτητος για να εξασφαλιστεί ότι οι ανεμογεννήτριες πάντα αντιμετωπίζουν άμεσα στον άνεμο.

#### 4.4.2 Έλεγχος απωλειών

Οι κυριότερες πηγές απώλειας ενέργειας κατά τη λειτουργία των πλωτών γεννητριών είναι οι ακόλουθες έξι: το πεδίο ροής ομόρρου ανεμογεννητριών (wake effect), η διαθεσιμότητα, η ηλεκτρική απόδοση, η απόδοση της ανεμογεννήτριας, το περιβάλλον και οι περικοπές. Οι ανεμογεννήτριες παράγουν ενέργεια από τον άνεμο αλλά κατάντη της ανεμογεννήτριας, υπάρχει το πεδίο ροής ομόρρου ανεμογεννητριών (wake effect) όπου η ταχύτητα του ανέμου μειώνεται. Η επίδραση αυτή προκύπτει από τις μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου που προκαλούνται από την επίδραση της μίας ανεμογεννήτριας στην επόμενη. Είναι σημαντικό να εξετάζονται τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου φαινομένου από γειτονικές ανεμογεννήτριες και οι πιθανές επιπτώσεις του στα αιολικά πάρκα που θα κατασκευαστούν στο μέλλον. Η διαθεσιμότητα της ανεμογεννήτριας καθορίζει τη μέση αναμενόμενη διαθεσιμότητα της ανεμογεννήτριας κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής. Αντιπροσωπεύει, ως ποσοστό, τον παράγοντα που θα πρέπει να εφαρμοστεί στην ακαθάριστη ενέργεια για να εκτιμηθεί η απώλεια της ενέργειας, που σχετίζεται με τη χρονική διάρκεια που οι ανεμογεννήτριες δεν είναι διαθέσιμες για την παραγωγή ηλεκτρισμού (EWEA, 2009). Επίσης, απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας θα παρουσιαστούν μεταξύ των ακροδεκτών χαμηλής τάσεως κάθε ανεμογεννήτριας και του σημείου σύνδεσης στο αιολικό πάρκο, το οποίο συνήθως βρίσκεται μέσα σε ένα σταθμό μεταγωγής. Αυτό περιλαμβάνει τις ηλεκτρικές απώλειες που συναντώνται όταν το αιολικό πάρκο είναι λειτουργικό και οι οποίες θα εκδηλωθούν ως μείωση της ενέργειας που μετράται από ένα μετρητή εξαγωγής στο σημείο σύνδεσης. Αυτό παρουσιάζεται ως μια συνολική ηλεκτρική απόδοση, και βασίζεται στο μακροπρόθεσμο μέσο όρο του αναμενόμενου ρυθμού παραγωγής του αιολικού πάρκου. Είναι επίσης απαραίτητο, να εξεταστεί η ενέργεια που το αιολικό πάρκο καταναλώνει όταν αυτό δεν λειτουργεί. Κατά τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας, μια καμπύλη ισχύος που παρέχεται από τον προμηθευτή της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιείται εντός της ανάλυσης. Οι περισσότερες ανεμογεννήτριες όμως, θα κλείσουν όταν η ταχύτητα του ανέμου υπερβαίνει ένα

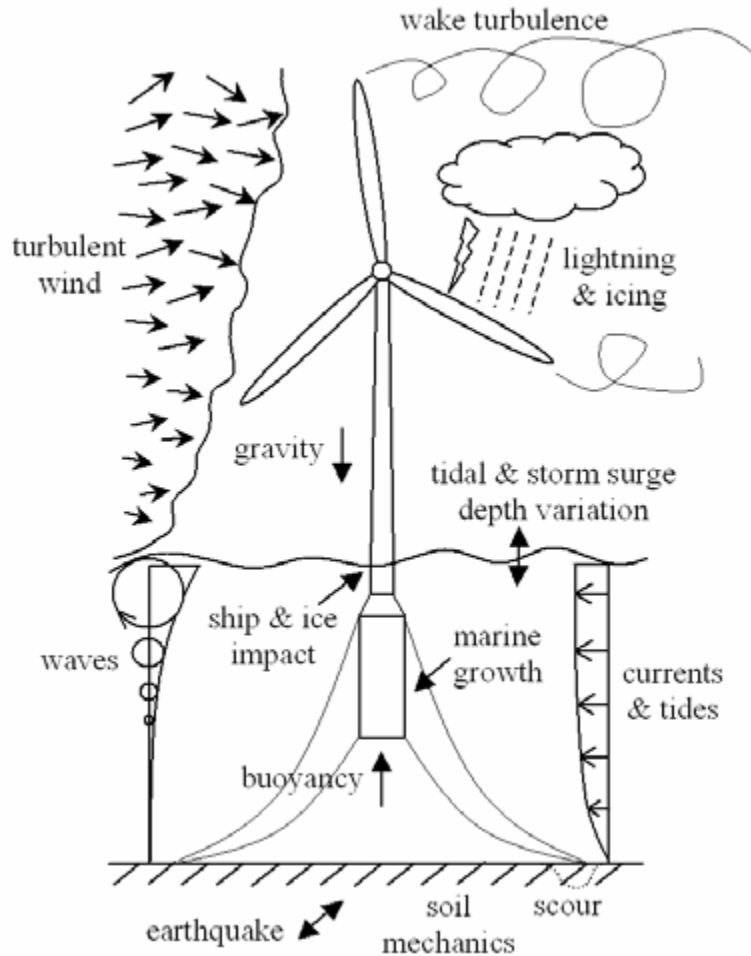
ορισμένο όριο. Έτσι, για την αποφυγή επαναλαμβανόμενων εκκινήσεων και τερματισμών της ανεμογεννήτριας εισάγεται συνήθως μια υστέρηση στον αλγόριθμο ελέγχου της ανεμογεννήτριας. Όταν μια λεπτομερής περιγραφή της ανεμογεννήτριας και των παραμέτρων είναι διαθέσιμα, χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της απώλειας παραγωγής λόγω της υψηλής υστέρησης του ανέμου, με την επανάληψη της ανάλυσης χρησιμοποιώντας μια καμπύλη ισχύος με μειωμένη ταχύτητα ανέμου. Αυτό μπορεί να σημαίνει ότι για μια συγκεκριμένη τοποθεσία η ανεμογεννήτρια δεν θα λειτουργήσει σύμφωνα με την παρεχόμενη καμπύλη ισχύος (EWEA, 2009). Σε ορισμένες συνθήκες, βρωμιά μπορεί να σχηματιστεί στις λεπίδες ή, με την πάροδο του χρόνου, η επιφάνεια του πτερυγίου μπορεί να υποβαθμιστεί. Επίσης, μπορεί να συσσωρευτεί πάχος σε μια ανεμογεννήτρια. Ακραίες καιρικές συνθήκες μπορεί επίσης να επηρεάσουν την παραγωγή ενέργειας ενός αιολικού πάρκου. Τέλος, μέσα σε ένα αιολικό πάρκο μπορεί να χρειαστεί να κλείσουν κάποιες ανεμογεννήτριες για να εξομαλυνθούν τα ζητήματα που συνδέονται με τα φορτία της ανεμογεννήτριας ή ορισμένες προϋποθέσεις προγραμματισμού και αυτό συνεπάγεται απώλειες στην παραγόμενη ενέργεια.

#### 4.4.3 Έλεγχος φορτίων

Πριν την εγκατάσταση μιας πλωτής ανεμογεννήτριας, είναι απαραίτητο να εντοπιστούν και να υπολογιστεί η επίδραση των φορτίων που θα δέχεται μια πλωτή κατασκευή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της. Τα φορτία αυτά θα μπορούσαν να ομαδοποιηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες.

Στην πρώτη ομάδα θα μπορούσαν να καταταχθούν όλα τα φορτία που σχετίζονται με την κατασκευή της ανεμογεννήτριας. Αναφερόμαστε στα φορτία που αφορούν την ανεμογεννήτρια, το σύστημα στήριξής της, την πλατφόρμα και τις πιθανές κινήσεις της, και τα συστήματα πρόσδεσης και αγκυροβόλησης. Τα φορτία αυτά, σπανίως δημιουργούν σοβαρά προβλήματα καθώς είναι προβλέψιμα και συνήθως συμπεριλαμβάνονται στους αρχικούς υπολογισμούς των κατασκευαστών. Για τα πλοία και τις υπεράκτιες δομές, σχετικά απλά μοντέλα, βασισμένα στην έλξη του φορτίου του ανέμου, είναι συχνά επαρκής για να υπολογίσουν τα αεροδυναμικά φορτία (Faltinsen, 1993), αλλά για τις ανεμογεννήτριες απαιτούνται πιο πολύπλοκα μοντέλα. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη είναι η μέθοδος Blade Element Momentum (BEM) (Burton et al., 2011; Snel και Schepers 1995). Για τον υπολογισμό των αεροδυναμικών φορτίων έχουν χρησιμοποιηθεί και ορισμένα γραμμικά μοντέλα (Hansen, 2004; van Engelen και Braam 2004). Οι Sebastian και Lackner (2013) διατύπωσαν ανησυχίες ότι η μεγαλύτερη δυναμική κίνηση του δρομέα μιας

πλωτής ανεμογεννήτρια θα οδηγήσει σε πιο πολύπλοκες συνθήκες ροής που δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν επαρκώς από τη μέθοδο BEM. Οι de Vaal et al., (2014), από την άλλη πλευρά, διαπίστωσαν ότι υπό προϋποθέσεις η κίνηση της πλατφόρμας είναι συνήθως αρκετά αργή ώστε η BEM να είναι επαρκής. Η τρέχουσα γενική πρακτική σε κάθε περίπτωση είναι να χρησιμοποιείται μια προσέγγιση της BEM. Όσον αφορά τα υδροδυναμικά φορτία των πλωτών κατασκευών, όταν αυτές είναι λεπτότερες σε σύγκριση με το μήκος κύματος των εισερχόμενων κυμάτων, θεωρούνται υδροδυναμικά διαφανής και μπορεί να αποτυπωθούν από την ημι-εμπειρική εξίσωση του Morison (Faltinsen, 1993). Αν και η εξίσωση Morison ισχύει μόνο για εγκάρσιες δυνάμεις, μια παρόμοια προσέγγιση έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των φορτίων στις ανεμογεννήτριες που αποτελούνται από μεγαλύτερες πλατφόρμες (Philippe et al., 2014). Οι δυνάμεις επαναφοράς των γραμμών αγκυροβόλησης είναι μη γραμμικές, ιδίως για τις γραμμές πρόσδεσης τύπου catenary, όπου η δύναμη επαναφοράς οφείλεται στην αλλαγή γεωμετρίας των γραμμών. Η δυναμική των γραμμών πρόσδεσης μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντική σε μακριές γραμμές σε μεγάλο βάθος, ή όταν η κίνηση της πλατφόρμας είναι μεγάλη (Matha et al., 2011). Παρ' όλα αυτά, αν η κίνηση της πλατφόρμας είναι μικρή, η δυναμική των γραμμών αγκυροβόλησης μπορεί συχνά να αγνοηθεί. Ο Jonkman (2009) υποστηρίζει ότι καθώς η αποτελεσματική αδράνεια του συστήματος πρόσδεσης είναι μόνο το 2% της συνολικής αδράνειας της πλωτής ανεμογεννήτριας, μπορεί να αγνοηθεί, προσέγγιση που θεωρείται συντηρητική. Οι Kalløe και Hansen (2011) συμφωνούν ότι η χρήση ενός σχεδόν στατικού μοντέλου είναι συντηρητική. Σύγκριναν τις σχεδόν στατικές και δυναμικές προσεγγίσεις για την ανεμογεννήτρια Hywind, και διαπίστωσαν ότι τα φορτία των πτερυγίων δεν επηρεάστηκαν από το μοντέλο πρόσδεσης, αλλά το δυναμικό μοντέλο προέβλεψε χαμηλότερα φορτία στον πύργο. Από την άλλη πλευρά, οι Hall et al., (2013) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η πιστότητα της μοντελοποίησης της γραμμής πρόσδεσης επηρεάζει την απόκριση του πτερυγίου, αλλά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το είδος της πλωτής εξέδρας.



Εικόνα 22: Τα διαφορετικά φορτία που πρέπει να συνηπολογιστούν για μια πλωτή ανεμογεννήτρια (Butterfield et al., 2005)

Στην δεύτερη ομάδα συμπεριλαμβάνονται τα φορτία που προκαλούνται στην ανεμογεννήτρια από το περιβάλλον της και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής. Τέτοια φορτία οφείλονται στα θαλάσσια ρεύματα, στα κύματα, στις μεταβολές του ανέμου, στους κεραυνούς, στον πάγο, στην εγκατάσταση θαλάσσιας πανίδας και χλωρίδας στα τμήματα της ανεμογεννήτριας κλπ. Τα φορτία αυτά μπορεί να διαφέρουν από εποχή σε εποχή και αυτός είναι ένας από τους σημαντικότερους λόγους που δυσχεραίνει την πρόβλεψη και τον υπολογισμό τους. Ο άνεμος για παράδειγμα, μεταβάλλεται σε χρονικές κλίμακες που κυμαίνονται από λίγα δευτερόλεπτα έως αρκετές ημέρες. Για τον λόγο αυτό, διάφορα μοντέλα είναι διαθέσιμα τα οποία καθορίζουν διάφορες παραμέτρους για τον υπολογισμό των συγκεκριμένων φορτίων (Burton et al., 2011). Τέλος, στην κατηγορία αυτή ομαδοποιούνται κάποια φορτία που συνδέονται με τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας και τη φυσική φθορά. Όπως επίσης τα φορτία που συνδέονται με τη μεταφορά της ανεμογεννήτριας στο σημείο εγκατάστασης και στη συνέχεια τη συντήρησή της και την πιθανή αντικατάσταση προβληματικών

εξαρτημάτων. Όλα αυτά τα φορτία είναι μεταβλητά και μη προβλέψιμα αφού εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες. Για τον λόγο αυτό είναι πολύ δύσκολο να εκτιμηθούν.

#### **4.5 Παράκτια και υπεράκτια αιολικά πάρκα**

Παρά το υψηλό κόστος κεφαλαίου και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης, η εγκατεστημένη ισχύς της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας έχει αυξηθεί ραγδαία στην Ευρώπη από 800 MW στο τέλος του 2006 σε 3,8 GW στα τέλη του 2011, και πολλά υπεράκτια αιολικά πάρκα αναμένεται να κατασκευαστούν στο εγγύς μέλλον, ιδίως στο Ηνωμένο Βασίλειο, τη Γερμανία, τη Δανία και τις Κάτω Χώρες (European Wind Energy Association, 2012). Οι λόγοι για αυτήν την τάση, είναι το υψηλό αιολικό δυναμικό, η διαθεσιμότητα του χώρου, οι χαμηλότερες οπτικές και ακουστικές ενοχλήσεις, η καλύτερη κατανόηση των οικονομικών κινδύνων και τα υψηλά οικονομικά κίνητρα (German Offshore Wind Energy Foundation, 2010). Ο στόχος της Ευρωπαϊκής Ένωσης Αιολικής Ενέργειας είναι να φτάσει τα 230 GW εγκατεστημένης ισχύος στην Ευρώπη στο τέλος του 2020, εκ των οποίων 40 GW θα παράγεται από υπεράκτιες εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας (European Wind Energy Association, 2011). Στο τέλος του 2015, η Statoil ανακοίνωσε την οικονομική συμφωνία για ένα πιλοτικό πάρκο 30 MW, με 5 πλωτές ανεμογεννήτριες 6 MW που θα εγκατασταθούν στις ακτές της Σκωτίας (Slätte και Ebbesen, 2012). Επιπλέον, η Principal Powers σχεδιάζει να αναπτύξει παρόμοια πάρκα βασισμένα στην ανεμογεννήτρια WindFloat τόσο έξω από το Όρεγκον όσο και την Πορτογαλία. Στην Ελλάδα δεν είναι ακόμα εγκατεστημένα υπεράκτια αιολικά πάρκα. Ωστόσο, πρόσφατα το Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικών Αλλαγών επέλεξε 12 θαλάσσιες περιοχές ανά τη χώρα για εγκατάσταση ανεμογεννητριών με ορίζοντα το 2017. Αυτές οι περιοχές είναι σε Άγιο Ευστράτιο, Αλεξανδρούπολη, Κάρπαθο, Κέρκυρα, Θάσο, Κρουονέρι, Κύμη, Λήμνο, Λευκάδα, Πεταλιούς, Σαμοθράκη και Φανάρι Ροδόπης συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας 1,2 GW.





Εικόνα 23 : Το Anholt παράκτιο αιολικό πάρκο βρίσκεται στη Δανία με ονομαστική ισχύ 400 MW, είναι το τρίτο μεγαλύτερο υπεράκτιο αιολικό πάρκο στον κόσμο (Lauridsen και Andersen, 2013).

Η λειτουργία ενός αιολικού πάρκου θα έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση σημαντικής ποσότητας πρωτογενούς ενέργειας την οποία θα παρήγαγαν συμβατικοί σταθμοί παραγωγής. Τα σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα των περισσότερων ανεπτυγμένων χωρών, καθώς και της χώρας μας, καθιστούν την αιολική ενέργεια ιδιαίτερα ελκυστική σε σχέση με την προστασία του περιβάλλοντος. Από την άλλη πλευρά, η κατασκευή και λειτουργία ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου δεν επιφέρει αισθητές περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην ευρύτερη περιοχή εγκατάστασης. Τρεις είναι, κυρίως, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις τοπικής κλίμακας που αναφέρονται (εικάζονται τις περισσότερες φορές) ως αποτέλεσμα της εγκατάστασης και λειτουργίας αιολικών πάρκων εμπορικής κλίμακας: η οπτική όχληση, η κατασκευαστική επέμβαση-αλλοίωση του χαρακτήρα και της λειτουργίας μιας περιοχής και, ο θόρυβος.

Αρχικά, είναι σαφές ότι η αισθητική μιας εγκατάστασης αιολικού πάρκου αποτελεί καθαρά υποκειμενικό παράγοντα, ο οποίος εξαρτάται, όπως δείχνουν σχετικές μελέτες, όχι τόσο από την ίδια την εικόνα της εγκατάστασης, όσο από τη γενικότερη εικόνα που έχει διαμορφώσει ο παρατηρητής για τη χρήση της (π.χ. ως οικολογική πηγή ενέργειας, ως πηγή τοπικών αναπτυξιακών οφελών, κλπ.). Ειδικότερα, πρέπει να τονιστεί ότι ένα αιολικό πάρκο δεν εμποδίζει τη θέα. Η αρκετά μεγάλη απόστασή του από κατοικημένες περιοχές καθώς και η αραιή χωροθέτηση των ανεμογεννητριών σε απλή σειρά, περιορίζουν στο ελάχιστο την οπτική όχληση των κατοίκων. Παράλληλα, οι περιορισμένες χρήσεις γης στην περιοχή ελαχιστοποιούν τις ευκαιρίες οπτικής επαφής με την εγκατάσταση, από κοντινές αποστάσεις. Τέλος,

σημειώνεται ότι, τόσο το λευκό χρώμα των πτερυγίων, όσο και η κατασκευή ολόσωμων (σωληνωτών) πύργων στήριξης των ανεμογεννητριών, συντελούν στην καλύτερη εναρμόνισή τους με τον περιβάλλοντα χώρο. Όσον αφορά την επίδραση στο χαρακτήρα και τη λειτουργία της περιοχής εγκατάστασης, θα πρέπει να σημειώσει κανείς την απουσία έγκυρης και συγκροτημένης ενημέρωσης, με αποτέλεσμα να δημιουργείται πρόσφορο έδαφος για παραπληροφόρηση και υπερβολικές αντιδράσεις. Όσον αφορά τα αιολικά πάρκα, πρέπει να τονίσουμε ότι, στη μεγάλη τους πλειοψηφία εγκαθίστανται σε ορεινές θέσεις με αραιή θαμνώδη βλάστηση, ή σε παράκτιες ή υπεράκτιες τοποθεσίες. Επίσης, είναι χαρακτηριστικό ότι, ένα τυπικό αιολικό πάρκο των 10 MW καλύπτει ωφέλιμη επιφάνεια μόνο 2 στρεμμάτων περίπου, αφού κάθε ανεμογεννήτρια απαιτεί για τη θεμελίωσή της λιγότερο από 250 τετραγωνικά μέτρα. Τέλος, όσον αφορά την πανίδα μιας περιοχής, είναι γνωστό από πλήθος σχετικών μελετών, ότι η εγκατάσταση υπεράκτιων αιολικών πάρκων έχει από πολύ μικρές έως αμελητέες επιπτώσεις στους τοπικούς πληθυσμούς των ζώων και πτηνών. Άλλωστε, οι αυστηροί περιορισμοί που έχουν θεσπιστεί τα τελευταία χρόνια για την εγκατάσταση ανθρωπογενών δραστηριοτήτων σε περιβαλλοντικά ευαίσθητες περιοχές αποτελούν μία πολύ σημαντική ασπίδα προστασίας των περιοχών αυτών. Τέλος, η εγκατάσταση ενός αιολικού πάρκου δεν αυξάνει, σε αισθητό βαθμό, τα επίπεδα θορύβου της εγγύτερης περιοχής. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες προκαλούν θόρυβο ύψους 44 περίπου db (A) σε απόσταση 200 m, στα υπήνεμα της ανεμογεννήτριας, για ταχύτητα ανέμου 8 m/s. Σημειώνεται ότι για ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες των 8 m/s, ο θόρυβος που παράγεται από τις Α/Γ καλύπτεται από το θόρυβο που παράγεται από το περιβάλλον. Το συγκεκριμένο είδος θορύβου που αναφέρθηκε (44 db) αντιστοιχεί σε αυτό μιας ήσυχης μικρής πόλης, και δεν αποτελεί βέβαια πηγή όχλησης. Δεδομένης δε της απαιτούμενης ελάχιστης απόστασης των ανεμογεννητριών από γειτονικούς οικισμούς (500 m), το επίπεδο αυτό είναι ακόμη χαμηλότερο, της τάξης των 30-35 db, που αντιστοιχεί στο επίπεδο θορύβου ενός ήσυχου καθιστικού ή ψιθύρου που καλύπτεται πλήρως από φυσικές και τεχνικές πηγές θορύβου εγγύτερες προς τους οικισμούς. Όσον αφορά ειδικά τις επιπτώσεις των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, θα μπορούσαμε να αναφέρουμε την επαναιώρηση ιζημάτων και την αύξηση της θολότητας του νερού. Κατά τη διάρκεια εγκατάστασης και απεγκατάστασης του αιολικού πάρκου θα υπάρξει μεταφορά ιζήματος. Ο πυθμένας διαταράσσεται από την εγκατάσταση των θεμελίων των συσκευών και από την τοποθέτηση των υποθαλάσσιων καλωδίων που συνδέουν τις ανεμογεννήτριες με τον σταθμό συλλογής της ηλεκτρικής ενέργειας. Η μετατόπιση του ιζήματος σχετίζεται με το μέγεθος των κόκκων των ιζημάτων, την πυκνότητα του υλικού και την ενέργεια που απαιτείται για τον μηχανισμό μεταφοράς. Η μετακίνηση των ιζημάτων μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια ενδιαιτήματος. Επίσης στην περιοχή θα παρατηρηθεί αύξηση στην θολότητα του νερού εξαιτίας των αιωρούμενων σωματιδίων. Επιπλέον, τα υποβρύχια καλώδια που

χρησιμοποιούνται για την σύνδεση των ανεμογεννητριών μεταξύ τους, αλλά και για την μεταφορά ενέργειας από το αιολικό πάρκο στον σταθμό συλλογής ηλεκτρικής ενέργειας που βρίσκεται στην ξηρά παράγουν ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Ανάλογα με τον τύπο των καλωδίων τα πεδία που δημιουργούνται είναι ισχυρά ή ασθενή και προκαλούν επιπτώσεις στους θαλάσσιους οργανισμούς. Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία επηρεάζουν τα ψάρια, καθώς και τα θαλάσσια θηλαστικά που χρησιμοποιούν το μαγνητικό πεδίο της γης για την μετακίνηση τους. Ένα τέτοιο πεδίο μπορεί να επηρεάσει και τις πυξίδες των πλοίων και θα αλληλεπιδράσει με τον προσανατολισμό οποιουδήποτε οργανισμού βασίζεται στο μαγνητικό πεδίο της γης.



Εικόνα 24 : Η εγκατάσταση των ανεμογεννητριών στο υπεράκτιο αιολικό πάρκο στην περιοχή Borkum Riffgrund της Βόρειας Θάλασσας

Η φυσική παρουσία των πύργων των ανεμογεννητριών θα μπορούσε να οδηγήσει σε περίθλαση των κυμάτων και των υποθαλάσσιων ρευμάτων ανάμεσα στις ανεμογεννήτριες ενός αιολικού πάρκου, με αποτέλεσμα την μεταβολή της υδρογραφίας της περιοχής. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να επηρεάσει την μορφολογία των γειτονικών ακτών, αφού λιγότερη κυματική ενέργεια καταλήγει σε αυτές. Κατά τη λειτουργία, ενός παράκτιου αιολικού πάρκου και σε πολύ ειδικές περιπτώσεις μπορεί να μεταβληθεί η ροή του νερού πίσω από κάθε πυλώνα με αποτέλεσμα να επηρεαστεί η μεταφορά υλικού και οι ιδιότητες των ιζημάτων στην περιοχή εγκατάστασης του. Η αντίσταση που δημιουργείται στη ροή του νερού από τις εγκαταστάσεις, είναι πιθανό να επηρεάσει τις συνθήκες του ρεύματος και του κύματος της περιοχής, γεγονός το οποίο μπορεί με τη σειρά του να επηρεάσει το ρυθμό της διάβρωσης και της εναπόθεσης του ιζήματος στην περιοχή. Τέλος, υπάρχει περίπτωση ρύποι να διοχετευτούν στο θαλάσσιο περιβάλλον από τα

παράκτια αιολικά πάρκα με δύο τρόπους, είτε ως τυχαίο γεγονός – ατύχημα, είτε ως φυσική φθορά των υλικών των ανεμογεννητριών. Ατυχήματα μπορεί να προκληθούν κατά την διάρκεια συντήρησης των ανεμογεννητριών, από τη σύγκρουση πλοίων τόσο μεταξύ τους, όσο και με τις ανεμογεννήτριες, αλλά και κατά την κατασκευή και λειτουργία τους. Επιπλέον, υπάρχει κίνδυνος διαρροής καυσίμων, λιπαντικών ουσιών αλλά και ψυκτικών μιγμάτων από τα κιβώτια ταχυτήτων και τους μετασχηματιστές. Το μέγεθος της ρύπανσης εξαρτάται κάθε φορά από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν και τη φύση των χημικών ουσιών.

Είναι, λοιπόν, φανερό, από όλα τα παραπάνω, ότι τα υπεράκτια αιολικά πάρκα εμπορικής κλίμακας δεν προκαλούν αισθητές αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον των περιοχών που εγκαθίστανται. Το γεγονός αυτό έχει πλέον τεκμηριωθεί αναλυτικά και αδιαμφισβήτητα σε πλήθος επιστημονικών δημοσιεύσεων και εργασιών.

#### **4.6 Κόστος κατασκευής και συντήρηση**

Το συνολικό κόστος είναι το άθροισμα όλων των εξόδων στη συνολική διάρκεια λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας. Αναλυτικότερα, αυτά τα κόστη θα μπορούσαν να κατανεμηθούν σε 3 ομάδες: συνολικό κόστος εγκατάστασης, κόστος επένδυσης και κόστος λειτουργίας και συντήρησης.

Στα συνολικά κόστη συμπεριλαμβάνονται όλα τα λεφτά που έχουν επενδυθεί για τη δημιουργία ενός αιολικού πάρκου διαιρεμένο από τον αριθμό των ανεμογεννητριών. Στη συγκεκριμένη κατηγορία συμπεριλαμβάνονται όλα τα έξοδα μέχρι την έναρξη λειτουργίας των ανεμογεννητριών. Πιο συγκεκριμένα, συχνά χρησιμοποιούμε την έννοια *commissioning* για να συμπεριλάβουμε όλες τις δραστηριότητες που λαμβάνουν μέρος αμέσως μετά την εγκατάσταση όλων των τμημάτων της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. Χρειάζονται περίπου δύο με τρεις ημέρες, περιλαμβάνοντας τις τυπικές ηλεκτρικές δοκιμές των ηλεκτρονικών υποδομών και της ανεμογεννήτριας, καθώς και τη συνήθη επιθεώρηση. Ουσιαστικά είναι η πρώτη δοκιμή λειτουργίας του πάρκου. Έπειτα, χρειάζονται περίπου έξι μήνες μέχρι την ολοκληρωμένη εμπορική λειτουργία του. Αυτό σημαίνει ότι η διαθεσιμότητά του αυξάνεται από το 80-90% αμέσως μετά την έναρξη, κατά μέσο όρο στο 97% σε μακροπρόθεσμο επίπεδο (Andersen et al., 2002). Το μεγαλύτερο τμήμα του κόστους για υπεράκτια αιολικά πάρκα εξακολουθεί να είναι η

ανεμογεννήτρια, αλλά αντιπροσωπεύει λιγότερο από το ήμισυ (44%) του συνολικού κεφαλαίου. Με βάση την εκτίμηση των τιμών των ανεμογεννητριών από τους μεγάλους κατασκευαστές και άλλες έρευνες για το κόστος υπολογίζεται ότι η μέση τιμή της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας τουρμπίνα είναι περίπου 1 970 USD / kW.

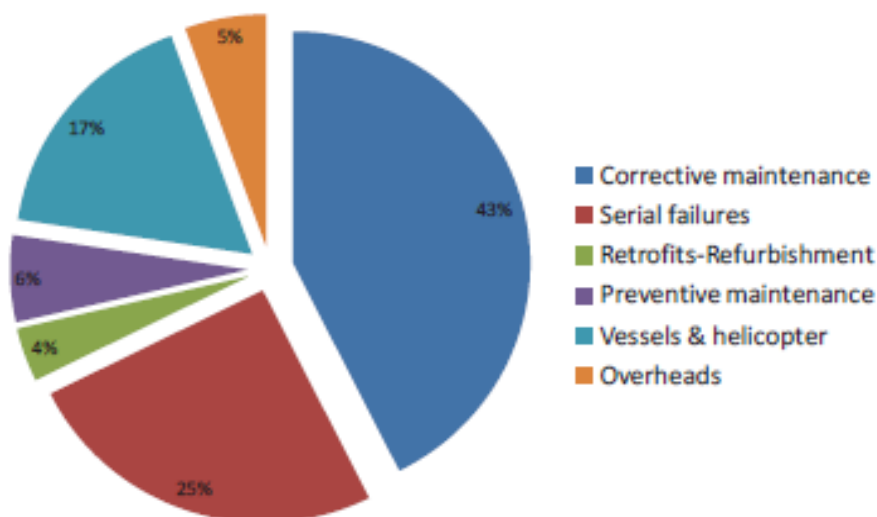
Το κόστος του κεφαλαίου είναι οι τόκοι των χρημάτων που έχουν επενδυθεί στο αιολικό πάρκο. Οι τόκοι θεωρείται ότι ξεκινούν την ίδια μέρα με την έναρξη της λειτουργίας των ανεμογεννητριών. Στην επόμενη ομάδα κατατάσσονται όλα τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης. Το λειτουργικό κόστος για ένα αιολικό πάρκο θεωρείται σταθερό και εκτιμάται περίπου 30 εκατομμύρια (The Crown Estate, 2009). Το ποσό αυτό συνεκτιμά τις βασικές δαπάνες για ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο χωρίς καμία αποζημίωση. Όσον αφορά τη συντήρηση, υπάρχουν προληπτικές συντηρήσεις δύο φορές το χρόνο. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού υπάρχει μια πιο λεπτομερής συντήρηση, όπου για παράδειγμα αντικαθίστανται φίλτρα και μια σειρά από μπαταρίες. Ενώ κατά τη διάρκεια του χειμώνα, μια μικρότερη συντήρηση πραγματοποιείται, και απλά επαναλαμβάνονται κάποιες εργασίες, όπως η πλήρωση γράσου. Σύμφωνα με τους McMillan και Ault (2007), το μέσο κόστος για τις προληπτικές συντηρήσεις είναι περίπου € 5.800 για μια 2 MW ανεμογεννήτρια.

Πίνακας 2 : Κατανομή των εξόδων που απαιτούνται για την εγκατάσταση μιας πλωτής ανεμογεννήτριας (Blanco, 2009)

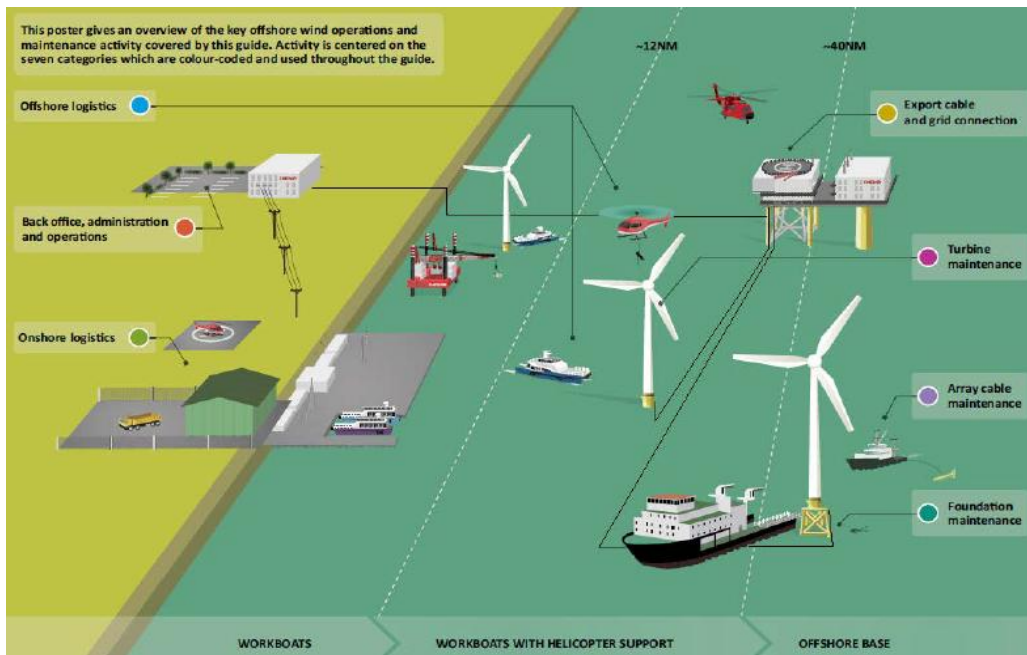
Κατηγορία κόστους	Ποσοστό
Ανεμογεννήτρια	34%
Θεμελίωση	19%
Εγκατάσταση	19%
Ηλεκτρική Υποδομή	14%
Διαχείριση σχεδιασμού και Συγκατάθεση	12%
Άλλα	2%

Το κόστος συντήρησης είναι γνωστό ότι είναι ένα σημαντικό τμήμα του σταθμισμένου κόστους της ενέργειας (Levelized Cost Of Energy, LCOE) που παράγεται από τα αιολικά πάρκα. Πιο συγκεκριμένα, στα παράκτια αιολικά πάρκα, η λειτουργία και η συντήρηση συμβάλλουν στο 15-30% του κόστους της ενέργειας (Engels et al., 2009). Στο παράκτιο αιολικό πάρκο, 160MW Horns Rev, που βρίσκεται 20km από την ακτή Esbjerg στη Δανία, η συντήρησή του υπολογίστηκε ότι συμβάλει σε τουλάχιστον 40% του συνολικού κόστους λειτουργίας, λόγω των πρόωρων

τμηματικών αστοχιών, καθώς επίσης και των χαμηλών δαπανών επένδυσης σε σύγκριση με την τρέχουσα αγορά. Οι κύριοι παράγοντες του κόστους συντήρησης εντοπίστηκαν να είναι οι μεγάλες αντικαταστάσεις τμημάτων, οι μεγάλες μετασκευές και η ανακαίνιση των κύριων συστατικών και της υλικοτεχνικής υποδομής όπως απεικονίζεται στις Εικόνες 7 και 8. Ενώ το υψηλό κόστος μετατροπών μπορεί να αντιμετωπιστεί μόνο με τη βελτίωση της αξιοπιστίας, η στρατηγική συντήρησης των κύριων συστατικών έχει μια σημαντική επιρροή στο κόστος της αντικατάστασης και της ανακαίνισης. Η αξιοπιστία των χερσαίων ανεμογεννητριών έχει αναφερθεί επανειλημμένα (Ribrant et al., 2007; Spinato et al., 2010; Echavarria et al., 2008; Harman et al., 2008). Η διαθεσιμότητα των χερσαίων ανεμογεννητριών είναι συνήθως της τάξης του 95-99%, ενώ για τα πρόωρα υπεράκτια έργα, η διαθεσιμότητα έχει παρατηρηθεί αρκετά χαμηλά μέχρι και 60% σε ορισμένα αιολικά πάρκα λόγω μιας σειράς αστοχιών και των δύσκολων καιρικών συνθηκών (Feng et al., 2011; Faulstich et al., 2010). Μια ενδιαφέρουσα πτυχή της αιολικής ενέργειας σε σύγκριση με τις συμβατικές πηγές ενέργειας είναι η μεταβλητότητα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτό το πλαίσιο, η διαθεσιμότητα που βασίζεται στην ενέργεια είναι πιο αντιπροσωπευτική των πραγματικών απωλειών παραγωγής, και ο σχεδιασμός των προγραμματισμένων εργασιών συντήρησης θα πρέπει να αποσκοπούν στη μεγιστοποίηση της διαθεσιμότητας που βασίζεται στην ενέργεια.



Εικόνα 24 : Εκτίμηση του συνολικού κόστους λειτουργίας και συντήρησης του αιολικού πάρκου Horns Rev. Οι δαπάνες έχουν υπολογιστεί από τον συγγραφέα με μια τροποποιημένη έκδοση του εργαλείου ECN [Rademakers et al., 2008].



Εικόνα 25 : Τρόπος λειτουργίας και συντήρησης ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου (The Crown Estate, 2009).

Ένα άλλο σημαντικό θέμα είναι η ανάλυση των δεδομένων που λαμβάνονται από τις ανεμογεννήτριες. Με ειδικά όργανα οι ανεμογεννήτριες δύναται να καταγράφουν ποικίλες πληροφορίες σχετικά με την κατάστασή τους την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου, την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια κλπ. Αυτά τα δεδομένα πρέπει αφενός να αποθηκεύονται και αφετέρου να αναλύονται συστηματικά. Ο αριθμός των ωρών λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας, η παραγωγική της ικανότητα, ο μέσος χρόνος μεταξύ των παρατηρούμενων βλαβών και ο μέσος χρόνος επιδιόρθωσης αποτελούν επίσης πολύ σημαντικές πληροφορίες που πρέπει πάντα να καταγράφονται για κάθε αιολικό πάρκο.

## Συμπεράσματα

Το εγχείρημα των πλωτών ανεμογεννητριών αν και παρουσιάστηκε για πρώτη φορά πριν από αρκετό καιρό , άρχισε να εφαρμόζεται και να ακμάζει τα τελευταία χρόνια. Στην ανάπτυξη αυτή συνέβαλε αρκετά η εξέλιξη της τεχνολογίας που έδωσε την ευκαιρία να αντιμετωπιστούν ορισμένα τεχνικά και κατασκευαστικά προβλήματα στην εφαρμογή τους. Η μεγαλύτερη πρόκληση που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε είναι οικονομικής φύσεως καθώς τόσο το κόστος κατασκευής όσο και τοποθέτησης υπερβαίνει το μέσο κόστος που απαιτεί μία συμβατική ανεμογεννήτρια προκειμένου να τεθεί σε λειτουργία και να συνδεθεί με το δίκτυο. Τα σύγχρονα πλωτά συστήματα καθώς και οι καινοτομίες που αφορούν την απόδοση μιας ανεμογεννήτριας και τη μέγιστη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας , είναι πλέον σε θέση να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα αυτό. Η τοποθέτηση των πλωτών ανεμογεννητριών σε περιοχές με ισχυρούς ανέμους και κατά συνέπεια η υψηλή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας , εξισορροπούν το μεγάλο κόστος τους καθιστώντας τες ιδιαίτερα αποδοτικές αλλά και απαραίτητες στη προσπάθεια των κοινωνιών για απεξάρτηση από συμβατικές πηγές ενέργειας και εστίαση στη πράσινη ανάπτυξη.



## Βιβλιογραφία

Μαυράκος, Σ., «Μελέτη και σχεδίαση πλωτών κατασκευών», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Ε.Μ.Π., Αθήνα 1999

A.N. Robertson and J.M. Jonkman 'Loads Analysis of Several Offshore Floating Wind Turbine Concepts'

J. M. Jonkman, 'Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine', Technical Report NREL/TP-500-41958, November 2007

J. Jonkman, M. Musial, 'Offshore Code Comparison Collaboration (OC3) for IEA Task 23 Offshore Wind Technology and Deployment', NREL/TP-500-48191. December 2010.

Mehran Ahmadi 'Analysis and Study of Floating Offshore Wind Turbines' December 2013

N.Kuljaca, M.Marelli, E.Zaccone; 'High voltage and medium voltage submarine cables for offshore windfarms'

Διπλωματική εργασία Γρηγορίου Αθανασιάδη "Ανάλυση πλωτών ανεμογεννητριών", Ε.Μ.Π 2015

"Vertical Axis Wnd Turbines," [Online]. Available: <http://mragheb.com/>.

S. K. Naqvi, 'Scale model experiments on floating offshore wind turbines', Ph.D Thesis, Worcester polytechnic institute , May 2010

Καρδοματέας Δ. Κωσταντίνος – Αλέξανδρος 'Αεροελαστική ανάλυση πλωτών ανεμογεννητριών με χρήση προτύπων ιδιοδιανυσματικής ανάλυσης', ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2013

Riziotis, V.A., Politis, E.S., 'Methods for linearizing the servo-aero-elastic equations of the full wind turbine.' Center for Renewable Energy Sources and Saving, National Technical University of Athens, 2010

Ριζιώτης, Β. 'Αεροδυναμική και Αεροελαστική Ανάλυση της απώλειας στήριξης σε δρομείς Ανεμογεννητριών', διδακτορική διατριβή, ΕΜΠ 2003.

