



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών  
Τομέας Ρευστών

## Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα



Καλογεροπούλου Τζαννέτα

Επιβλέπων καθηγητής: Αρθούρος Ζερβός

Μάρτιος 2010

Αθήνα

# Περιεχόμενα

Περιεχόμενα .....	2
1. Εισαγωγή .....	8
2. Υπεράκτιο περιβάλλον και ενεργειακό δυναμικό .....	11
2.1 Ο άνεμος.....	11
2.2 Μέτρηση των χαρακτηριστικών του ανέμου και των κυμάτων.....	14
2.2.1 Γενικά .....	14
2.2.2 Στοιχεία Ανέμου και Κύματος.....	15
2.3 Υπεράκτιο περιβάλλον.....	21
2.3.1 Παλίρροιες, Θαλάσσια ρεύματα και Θυελλώδη Κύματα.....	23
2.3.2 Βαθυμετρία:.....	24
2.3.3 Κατατομές του εδάφους (προφίλ) .....	24
2.3.4 Κινούμενες μάζες άμμου .....	26
2.4 Επιλογή τοποθεσίας για την εγκατάσταση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου     27	
2.4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή τοποθεσίας .....	27
3. Υπεράκτιος ανεμοκινητήρας .....	30
3.1 Προσδιορισμός των σχεδιαστικών απαιτήσεων ενός υπεράκτιου ανεμοκινητήρα.....	30
3.2 Ανεμοκινητήρας και υπεράκτιο περιβάλλον.....	32
3.2.1 Marinisation.....	32
3.2.2 Τοποθεσία αιολικού πάρκου, μέγεθος και χωροθέτηση ανεμογεννητριών.....	32
3.2.3 Προσβασιμότητα στη περιοχή.....	32
3.2.4 Σχεδιασμός και προγραμματισμός .....	33
3.2.5 Βασικά κριτήρια σχεδίασης.....	34
3.3 Τύποι τεχνολογίας.....	34
3.3.1 Αρχές λειτουργίας .....	35
3.3.2 Κύριες συνιστώσες .....	36
4. Θεμελίωση και εγκατάσταση .....	37
4.1 Κατασκευή υποστήριξης.....	37
4.1.1 Θεμελίωση βαρύτητας από σκυρόδεμα.....	37
4.1.2 Μονός πυλώνας .....	39
4.1.3 Τρίποδο.....	41

4.1.4	Πλωτή έδραση .....	43
4.2	Έργα υποδομής.....	46
4.2.1	Υποδομές για τη σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο .....	46
4.2.2	Λιμενικές υποδομές - Χώροι αποθήκευσης και εφοδιασμού ανεμογεννητριών και υπόλοιπου εξοπλισμού.....	46
4.3	Κατασκευή .....	47
4.4	Διαδικασία μεταφοράς .....	48
4.5	Συναρμολόγηση και κατάσταση .....	49
4.5.1	Παράδειγμα εγκατάστασης .....	49
5.	Διασύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο .....	50
5.1	γενικά .....	50
5.2	Ηλεκτρικά συστήματα μετατροπής ανεμογεννητριών.....	54
5.3	Επιλογές ηλεκτρικής διασύνδεσης.....	55
5.3.1	HVAC – HVDC.....	56
5.4	Προβλήματα σύνδεσης Α/Γ στο ΣΗΕ.....	60
5.5	Χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών δικτύων .....	63
5.6	Ηλεκτρικές συνιστώσες για μια υπεράκτια διασύνδεση .....	65
5.6.1	Υποβρύχια καλώδια.....	65
5.6.2	HVDC σύνδεση .....	65
5.6.3	Εξοπλισμός διανομής και μετασχηματιστές.....	66
5.6.4	Εγκατάσταση καλωδίων .....	66
5.7	Σύστημα έλεγχου SCADA .....	67
5.8	Πανερωπαϊκό υπεράκτιο ηλεκτρικό δίκτυο .....	67
5.9	Ένα υπεράκτιο δίκτυο για την ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας 68	
5.9.1	Ανάπτυξη του υπεράκτιου δικτύου .....	68
5.10	Πιθανές εξελίξεις.....	69
5.10.1	Αντίκτυπος της ενσωμάτωσης της αιολικής ενέργειας .....	70
6.	Λειτουργία και συντήρηση.....	73
6.1	Γενικά.....	73
6.2	Λειτουργία του αιολικού πάρκου.....	74
6.3	Συντήρηση και μεταφορά πληρώματος .....	75
6.4	Ανυψωτικός εξοπλισμός .....	78
6.5	RAMS.....	83
6.5.1	Εισαγωγή .....	83

6.6	Στρατηγικές συντήρησης των αιολικών πάρκων .....	84
6.7	Παροπλισμός.....	85
7.	Οικονομική ανάλυση.....	86
7.1	γενικά .....	86
7.2	Τεχνολογικοί κίνδυνοι:.....	87
7.3	Το κόστος της δομής υποστήριξης.....	88
7.4	Το κόστος εγκατάστασης .....	88
7.5	Κόστος διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο (μεταφορά) .....	88
7.6	Το κόστος αλληλοσύνδεσης των ανεμογεννητριών (συνολική ισχύς) 89	
7.7	Οικονομικά μιας υπεράκτιας ανάπτυξης.....	90
7.7.1	Εκτίμηση του κόστους.....	90
7.7.2	Το ρίσκο της επένδυσης .....	91
7.7.3	Χρηματοδότηση και ασφάλεια ενός υπεράκτιου έργου μεγάλης κλίμακας 92	
8.	Περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις .....	97
8.1	Γενικά.....	97
8.2	Πιθανές βασικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υπεράκτιων αιολικών πάρκων και του περιβάλλοντος στη θέση εγκατάστασης τους.....	97
9.	Συμπεράσματα.....	102
10.	Βιβλιογραφία .....	105

## Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 2-1. Οι κινήσεις των ανέμων.....	11
Σχήμα 2-2. Χαρακτηριστικά του ανέμου – περίπτωση 1.....	12
Σχήμα 2-3. Χαρακτηριστικά του ανέμου – περίπτωση 2.....	12
Σχήμα 2-4. Παράκτιες επιδράσεις. Αλλαγή της τραχύτητας επιφάνειας.....	13
Σχήμα 2-5. Υπεράκτιος αιολικός χάρτης Ευρώπης.(4).....	15
Σχήμα 2-6. Εξωτερικές περιβαλλοντικές επιδράσεις σε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο.(10).....	22
Σχήμα 2-7. Παλιρροιακή εμβέλεια και ταχύτητες ρευμάτων σε 5 αναφορικές περιοχές υπεράκτιων αιολικών πάρκων.....	23
Σχήμα 2-8. Λεπτομερές διάγραμμα βάθους και γενική διάταξη του πάρκου OWEZ με τη διασπασμένη τοποθέτηση που αποφεύγει το «κανάλι λάσπης».....	25
Σχήμα 2-9. Εδαφολογικά στρώματα από 3 υπεράκτιες περιοχές με χαρακτηρισμό μέσο (m), πυκνό (d) και πολύ πυκνό (vd) στρώμα άμμου και μαλακός και σκληρός άργιλος.....	26
Σχήμα 4-1. Όψεις της θεμελίωσης με βάση από σκυρόδεμα.....	38
Σχήμα 4-2. Προοπτικό σχέδιο θεμελίωσης βαρύτητας από σκυρόδεμα.....	39
Σχήμα 4-3. Θεμελίωση μονού πυλώνα.....	40
Σχήμα 4-4. Προοπτικό σχέδιο μονού πυλώνα.....	41
Σχήμα 4-5. Όψεις θεμελίωσης τύπου τριπόδου.....	42
Σχήμα 4-6. Προοπτικό σχέδιο θεμελίωσης τύπου τριπόδου.....	43
Σχήμα 4-7. Πλωτή εξέδρα με πολλαπλές ανεμογεννήτριες.....	44
Σχήμα 4-8. Μία ιδέα πλωτής ανεμογεννήτριας.....	45
Σχήμα 5-1. Δομή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.....	50
Σχήμα 5-2. Δομή του μηχανισμού διανομής (switch gear).....	51
Σχήμα 5-3. Παράδειγμα εσφαλμένου ρεύματος.....	52
Σχήμα 5-4. Τυπικό παράδειγμα HVAC γραμμής από αιολικό πάρκο.....	56
Σχήμα 5-5. HVDC σύστημα.....	58
Σχήμα 5-6. Παραγωγή υψηλής τάσης AC/DC.....	58
Σχήμα 5-7. Αγωγοί HVDC.....	59
Σχήμα 5-8. Δομή υπεράκτιου σταθμού μετατροπής.....	66
Σχήμα 5-9. Ξεχωριστή διασύνδεση με τη στεριά.....	69
Σχήμα 5-10. Διασύνδεση μεταξύ χερσαίων υποσταθμών.....	70
Σχήμα 5-11. Διασύνδεση μεταξύ δύο υπεράκτιων σταθμών μετατροπής.....	70
Σχήμα 6-1. Ενσωματωμένος γερανός στο θάλαμο τη ανεμογεννήτριας.....	82
Σχήμα 6-2. Περίπτωση 2.....	82
Σχήμα 7-1. Ολοκληρωμένο μοντέλο κόστους για ένα αιολικό πάρκο.....	90
Σχήμα 7-2. Ανάλυση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	96
Σχήμα 7-4. Κατανομή του ενεργειακού κόστους.....	96

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2-1. Κατανομή Weibul.....	19
-------------------------------------	----

Διάγραμμα 2-2. Ωριαία διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου. ....	20
Διάγραμμα 2-3. Μηνιαία διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου.....	20
Διάγραμμα 2-4. Ετήσια διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου. ....	21
Διάγραμμα 2-5. Οι τιμές του σχεδίου για ακραία θυελλώδη κύματα σε 5 περιοχές αναφοράς.....	24
Διάγραμμα 5-1. Σχετικές συχνότητες από την ωριαία διακύμανση της παραγωγής – για ένα αιολικό πάρκο, όλων των αιολικών πάρκων στις Ανατολικές Βρετανικές ακτές και συσσωρευμένων όλων των υπεράκτιων αιολικών πάρκων στη Βόρεια θάλασσα.....	72
Διάγραμμα 6-1. Αλληλεπίδραση της αξιοπιστίας, της διαθεσιμότητας και της προσβασιμότητας.....	75
Διάγραμμα 6-2. Προγραμματισμένες και μη προγραμματισμένες επισκέψεις ανά ανεμοκινητήρα.....	76
Διάγραμμα 6-3. Σύγκριση του κόστους μεταφοράς με σκάφος/ελικόπτερο (για μέγεθος ανεμογεννήτριας 1.2MW).....	78

#### Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 2-1. Υπεράκτιο αιολικό δυναμικό στις χώρες της ΕΕ σε TWh/έτος.(5) .....	19
Πίνακας 2-2. Ενδεικτικά μετεωρολογικά-ωκεανογραφικά χαρακτηριστικά, σε υπεράκτια θέση στη Μεγάλη Βρετανία.(7) .....	22
Πίνακας 4-1. Δυνατότητες θεμελίωσης.....	37
Πίνακας 5-1. Σύγκριση AC και DC τεχνολογίας.....	60
Πίνακας 5-2. Σενάριο αιολικής ισχύος στη Βόρεια θάλασσα.....	71

#### Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 2-1. Σημαντήρας μέτρησης κύματος και ανέμου στο OWEZ, Μετεωρολογικός ιστός στο Horns Rev, πλατφόρμα FINO βόρεια του Borkum. ....	16
Εικόνα 2-2. Πλατφόρμα ORQA (Offshore Risk Quantification Analysis).....	17
Εικόνα 3-1 Δράση του υπεράκτιου περιβάλλοντος στη κατασκευή.....	30
Εικόνα 3-2. Κύριες συνιστώσες ανεμογεννήτριας.....	36
Εικόνα 4-1. Πρόσβαση με ειδικό σκάφος. ....	47
Εικόνα 4-2. Το σύστημα bird collision.. ....	48
Εικόνα 4-3. Ειδικό σκάφος μεταφοράς.....	48
Εικόνα 4-4. Εγκατάσταση με ειδικό σκάφος – γερανοφόρο.....	49
Εικόνα 9-1. Το τρίποδο είναι μια από τις εναλλακτικές επιλογές της θεμελίωση μονού πυλώνα. ....	103

Στον Abdoulie Chune Rahiem..

# 1. Εισαγωγή

Η ανάπτυξη των σύγχρονων ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρισμού άρχισε προς τα τέλη του δεκάτου ενάτου αιώνα, ωστόσο μόλις κατά τη δεκαετία του 1980 η τεχνολογία ωρίμασε αρκετά ώστε να μπορέσει ο τομέας της αιολικής ενέργειας να εξελιχθεί σε μεγάλη κλίμακα. Η ιδέα της αξιοποίησης του υπεράκτιου αιολικού δυναμικού, άρχισε από το 1970 και μέσα στις επόμενες δεκαετίες ακολούθησαν διάφορες μελέτες.

Η υπεράκτια εγκατάσταση ανεμογεννητριών έχει δύο ουσιαστικά πλεονεκτήματα:

- Δεν έχουμε τους περιβαλλοντικούς και εδαφικούς περιορισμούς που συναντάμε στη στεριά
- Έχουμε μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου με μικρότερη τύρβη.

Το πρώτο υπεράκτιο πάρκο έγινε πραγματικότητα το 1989, με την ανάθεση του έργου Helgoland, στη Γερμανία. Μετά από αυτό ακολούθησαν διάφορα υπεράκτια έργα όπως το Blekinge στη Σουηδία το 1990 και το Vindeby στη Δανία το 1991 αποτελούμενο από έντεκα ανεμογεννήτριες των 450kW. Μέχρι το 1990 οικονομικοί παράγοντες ήταν αυτοί που περιόρισαν τις ανεμογεννήτριες κυρίως σε χερσαίες εγκαταστάσεις. Το κόστος των υπεράκτιων αιολικών πάρκων ήταν αρκετά μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό των χερσαίων (30-40% υψηλότερο), αφού η κατασκευή υπεράκτιων ανεμογεννητριών απαιτεί σημαντική εφαρμοσμένη μηχανική όσον αφορά τις υποδομές, τη τοποθέτηση, την ηλεκτρική διασύνδεση και τη χρήση υλικών που αντέχουν στο διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον. Ακόμα η προστασία του πλωτού εξοπλισμού, η μεταφορά του πληρώματος στην υπεράκτια θέση και η απαίτηση μεγαλύτερου ανθρώπινου δυναμικού, απαιτούν πολλά έξτρα έξοδα. Ωστόσο, η αύξηση του μεγέθους και της αποδοτικότητας των ανεμογεννητριών, σε συνδυασμό με τα πλεονεκτήματα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας (το μέγεθος της ετήσιας παραγωγής ενέργειας υπερβαίνει αυτό ενός ισοδύναμου πάρκου στη στεριά), μείωσαν τα κόστη ανάθεσης και λειτουργίας των υπεράκτιων αιολικών πάρκων. (1)

Έως το 2002, το αιολικό πάρκο Horns Rev στη δυτική ακτή της Δανίας αποτελούνταν από 80 ανεμογεννήτριες με συνολική ισχύ 160MW. Το 2008 στην Ευρώπη, εγκαταστάθηκαν 366 MW υπεράκτιας ισχύος, φτάνοντας τα 1.471 MW. Σήμερα η συνολική ισχύς από χερσαίες και υπεράκτιες εγκαταστάσεις ανέρχεται στα 74.767 MW, με τη Γερμανία να κατέχει τα σκήπτρα και να ακολουθείται από Ισπανία, Ιταλία, Γαλλία και Ην. Βασίλειο. Η εγκατεστημένη αυτή ισχύς σε ένα χρόνο παράγει κατά μέσο όρο 163 TWh ηλεκτρικής ενέργειας που αντιστοιχεί στο 4.8% της συνολικής ζήτησης της ΕΕ. Και υπάρχει ακόμα τεράστιο ενδιαφέρον για περαιτέρω ανάπτυξη. Πάνω από 100GW προγραμματίζονται αυτή τη περίοδο, που μόλις



λειτουργήσουν θα συνεισφέρουν στο 10% της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη και θα μειώσουν κατά 202 Mt την εκπομπή CO<sub>2</sub> ετησίως.

Οι προοπτικές της EWEA για το 2030 θέλουν την υπεράκτια ενέργεια να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο και η εγκατεστημένη ισχύς να φτάνει τα 150GW. Πιο αναλυτικά τα σενάρια για τις επόμενες δύο δεκαετίες είναι τα εξής:

2020

- 40GW εγκατεστημένης ισχύος
- Ετήσια εγκατάσταση 6,9GW
- Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 148 TWh
- Μείωση του CO<sub>2</sub> κατά 85Mt ετησίως
- Επενδύσεις των 8.8 δισεκατομμυρίων ευρώ το χρόνο στους ανεμοκινητήρες

2030

- 150 GW εγκατεστημένης ισχύος
  - Ετήσια εγκατάσταση 13,69 MW
  - Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 563 TWh
  - Μείωση του CO<sub>2</sub> κατά 292 Mt ετησίως
  - Επενδύσεις των 16.5 δισεκατομμυρίων ευρώ το χρόνο στους ανεμοκινητήρες
- (2)

Ωστόσο, για να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι απαιτούνται συντονισμένες ενέργειες και σωστή πολιτική πρωτοβουλία για την αντιμετώπιση των διαφόρων προκλήσεων που υπάρχουν στο τομέα αυτό όπως η δημιουργία ενός πανευρωπαϊκού ηλεκτρικού δικτύου που θα δώσει πρόσβαση στα υπεράκτια αιολικά πάρκα, συντελώντας τελικά σε μια ενιαία Ευρωπαϊκή αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Μέχρι πρόσφατα, το ερώτημα ήταν εάν μπορεί το υπεράκτιο αιολικό δυναμικό να αξιοποιηθεί μέσα σε αποδεκτό κόστος και ποιός θα είναι ο κατάλληλος σχεδιασμός της μηχανής για να κατορθωθεί αυτό, σήμερα έχει απαντηθεί επιτυχώς και έχει αποδειχθεί ότι η υπεράκτια ενέργεια είναι τεχνικά, οικονομικά και περιβαλλοντικά αξιοποιήσιμη.

Οι κατασκευαστές ανεμογεννητριών δοκιμάζουν όλο και μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες που λειτουργούν σε υψηλές ταχύτητες για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και την παραγωγή μεγαλύτερης ισχύος. Οι μηχανές με ονομαστική ισχύ πολλών μεγαβάτ αποτελούν το μέλλον της αιολικής ενέργειας, αφού το σημαντικότερο εμπόδιο για την κατασκευή τους υπήρξε το κόστος κεφαλαίου του αιολικού πάρκου. Με την κατασκευή μεγαλύτερων και πιο αξιόπιστων μηχανών είναι

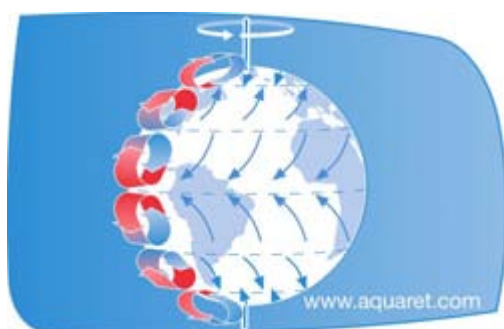
δυνατόν να μειωθεί αυτό το κόστος (οικονομία κλίμακας) καθώς και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης ανά κιλοβατώρα.

Ακόμη, αντικείμενο συστηματικής έρευνας αποτελούν οι δυνατότητες βελτίωσης στη θεμελίωση προκειμένου να καταστεί δυνατή η χρήση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών σε βαθύτερα ύδατα και σε δύσκολες συνθήκες. Η πλωτή στήριξη είναι η σημαντικότερη κατασκευή έδρασης που ερευνάται. (3) (1) (4)

## 2. Υπεράκτιο περιβάλλον και ενεργειακό δυναμικό

### 2.1 Ο άνεμος

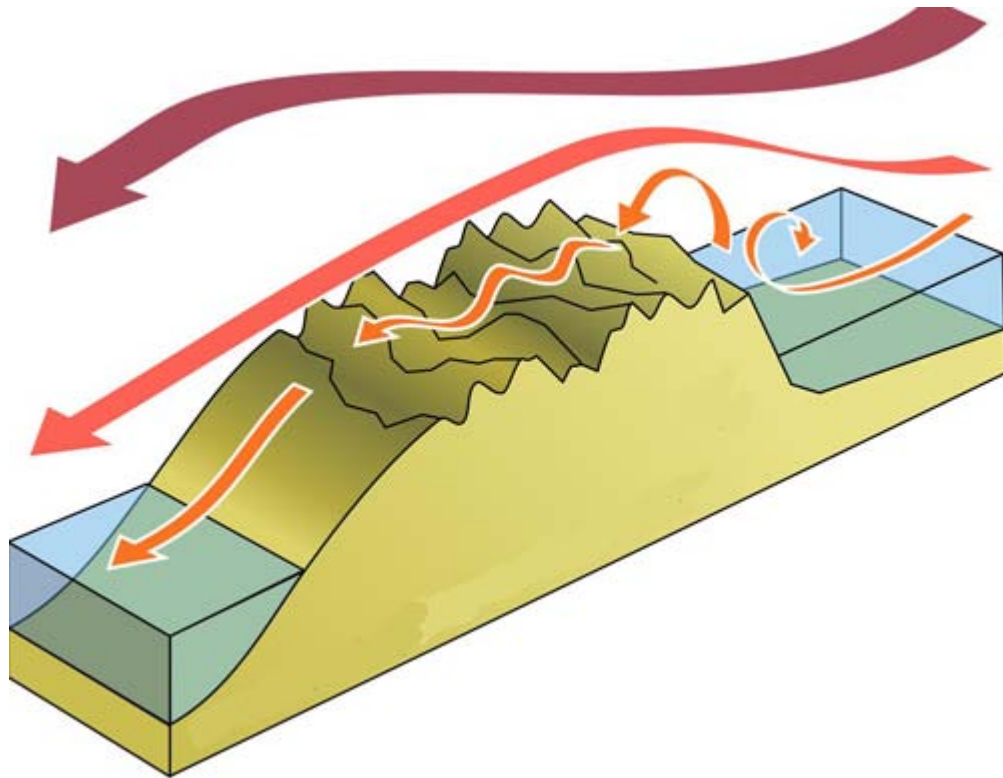
Ο άνεμος είναι η κίνηση του αέρα που μεταφέρει κινητική ενέργεια, η απόσπαση της οποίας γίνεται μέσω των ανεμογεννητριών. Οι άνεμοι της ατμόσφαιρας που κινούνται κυκλικά γύρω από τη γη δημιουργούνται λόγω της ανομοιόμορφης θέρμανσης της επιφάνειας της γης από τον ήλιο, με τους πόλους να δέχονται λιγότερη ηλιακή ενέργεια από τον ισημερινό, και λόγω της περιστροφικής κίνησης του πλανήτη. Στο σχήμα 2-1 φαίνεται η κίνηση του άνεμου, όπου θερμός αέρας έχει μικρότερη πυκνότητα και είναι ελαφρύτερος από τον ψυχρό. Ο αέρας στις θερμότερες περιοχές κινείται προς τα επάνω και στη θέση του εισρέουν ψυχρότερες και πυκνότερες αέριες μάζες, και όλο αυτό δημιουργεί τους ανέμους.



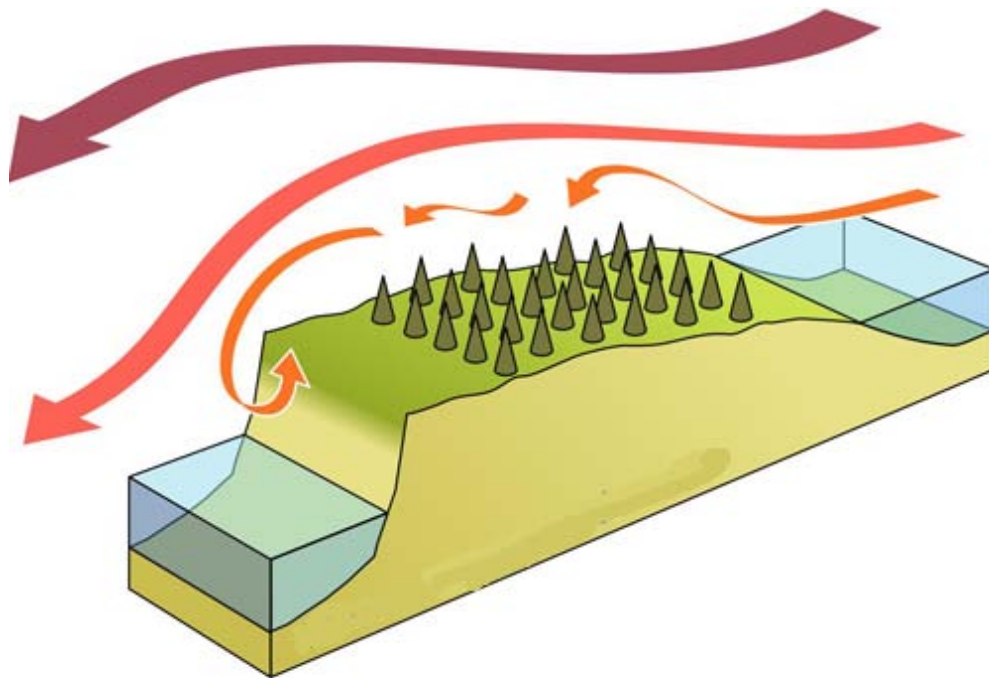
Σχήμα 2-1. Οι κινήσεις των ανέμων.

Επειδή η στεριά και το νερό απορροφούν τη θερμότητα του ήλιου σε διαφορετικό βαθμό, ο αέρας της στεριάς θερμαίνεται και ψύχεται ταχύτερα απ' ό,τι ο αέρας που βρίσκεται πάνω από το νερό. Κατά τη διάρκεια της ημέρας, ο επί της ξηράς αέρας διαστέλλεται, αρχίζει να κινείται προς τα επάνω και αντικαθίσταται από τον ψυχρότερο αέρα της θάλασσας, δημιουργώντας έτσι τις θαλάσσιες αύρες στις ακτές. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η κίνηση των ανέμων αναστρέφεται.

Όσο μεγαλύτερη η ταχύτητα του ανέμου, τόσο περισσότερη ενέργεια περικλείει. Οι ταχύτητες των ανέμων στην ανοικτή θάλασσα είναι γενικά μεγαλύτερες από αυτές στην ξηρά. Καθώς ο άνεμος κινείται επάνω από την επιφάνεια του νερού και δημιουργεί κύματα, χάνει μέρος της ενέργειας του λόγω της τριβής (σχήμα 2-2, 2-3).



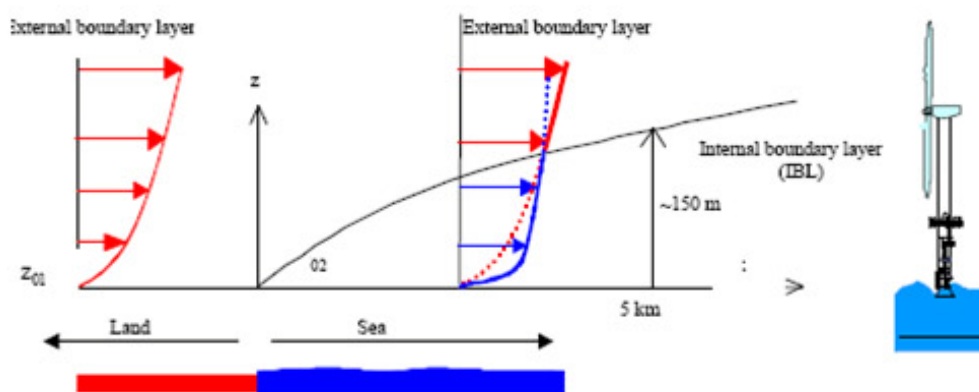
Σχήμα 2-2. Χαρακτηριστικά του ανέμου – περίπτωση 1.



Σχήμα 2-3. Χαρακτηριστικά του ανέμου – περίπτωση 2.

Η ενέργεια που περικλείει ο άνεμος είναι μεγαλύτερη μακρύτερα από την ακτή και αυξάνει σε μέγεθος με την αύξηση του ύψους επάνω από την επιφάνεια του νερού.

Στα μέσα γεωγραφικά πλάτη η υπεράκτια ροή του ανέμου υπόκειται σε λιγότερες νηνεμίες, η ταχύτητα του παραμένει μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα πάνω από τη χαρακτηριστική ταχύτητα έναρξης λειτουργίας του ανεμοκινητήρα και ενδεχομένως έχει μεγαλύτερη προβλεψιμότητα. Εντούτοις, παρά την φαινομενική απλότητα της ορογραφίας, η πρόγνωση του ανέμου σε διάφορες υπεράκτιες περιοχές έχει αποδειχθεί δύσκολο να προβλεφθεί με την επιθυμητή ακρίβεια. Ο κύριος λόγος γι' αυτό είναι ότι η πλειοψηφία των υπεράκτιων έργων σήμερα είναι στη παράκτια ζώνη -στα 20Km από την ακτή- όπου η ατμοσφαιρική ροή προσαρμόζεται στις απότομες αλλαγές της τραχύτητας, της θερμοκρασίας και της υγρασίας. Αυτό συμβαίνει στα υπεράκτια όσο και στα χερσαία καθεστώτα ροής. Επίσης μια σημαντική απροσδιοριστία στο σχεδιασμό ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου είναι η επίδραση του ομόρρου μεταξύ των ανεμογεννητριών στα θαλάσσια οριακά στρώματα. Στο σχήμα 2-4 βλέπουμε πως διαφοροποιείται το εξωτερικό οριακό στρώμα καθώς μετακινούμαστε από τη στεριά στη θάλασσα.



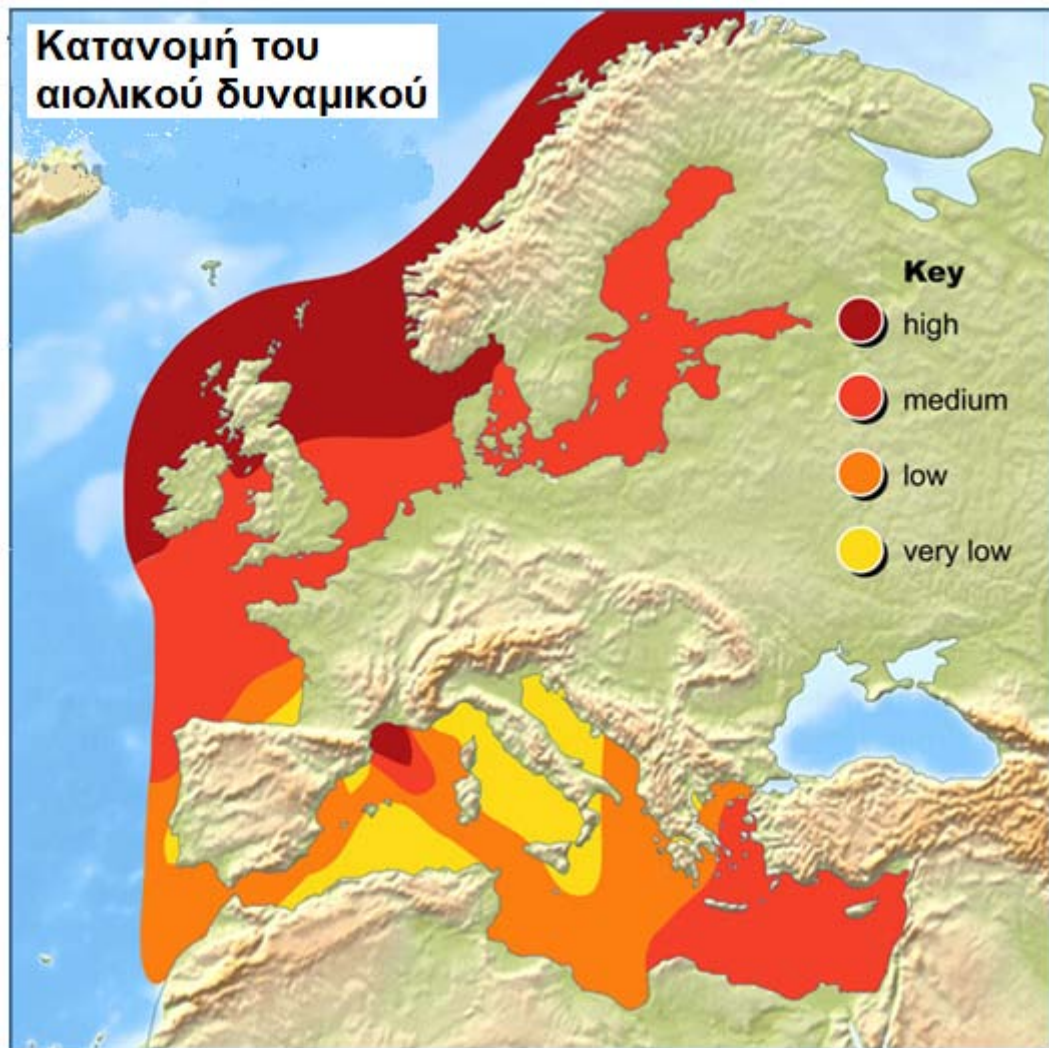
Σχήμα 2-4. Παράκτιες επιδράσεις. Αλλαγή της τραχύτητας επιφάνειας.

## 2.2 Μέτρηση των χαρακτηριστικών του ανέμου και των κυμάτων

### 2.2.1 Γενικά

Για τον υπολογισμό του αιολικού δυναμικού μιας θέσης απαιτείται η γνώση της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας, ενέργειας που μεταβάλλεται όμως με το χρόνο. Αντιπροσωπευτική τιμή της όμως μπορεί να είναι η μέση ετήσια τιμή η οποία όμως για να υπολογιστεί απαιτεί τη γνώση της διάρκειας πνοής των ανέμων κάθε κατηγορίας ή κλίμακας ταχυτήτων. (5) Στοιχεία για το αιολικό δυναμικό μιας υπεράκτιας περιοχής μπορούν να παρθούν είτε με εκτέλεση τοπικών μετρήσεων είτε από ήδη υπάρχουσες μετρήσεις σε άλλες παράκτιες περιοχές. Οι περισσότερες μετρήσεις για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών του ανέμου γίνονται για περίοδο ενός ή δύο χρόνων στο ύψος του πύργου του ανεμοκινητήρα. Το πρόβλημα στην πρώτη περίπτωση είναι, ότι δεν είναι δυνατό οι μετρήσεις να γίνουν όσο καιρό χρειάζεται ώστε να ληφθούν ως βάση για αξιόπιστες μακροπρόθεσμες στατιστικές, ενώ στην δεύτερη περίπτωση η άλλη περιοχή πιθανά δεν είναι αντιπροσωπευτική. (6) (7)

Η λύση στη πρώτη περίπτωση είναι ο συσχετισμός με άλλη περιοχή που έχει τις απαραίτητες αξιόπιστες μακροχρόνιες μετρήσεις, ενώ στη δεύτερη περίπτωση είναι η χρήση διορθωτικών μεθόδων ( ανάλογα με το γεωγραφικό ανάγλυφο και τα εμπόδια). (6)



Σχήμα 2-5 Υπεράκτιος αιολικός χάρτης Ευρώπης. (4)

Επίσης από έναν υπεράκτιο αιολικό χάρτη όπως αυτός του σχήματος 2-5, μπορούμε να εκτιμήσουμε το αιολικό δυναμικό σε μια περιοχή αλλά δεν είναι κατάλληλος για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης.

### 2.2.2 Στοιχεία Ανέμου και Κύματος

Τα στοιχεία για τον άνεμο και τα κύματα μπορούν να ληφθούν με άμεσες μετρήσεις, από δορυφορικές παρατηρήσεις ή από τη χρήση θεωρητικών μοντέλων. Παρακάτω αναφέρονται διάφορα όργανα μετεωρολογίας και συστήματα ανεμολογικών μετρήσεων.

#### Σημαντήρες

Οι περισσότερες χώρες που συνορεύουν με θάλασσα έχουν μια κρατική υπηρεσία που έχει μετρήσεις για τα χαρακτηριστικά των κυμάτων (ύψος, περίοδος, διεύθυνση, τύπος κ.α.) σε διάρκεια πολλών ετών. Τα περισσότερα από αυτά τα

χαρακτηριστικά έχουν καταγραφεί με ειδικούς σημαντήρες κυμάτων οι οποίοι είναι τοποθετημένοι κατά μήκος της ακτής. Σε κάποιες περιοχές, τα χαρακτηριστικά των κυμάτων συνοδεύονται και με τους χαρακτηριστικούς παραμέτρους για τον άνεμο από κοντινούς μετεωρολογικούς σταθμούς.

Για το σχεδιασμό των υπεράκτιων αιολικών πάρκων, η παρουσία ενός σημαντήρα στην περιοχή μπορεί να βοηθήσει σημαντικά δίνοντας τα απαραίτητα δεδομένα για τα κύματα. Τα ελεύθερα διαθέσιμα στοιχεία μπορούν να υποβληθούν εύκολα σε επεξεργασία για να ληφθεί μια λεπτομερή περιγραφή των χαρακτηριστικών των κυμάτων (και του ανέμου). Ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο, φυσικά, δεν είναι πάντα τοποθετημένο στην ίδια ακριβώς περιοχή με το σημαντήρα. Πρόσθετη λοιπόν προσοχή πρέπει να ληφθεί στη προσομοίωση αυτών των στοιχείων στη προσχεδιασμένη θέση του αιολικού πάρκου, καθώς επίσης να ληφθούν υπόψη και τα βαθμομετρικά χαρακτηριστικά. Κάποιοι σημαντήρες μπορούν να μετρούν, εκτός από το ύψος και τη περίοδο των κυμάτων και την ταχύτητα του ανέμου σε ύψος 10m πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας. Ένας τέτοιος σημαντήρας, γνωστός ως YM6, φαίνεται στο Σχήμα 2-1. (6) (7)



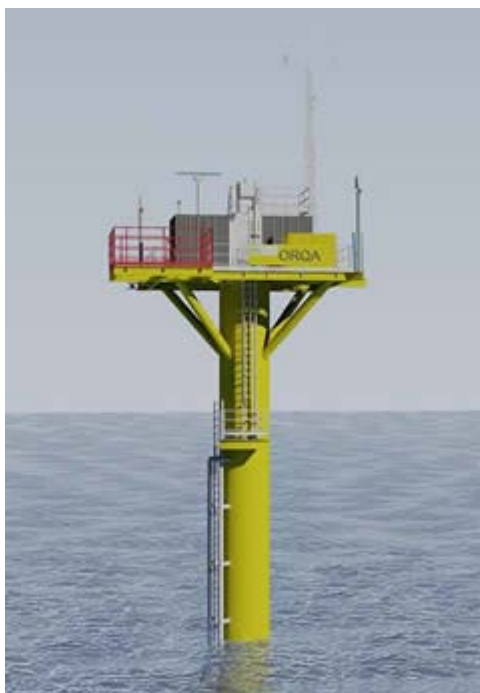
Εικόνα 2-1. Σημαντήρας μέτρησης κύματος και ανέμου στο OWEZ, Μετεωρολογικός ιστός στο Horns Rev, πλατφόρμα FINO βόρεια του Borkum.

### Μετρήσεις από πλατφόρμα (Platform data)

Για πιο εκτενείς μετρήσεις, το δίκτυο σημαντήρων επεκτείνεται συνήθως με μια πλατφόρμα παρακολούθησης και απεικόνισης δεδομένων. Μια πλατφόρμα προσφέρει τη δυνατότητα να μετρηθεί η ταχύτητα ανέμου σε διαφορετικά ύψη, να δοκιμάσει το νέο εξοπλισμό στη περιοχή και να γίνουν πειράματα. Στην Ολλανδική ακτή, το Meet post Noordwijk έχει χρησιμοποιηθεί για 3 δεκαετίες, ενώ οι Γερμανοί το 2003, εγκατέστησαν τη πλατφόρμα μέτρησης, FINO, στη Βόρεια Θάλασσα κοντά στο Borkum, μόνο και μόνο για να υποστηρίξουν τις προσπάθειες ανάπτυξης υπεράκτιων αιολικών πάρκων στη Βόρεια Θάλασσα. Μια φωτογραφία της πλατφόρμας παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-1. Τελευταίας τεχνολογίας είναι η πλατφόρμα ORQA (Offshore Risk Quantification Analysis) όπου είναι σχεδιασμένη ειδικά για να απεικονίζει πλήρως εικόνες από μετεωρολογικά και περιβαλλοντολογικά στοιχεία, καθώς επίσης και δεδομένα για τα κύματα, τις



παλίρροιες και τη κατάσταση της έδρασης στο πυθμένα της θάλασσας (Εικόνα 2-2).  
(8) (3)



Εικόνα 2-2. Πλατφόρμα ORQA (Offshore Risk Quantification Analysis).

#### Μετεωρολογικοί ιστοί (Meteorological masts)

Δεδομένου ότι τα πρώτα υπεράκτια αιολικά πάρκα αναπτύχθηκαν κυρίως πειραματικά για να εξετάσουν τη δυνατότητα πραγματοποίησης της αξιοποίησης της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας, όλα τα πάρκα εξοπλίστηκαν με μετεωρολογικούς ιστούς: λεπτές κατασκευές με ανεμόμετρα που φτάνουν μέχρι το ύψος των πτερυγίων και ακόμη πιο πάνω για να μετρήσουν τα χαρακτηριστικά του υπεράκτιου ανέμου στη περιοχή του πάρκου. Αν και οι μετεωρολογικοί ιστοί είναι ένα τέλειο ερευνητικό εργαλείο, δεν είναι ιδανικοί για να συγκεντρώσουν τα λεπτομερή περιβαλλοντικά στοιχεία που χρειάζονται για το σχεδιασμό. Η εγκατάστασή τους δεν είναι συνήθως αρκετά έγκαιρη για να συγκεντρώσει στοιχεία για μια αρκετά μεγάλη χρονική περίοδο ώστε να παρέχει στατιστικά έγκυρα στοιχεία. Επιπλέον το κόστος του που ξεπερνάει το 1 εκατομμύριο ευρώ, το καθιστούν πολύ ακριβό όργανο στη βιομηχανία, η οποία πρέπει να περιορίσει τις δαπάνες τις όσο το δυνατόν περισσότερο, προκειμένου να γίνει πλήρως αυτοδύναμη Κέα ανταγωνιστική. (7) (6)

#### Απόρρητα δεδομένα (Hindcast)

Για να υποστηρίξουν την ανάπτυξη των κατασκευών τους, οι παράκτιες βιομηχανίες πετρελαίου και φυσικού αερίου στις χώρες γύρω από τη Βόρεια Θάλασσα άρχισαν το πρόγραμμα NESS (North European Storm Study), για τη

δημιουργία μιας βάσης δεδομένων για τα χαρακτηριστικά των κυμάτων σε ολόκληρη τη Βόρεια Θάλασσα. Έτσι ένα μεγάλο μαθηματικό πρότυπο δημιουργήθηκε, ενσωματώνοντας όλες τις σχετικές κυρίως χώρες και την αλληλεπίδραση ανέμου-θάλασσας. Το πρότυπο τροφοδοτήθηκε με μετεωρολογικές μετρήσεις από τους σταθμούς γύρω από τη Βόρεια Θάλασσα και επικυρώθηκε με μετρήσεις από πλατφόρμες για τον άνεμο, τα κύματα και τα θαλάσσια ρεύματα. Το πρότυπο χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργήσει μια βάση δεδομένων για τον άνεμο, τα κύματα και τα ρεύματα για επιφάνεια 30 X 30 Km που καλύπτει ολόκληρη τη Βόρεια Θάλασσα. Δεδομένου ότι το πρόγραμμα εστίασε αρχικά στις θύελλες, συμπεριλήφθηκαν 7 χειμώνες και 2 καλοκαίρια. Καθώς το πρόγραμμα έφτανε στο τέλος εκτέλεσης του, 3 διαδοχικά θυελλώδη καλοκαίρια έκαναν την ομάδα προγράμματος να αποφασίσει να συνεχίσουν τη διαμόρφωση hindcast για άλλα 5 πλήρη έτη (NEXT study) (6) (7) (9)

Η βάση δεδομένων των NESS-NEXT στοιχείων αυτή τη περίοδο είναι διαθέσιμη μόνο στους συνεργάτες του προγράμματος. Προσφέρει μια ιδιαίτερα λεπτομερή περιγραφή των πολύ σημαντικών περιβαλλοντικών παραμέτρων σε μία πρότυπη διαμόρφωση για όλες τις θέσεις στη Βόρεια Θάλασσα. Ένα μειονέκτημα όχι πολύ σημαντικό, είναι ο περιορισμός των χρησιμοποιούμενων μοντέλων: εφαρμόστηκαν κυρίως στις βαθύτερες περιοχές της Βόρεια Θάλασσας. Για τη χρήση των στοιχείων στα τρέχοντα αιολικά πάρκα πιο κοντά στην ακτή, μπορεί να απαιτηθεί σε αρκετές περιπτώσεις ο «μετασχηματισμός» των στοιχείων από τις υπεράκτιες περιοχές στις παράκτιες. (7)

#### Δορυφορικά στοιχεία (Satellite data)

Μια νέα σχετικά πηγή σχεδιαστικών στοιχείων προέρχεται από τις δορυφορικές παρατηρήσεις. Με την επεξεργασία του υψομετρητή, των μετρητών του διασκορπισμού και των εικόνων SAR (ραντάρ), μπορούν να καθοριστούν τα στοιχεία για τα κύματα ενός μεγάλου τμήματος της θάλασσας ή του ωκεανού. Για παράδειγμα η ιστοσελίδα [www.waveclimate.com](http://www.waveclimate.com) προσφέρει επεξεργασμένα δορυφορικά στοιχεία 15 ετών για όλες τις θαλάσσιες περιοχές στον κόσμο. Η υπηρεσία επεκτείνεται με τα μοντέλα hindcast, τα οποία τροφοδοτούνται από τις δορυφορικές παρατηρήσεις και από τις διαθέσιμες μετρήσεις σημαντήρων και πλατφόρμων για τη συνεχή βελτίωση και επέκταση των συνολικών βάσεων δεδομένων. Με τη χρήση αυτών των μοντέλων hindcast ένα μεγάλο μειονέκτημα των δορυφορικών στοιχείων υπερνικείται, το οποίο είναι ότι οι δορυφόροι δεν μπορούν να παρέχουν συνεχή στοιχεία στα διάφορα τμήματα της θάλασσας αλλά από καιρό σε καιρό, και έτσι λείπει μια σημαντική στατιστικά συνοχή.

Η ευκολία πρόσβασης σ' αυτά τα στοιχεία και ο τρόπος με τον οποίο παρουσιάζονται στο διαδίκτυο τα κάνουν μια πολύ χρήσιμη πηγή για τα σχεδιαστικά δεδομένα που απαιτούνται προκειμένου να βγει το προκαταρκτικό σχέδιο του πάρκου. Σε πολλές τοποθεσίες δεν υπάρχουν άλλες πηγές στοιχείων τέτοιας

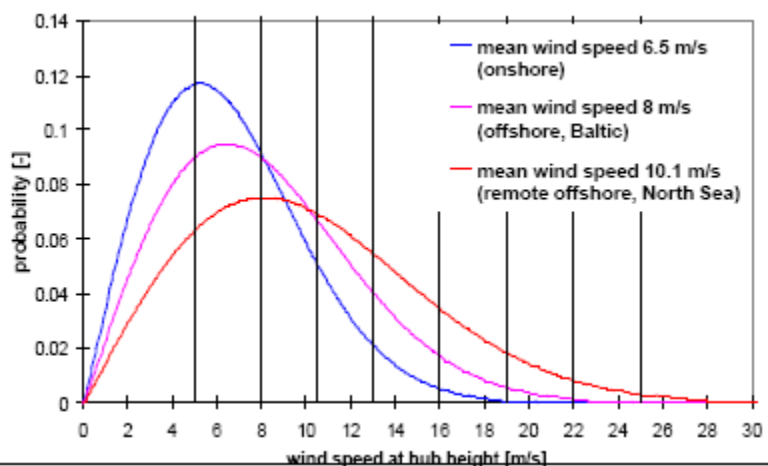
διάρκειας. Τα δορυφορικά αυτά στοιχεία, μπορούν τότε να εφαρμοστούν επωφελώς και κατά τη διάρκεια προχωρημένων σταδίων του σχεδιασμού του έργου. (7)

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει το υπεράκτιο αιολικό δυναμικό σε διάφορες χώρες της Ευρώπης, ενώ η καμπύλη Weibull είναι ένα καθιερωμένο θεωρητικό μοντέλο υπολογισμού της κατανομής συχνοτήτων της ταχύτητας ανέμου, που δίνει τη πυκνότητα πιθανότητας.

Country	Offshore potential -TWh/y*	Total electricity usage (1994) TWh/y
UK	986	321
Denmark	550	32
France	477	355
Germany	237	432
Ireland	183	13
Italy	154	235
Spain	140	137
Netherlands	136	75
Greece	92	34
Portugal	49	25
Belgium	24	63
<b>TOTAL EC</b>	<b>3028</b>	<b>1846</b>

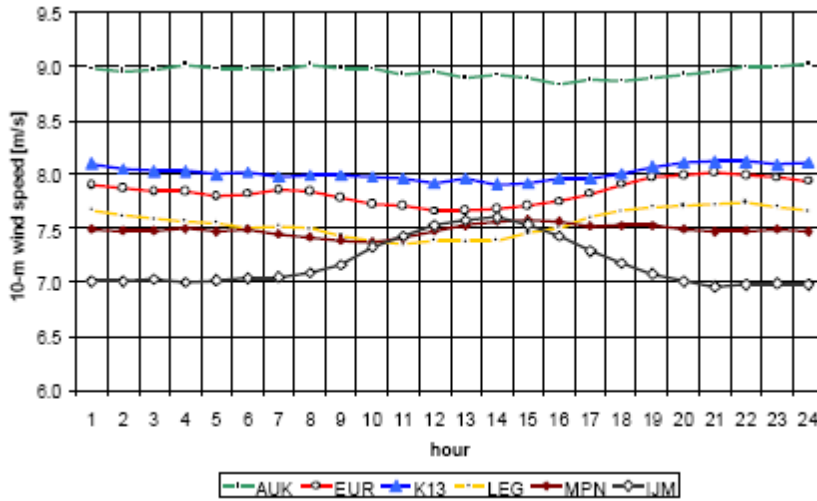
\* based on 30km from land 40m depth and up to 10m/s wind speed<sup>7</sup>

Πίνακας 2-1. Υπεράκτιο αιολικό δυναμικό στις χώρες της ΕΕ σε TWh/έτος. (6)

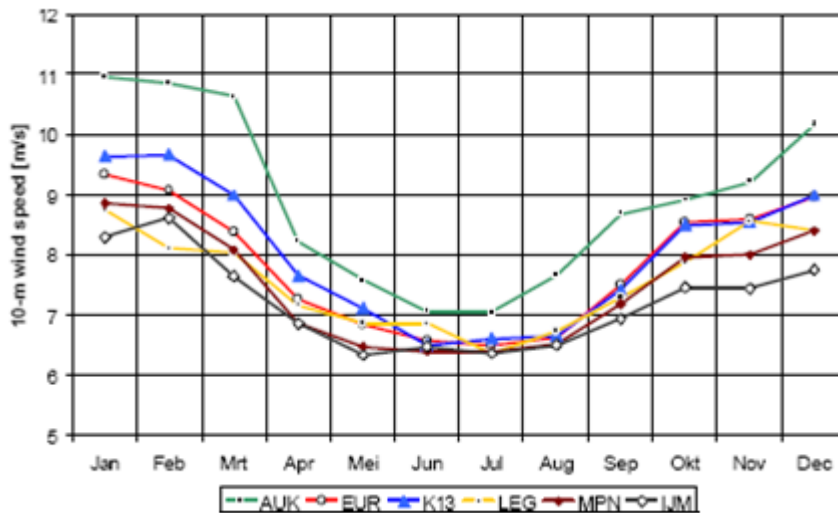


Διάγραμμα 2-1. Κατανομή Weibull.

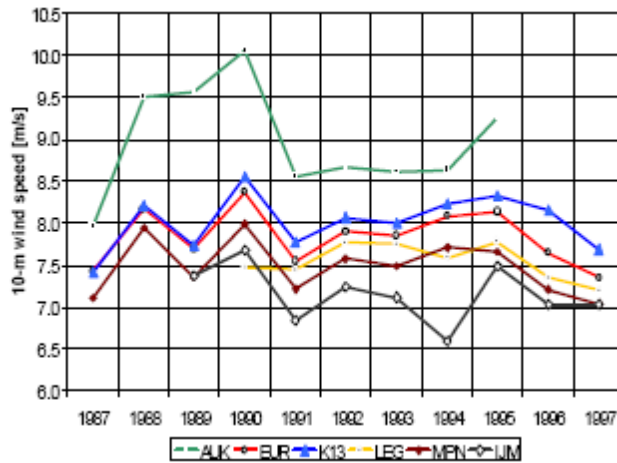
Και τα παρακάτω διαγράμματα δείχνουν τη διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο, σε ύψος 10m από την επιφάνεια της θάλασσας σε διάφορους σταθμούς. (6) (10)



Διάγραμμα 2-2. Ωριαία διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου.



Διάγραμμα 2-3. Μηνιαία διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου.

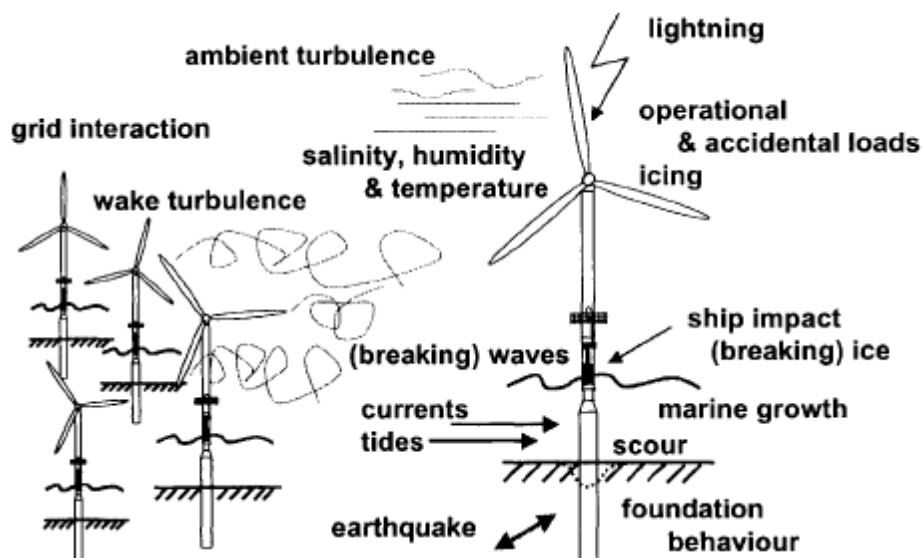


Διάγραμμα 2-4. Ετήσια διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου.

Από το τελευταίο διάγραμμα της ετήσιας διακύμανσης συμπεραίνουμε ότι η ενεργειακή απόδοση διαφέρει πολύ από έτος σε έτος.

## 2.3 Υπεράκτιο περιβάλλον

Οι υπεράκτιες συνθήκες όπως είπαμε οδηγούν σε διαφορετικές απαιτήσεις στο σχεδιασμό του υπεράκτιου ανεμοκινητήρα. Οι συνθήκες αυτές αλλάζουν σημαντικά, ανάλογα με την θέση του ανεμοκινητήρα και το βάθος της θάλασσας. Οι σχετικοί λοιπόν παράμετροι που πρέπει να γνωρίζουμε για την μελέτη του έργου είναι οι μετεωρολογικοί – ωκεανογραφικοί, οι αποκαλούμενοι 'met-ocean' παράμετροι και το υλικό του εδάφους. Στο Σχήμα 2-6 φαίνονται καθαρά όλες οι εξωτερικές περιβαλλοντικές επιδράσεις για ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο. Οι αντίξοες καιρικές συνθήκες, η δύσκολη πρόσβαση για την επιθεώρηση και τη λειτουργία του πάρκου για μεγάλη χρονική περίοδο, μαζί με την ανάγκη για οικονομικά βέλτιστες σχεδιαστικές λύσεις, οδηγούν στη λεπτομερή περιγραφή του περιβάλλοντος. (10)



Σχήμα 2-6. Εξωτερικές περιβαλλοντικές επιδράσεις σε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο. (10)

Η σχέση του περιβάλλοντος και του υπεράκτιου ανεμοκινητήρα είναι μάλλον μοναδική: οι υπεράκτιοι ανεμοκινητήρες είναι ειδικά σχεδιασμένοι για να « πιάσουν» όσο το δυνατόν περισσότερο φορτίο ανέμου. Ωστόσο, στο σχεδιασμό της μηχανής πρέπει να λαμβάνεται υπόψη αυστηρά διαχωρισμένα ο οικονομικός αντίκτυπος και το φορτίο του ανέμου για τη βέλτιστη απόδοση. Εντούτοις, και οι δύο υπολογισμοί είναι κρίσιμοι για ένα επιτυχές έργο και βασίζεται σε μεγάλο ποσοστό στην ποιότητα των περιβαλλοντικών στοιχείων που είναι διαθέσιμα σε μια περιοχή.

Για παράδειγμα στον Πίνακα 2-2 παρουσιάζονται ενδεικτικά μετεωρολογικά-ωκεανογραφικά χαρακτηριστικά, όπως μετρήθηκαν σε κάποια υπεράκτια θέση στη Μεγάλη Βρετανία και προέκυψαν από συγκεκριμένη μελέτη. (7)

Υπεράκτια απόσταση	5km
Ταχύτητα ανέμου (35m πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, ριπή ανέμου, RP50,3)	50 m/s
Μέγιστη ριπή ανέμου (κατά τη λειτουργία)	38m/s
Μέση στάθμη της θάλασσας	12.0m
Μεγίστη αστρονομική παλίρροια	15.5m
Μέγιστη στάθμη του ύδατος 16.7m (RP50)	16.7m
Ύψος κορυφής κύματος (συμβαίνει στη μέγιστη στάθμη ύδατος)	24m

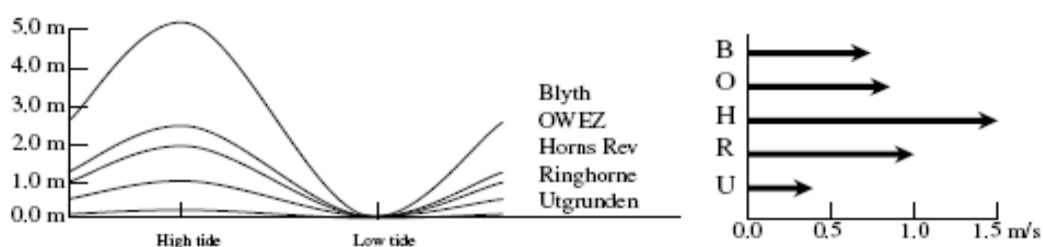
Πίνακας 2-2. Ενδεικτικά μετεωρολογικά-ωκεανογραφικά χαρακτηριστικά, σε υπεράκτια θέση στη Μεγάλη Βρετανία. (7)

Ο σχεδιασμός των υπεράκτιων αιολικών πάρκων θα πρέπει να είναι εφαρμογή μιας αποδεδειγμένης διαφορετικής τεχνολογίας. Για παράδειγμα, τα υπεράκτια αιολικά πάρκα βρίσκονται γενικά σε ρηχά νερά και πιο κοντά στην ακτή (παράκτια ζώνη) από τις περισσότερες υπεράκτιες εγκαταστάσεις πετρελαίου με συνέπεια να έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά φορτίων και πιο σύνθετη υδροδυναμική συμπεριφορά. Τα φορτία του ανέμου και τα υδροδυναμικά φορτία είναι συχνά του ίδιου μεγέθους. Γενικά η καταπόνηση είναι μεγαλύτερη. Επίσης, η μέγιστη καταπόνηση δε ασκείται απαραίτητως όταν κυριαρχούν ακραίες καιρικές συνθήκες (θύελλες κλπ.) στη διάρκεια των 50 ετών, δεδομένου ότι τα αεροδυναμικά φορτία κατά τη διάρκεια της λειτουργίας μπορεί να είναι πιο απαιτητικά! (10) (1)

Το υπεράκτια χαρακτηριστικά του ανέμου, διαφέρουν αρκετά από το χερσαία καθώς επίσης και από περιοχή σε περιοχή. Ως εκ τούτου, για τα μεγάλα έργα, απαιτείται από τεχνικής και οικονομικής άποψης, συγκεκριμένη μελέτη με όλα τα χαρακτηριστικά της υποψήφιας περιοχής. Παρακάτω αναφέρονται οι κρίσιμοι παράμετροι για το σχεδιασμό της κατασκευής υποστήριξης του ανεμοκινητήρα (support structure) καθώς επίσης και ο τρόπος μέτρησης των απαραίτητων στοιχείων. (7)

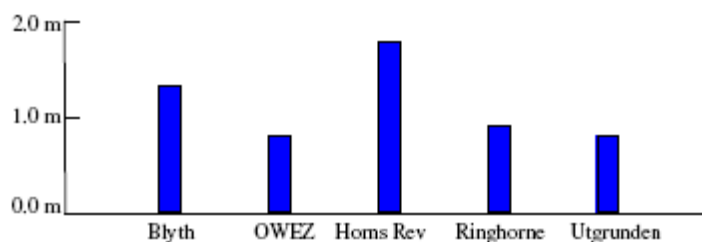
### 2.3.1 Παλίρροιες, Θαλάσσια ρεύματα και Θυελλώδη Κύματα

Σε αντίθεση με τα στοιχεία για τον άνεμο και τα κύματα, οι παράμετροι της παλίρροιας μπορούν να εκτιμηθούν πιο εύκολα. Οποιοσδήποτε θαλάσσιος χάρτης μπορεί να δώσει το εύρος της παλίρροιας και τις ταχύτητες των παλιρροιακών ρευμάτων στις διάφορες περιοχές. Στο Σχήμα 2-7 φαίνεται το εύρος της παλίρροιας σε πέντε αναφερόμενες περιοχές αιολικών πάρκων, στο οποίο βλέπουμε καθαρά τη σχέση μεταξύ της παλίρροιας και της μεγάλης ταχύτητας των ρευμάτων.



Σχήμα 2-7. Παλιρροιακή εμβέλεια και ταχύτητες ρευμάτων σε 5 αναφορικές περιοχές υπεράκτιων αιολικών πάρκων.

Στα θυελλώδη κύματα οφείλεται η αύξηση της στάθμης του ύδατος. Ο προσδιορισμός ενός θυελλώδους κύματος είναι λιγότερο σαφής από ένα τοπικό ρεύμα. Εάν τα στοιχεία μιας περιοχής είναι διαθέσιμα, το θυελλώδες κύμα μπορεί να εξαχθεί μετά από μακροπρόθεσμες μετρήσεις και ύστατες αναλυτικές εκτιμήσεις. Εάν δεν είναι εύκολα διαθέσιμα τα στοιχεία μιας συγκεκριμένης περιοχής, τότε, πιο χονδροειδής εκτιμήσεις είναι απαραίτητες, όπως συνέβη για παράδειγμα στη περίπτωση του πάρκου Utgrunden. Το Διάγραμμα 2-5 παρουσιάζει τα καθιερωμένα ύψη θυελλώδους κυμάτων σε διάφορες περιοχές υπεράκτιων πάρκων. (7) (6)



Διάγραμμα 2-5. Οι τιμές του σχεδίου για ακραία θυελλώδη κύματα σε 5 περιοχές αναφοράς.

### 2.3.2 Βαθυμετρία:

Το βάθος της θάλασσας σε κάθε σημείο επηρεάζει σημαντικά τα χαρακτηριστικά του κύματος και των ρευμάτων. Πρώτον, η ύπαρξη αμμόλοφων στο πυθμένα της θάλασσας και τα ρηχότερα σημεία στην ευρύτερη περιοχή του πάρκου, μπορούν να μειώσουν το μέγιστο ύψος κύματος. Τα ψηλότερα κύματα θα «σπάσουν» στον αμμόλοφο. Αν και οι μεγάλοι αμμόλοφοι είναι συνήθως στάσιμοι καθόλη τη διάρκεια ζωής (20 έτη) του υπεράκτιου αιολικού πάρκου, οι παρυφές αυτών πρέπει να αποφευχθούν σε περίπτωση μετατόπισης τους.

Δεύτερον, ένας ελαφρά επικλινής βυθός μπορεί να απαιτήσει πρόσθετες αναλύσεις των μετρήσεων όταν αυτές έχουν παρθεί από πιο μακρινό σημείο από το σημείο εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας. Φαινόμενα όπως οι ύφαλοι (τα κύματα γίνονται ψηλότερα και πιο απότομοι) και η διάθλαση (η κατεύθυνση των κυμάτων γίνεται κάθετη στην ακτή) μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στη συμπεριφορά των κυμάτων.

Τρίτον, ο ανομοιομορφος βυθός στην ευρύτερη περιοχή του αιολικού πάρκου μπορεί να προκαλέσει το «σπάσιμο» των κυμάτων πάνω στο πύργο του υπεράκτιου ανεμοκινητήρα. Αυτή είναι η περίπτωση του πάρκου Blyth, όπου οι ανεμογεννήτριες είναι εγκατεστημένες σε ένα βραχώδη βυθό. Τέλος η βυθομέτρηση σε όλο το αιολικό πάρκο είναι απίθανο να είναι παντού ομοιομορφη. Αυτό σημαίνει ότι ο κάθε ανεμοκινητήρας βρίσκεται σε διαφορετικό βάθος νερού. (6) (7)

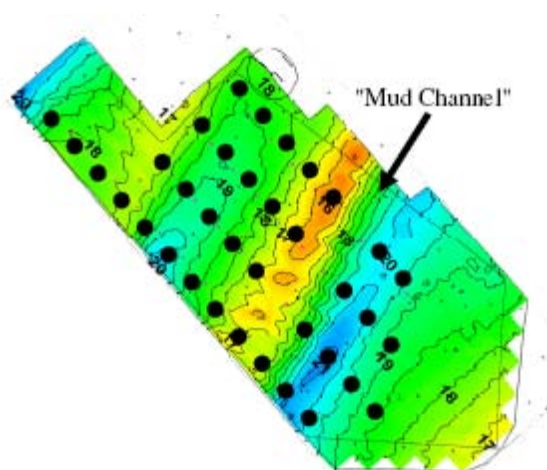
### 2.3.3 Κατατομές του εδάφους (προφίλ)

Τα πιο δύσκολα στοιχεία είναι αυτά που μας δίνουν την σχετική πληροφορία για τη φύση του βυθού. Δεδομένου ότι το έδαφος μπορεί να αλλάζει δραματικά από



περιοχή σε περιοχή, ακόμα και μέσα στην ευρύτερη περιοχή του πάρκου, η καλύτερη λύση είναι να μισθωθεί μια ειδική ομάδα για να καθορίσει την διάταξη του εδάφους και τα εδαφολογικά στοιχεία σε όλες τις προβλεπόμενες τοποθεσίες εγκατάστασης ανεμοκινητήρων. Για το προκαταρκτικό σχέδιο αν υπάρχουν ήδη διαθέσιμα εδαφολογικά στοιχεία από προηγούμενες υπεράκτιες κατασκευές κοντά στη περιοχή μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Μια γεωλογική μελέτη μπορεί να αποκαλύψει την ιστορική συσσώρευση των υλικών του εδάφους από τις δραστηριότητες στην περιοχή όπως για παράδειγμα, η εκροή των ποταμών που δίνουν στρώματα αργίλου (περίπτωση OWEZ), ή ίχνη παγετωδών στρωμάτων από την εποχή των παγετώνων (περίπτωση Horns Rev).

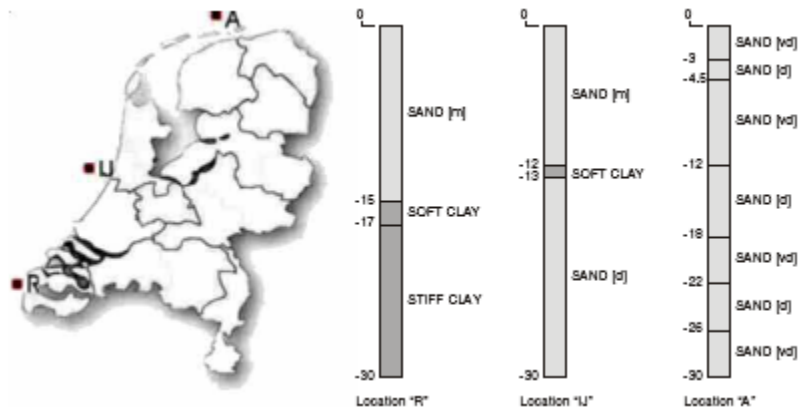
Παραδείγματος χάριν, η εδαφολογική έρευνα στην περιοχή του πάρκου OWEZ, αποκάλυψε ένα «κανάλι λάσπης» μέσα στη παραχωρημένη περιοχή, ένα μικρό τμήμα εδάφους δηλαδή χωρίς συνοχή. Στο Σχήμα 2-8 φαίνεται το κανάλι αυτό καθώς και η προσαρμοσμένη διάταξη του αιολικού πάρκου ώστε οι ανεμοκινητήρες να αποφεύγουν τη τοποθέτηση σε μαλακότερες περιοχές.



Σχήμα 2-8. Λεπτομερές διάγραμμα βάθους και γενική διάταξη του πάρκου OWEZ με τη διασπασμένη τοποθέτηση που αποφεύγει το «κανάλι λάσπης»

Τα μη συνεκτικά υλικά όπως η άμμος μπορούν να συμπαρασυρθούν δια ροής γύρω από την έδραση της ανεμογεννήτριας, δημιουργώντας έτσι ένα αυλάκι γύρω από αυτή (scour).

Δεδομένου ότι ο άργιλος συμπαρασύρεται δυσκολότερα, στρώματα αργίλου κοντά στην επιφάνεια μπορούν να περιορίσουν το βάθος του αυλακώματος σημαντικά έναντι των αμμωδών περιοχών. (11)



Σχήμα 2-9. Εδαφολογικά στρώματα από 3 υπεράκτιες περιοχές με χαρακτηρισμό μέσο (m), πυκνό (d) και πολύ πυκνό (vd) στρώμα άμμου και μαλακός και σκληρός άργιλος.

### 2.3.4 Κινούμενες μάζες άμμου

Η αποτελεσματικότερη μέθοδος για τη μελέτη της κίνησης μεγάλων μαζών άμμου είναι να χρησιμοποιηθεί ιστορικό εικόνων από δορυφόρους. Είναι προφανές ότι αυτές οι κινήσεις επηρεάζουν σημαντικά το βάθος της θεμελίωσης. (11) (6)

## 2.4 Επιλογή τοποθεσίας για την εγκατάσταση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου

Το αιολικό δυναμικό, το βάθος και η μορφολογία του πυθμένα είναι τα βασικά κριτήρια για την επιλογή της κατάλληλης τοποθεσίας για την εγκατάσταση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου.

Ο βασικός σκοπός κατά το σχεδιασμό του αιολικού πάρκου είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας, η ελαχιστοποίηση του κόστους και η τήρηση των περιορισμών που επιβάλλονται από την περιοχή. Η υπεράκτια εγκατάσταση έχει το βασικό πλεονέκτημα ότι οι περιβαλλοντικοί και εδαφικοί περιορισμοί είναι πολύ πιο «χαλαροί» σε σύγκριση με τη χερσαία. Η παραγωγή ισχύος καθορίζεται από το αιολικό δυναμικό της επιλεγείσας περιοχής, τη χωροθέτηση των ανεμογεννητριών και την επιλογή των ανεμοκινητήρων. (6)

### 2.4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή τοποθεσίας

#### Βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης

Όπως αναφέραμε και παραπάνω ο βασικός σκοπός κατά το σχεδιασμό του έργου είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να εξετάζονται και να αξιολογούνται οι μετεωρολογικές συνθήκες και οι ανεμολογικές προβλέψεις σε όλη την ευρύτερη περιοχή που θα εγκατασταθούν οι ανεμογεννήτριες. Προκειμένου να βρούμε τις βέλτιστες περιοχές για τη τοποθέτηση των ανεμογεννητριών, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε πληροφορίες από χάρτες υπεράκτιου αιολικού δυναμικού, από μετεωρολογικούς ιστούς, δορυφορικά αρχεία ή και δεδομένα από κοντινές περιοχές προσαρμοσμένα κατάλληλα. Είναι δυνατή η προσομοίωση των χαρακτηριστικών του ανέμου σε κάθε σημείο εγκατάστασης στη δεδομένη περιοχή για τον υπολογισμό της παραγόμενης ενέργειας κάθε ανεμογεννήτριας.

#### Βάθος και φύση του βυθού

Το βάθος και η φύση του βυθού της θάλασσας είναι παράγοντες που πρέπει να εξετάζονται. Οι επιλογές που υπάρχουν όσον αφορά τις κατασκευές έδρασης είναι περιορισμένες και αυτό έχει σημαντική επίπτωση στο συνολικό κόστος εγκατάστασης των ανεμογεννητριών.

#### Πρόσβαση για συντήρηση

Οι ανεμογεννήτριες θα πρέπει να είναι εύκολα προσβάσιμες για τις εργασίες της συντήρησης και επισκευής. Θα πρέπει λοιπόν να εξετάζεται η απόσταση από την ακτή και τους σταθμούς εξυπηρέτησης, αφού μπορεί να επηρεάσουν τόσο το χρόνο όσο και το κόστος ανέγερσης του αιολικού πάρκου, καθώς και τις εργασίες

συντήρησης. Επιπλέον, μπορεί να οδηγήσουν στην ανάγκη κατασκευής πλωτών εγκαταστάσεων συντήρησης, ιδίως για τα μεγάλα αιολικά πάρκα.

### Οπτικός αντίκτυπος

Αν και δεν είναι σημαντικός παράγοντας όπως στα χερσαία πάρκα, μπορεί ομοίως και εδώ να υπολογιστεί η ζώνη του οπτικού αντίκτυπου (ZVI) υπό την μορφή χάρτη. Ένα αιολικό πάρκο με λιγότερες αλλά μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες είναι συνθήως προτιμότερο από πολλές μικρότερες.

### Θόρυβος

Κα αυτός ο παράγοντας δεν είναι τόσο σημαντικός δεδομένου επιπλέον ότι ο θόρυβος που δημιουργείται από τις ανεμογεννήτριες έχει μειωθεί σημαντικά. Τα επίπεδα του θορύβου μπορούν επίσης να υπολογιστούν και να εξεταστούν ώστε το πάρκο να είναι συμβατό με τα αποδεκτά επίπεδα ήχου όπως ορίζονται από την εθνική νομοθεσία κυρίως για την επιρροή τους στη θαλάσσια ζωή.

### Διάστημα μεταξύ των ανεμογεννητριών

Υπάρχει ένα ελάχιστο αποδεκτό διάστημα μεταξύ των ανεμογεννητριών, λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις από τη δημιουργία ομόρρους των ανεμοκινητήρων.

### Επιλογή σωστού ανεμοκινητήρα

Ο τύπος του ανεμοκινητήρα που θα χρησιμοποιηθεί στις διάφορες τοποθεσίες εξαρτάται από τις συνθήκες του ανέμου, των κυμάτων, του βάρους και της μορφολογίας του βυθού.

### Επιπτώσεις στο οικοσύστημα

Το αιολικό πάρκο ενδέχεται να έχει επιπτώσεις στο οικοσύστημα. Συνεπώς, θα πρέπει να εξετάζεται η κατάσταση όσον αφορά τα ψάρια, τα θαλάσσια θηλαστικά και πτηνά στην περιοχή.

### Θεσμικοί περιορισμοί

Πρέπει να λαμβάνονται υπόψη η ναυσιπλοΐα, η αλιεία και οι διάδρομοι του θαλάσσιου εμπορίου. Ανάλογα με το μέγεθος του αιολικού πάρκου, είναι πιθανόν να επηρεάζονται τα δρομολόγια των εμπορικών πλοίων.

Υπάρχουν διάφοροι περιορισμοί που βέβαια διαφοροποιούνται από χώρα σε χώρα, στην τοποθέτηση των υπεράκτιων κατασκευών που συνοψίζονται υπό τους ακόλουθους τίτλους:

- Εμπορική ναυτιλία
- Αλιεία και αναπαραγωγή ψαριών
- Βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου (βυθοκόρηση)

- Προστατευόμενες περιοχές
- Εθνική άμυνα
- Αισθητική παρέμβαση (6) (4) (7)

### 3. Υπεράκτιος ανεμοκινητήρας

#### 3.1 Προσδιορισμός των σχεδιαστικών απαιτήσεων ενός υπεράκτιου ανεμοκινητήρα

Ο σχεδιασμός μια υπεράκτιας ανεμογεννήτριας είναι παρόμοιος με αυτόν μιας χερσαίας μηχανής ωστόσο υπάρχουν αρκετές διαφορές και απαιτούνται πρόσθετες εκτιμήσεις όπως:

- Ο συνδυασμός της επίδρασης φορτίων από τον άνεμο και τα κύματα. Είναι πολύ πιθανό οι ισχυροί άνεμοι να συνοδεύονται από μεγάλα κύματα χωρίς αυτό να σημαίνει απαραίτητα ότι ακραία καιρικά φαινόμενα, με πολύ ισχυρούς ανέμους συνοδεύονται από κύματα πολύ μεγάλου ύψους την ίδια χρονική περίοδο. Αυτός λοιπόν ο συνδυασμός των φορτίων πρέπει να ληφθεί υπόψη κυρίως όσον αφορά τη κατασκευή υποστήριξης. (θεμελίωση, πύργος). Στο σχήμα 3-1 φαίνεται από που προέρχονται τα φορτία που καταπονούν το κάθε τμήμα της ανεμογεννήτριας. (6)



Εικόνα 3-1 Δράση του υπεράκτιου περιβάλλοντος στη κατασκευή..

- Οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες ως επί το πλείστον χρησιμοποιούνται για τη παραγωγή ενέργειας (εκτός από τη χρήση τους για κάποιες συγκεκριμένες εφαρμογές στη πετρελαιοβιομηχανία και το φυσικό αέριο) και είναι συνδεδεμένες στο εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο ή

ενδεχομένως και στο διεθνές ηλεκτρικό δίκτυο. Προσοχή θα πρέπει να δοθεί ώστε η παροχή ενέργειας στο δίκτυο πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρείται η σταθερότητα του δικτύου.

- Η πρόσβαση σε μία υπεράκτια τοποθεσία είναι δυσκολότερη σε αντίξοες καιρικές συνθήκες, οι οποίες μπορεί να αναβάλλουν μια προγραμματισμένη ή μη συντήρηση. Επομένως, υπάρχει απαίτηση για υψηλότερη αξιοπιστία (Reliability), διαθεσιμότητα (Availability), συντηρησιμότητα (Maintainability), ανθεκτικότητα (serviceability), προκειμένου να μειωθεί το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να καταστεί ο υπεράκτιος ανεμοκινητήρας ανταγωνιστικός.
- Οι ανεμογεννήτριες θα πρέπει να εγκατασταθούν γρήγορα λόγω περιορισμών (χρόνος, κόστος) που επιβάλλει το υπεράκτιο περιβάλλον.
- Το περιβάλλον στο οποίο λειτουργεί ο υπεράκτιος ανεμοκινητήρας είναι διαβρωτικό. Σοβαρές βλάβες μπορεί να προκληθούν από το αλμυρό νερό και το διαβρωτικό αέρα. Η εξωτερική προστασία από τη διάβρωση των διάφορων χαλύβδινων τμημάτων γίνεται με ένα σύστημα βαφής που ικανοποιεί τα απαιτούμενα κριτήρια για τις υπεράκτιες πλατφόρμες. Η προστασία από τη διάβρωση των εσωτερικών συνιστωσών απαιτεί βελτιωμένα συστήματα βαψίματος και διατήρηση ξηρού περιβάλλοντος στο εσωτερικό της μηχανής.
- Μεγαλύτερο μέγεθος ανεμογεννήτριας σημαίνει μεγαλύτερη αξιοποίηση ολικού δυναμικού. Αυτό καθιστά και το κόστος της υπεράκτιας ανεμογεννήτριας πιο ανταγωνιστικό. Η αύξηση όμως του μεγέθους, αυξάνει και τα προβλήματα μεταφοράς και εγκατάστασης. Άρα παρουσιάζονται πρόσθετες σχεδιαστικές απαιτήσεις.

Όλα αυτά τα ζητήματα αποτελούν νέες προκλήσεις στο τομέα της υπεράκτιας ολικής βιομηχανίας και απαιτούν νέες ιδέες και λύσεις. (6) (12) (4) (2)

## 3.2 Ανεμοκινητήρας και υπεράκτιο περιβάλλον

### 3.2.1 Marinisation

Όταν τοποθετούμε μία ανεμογεννήτρια στη θάλασσα λαμβάνονται διάφορα μέτρα για τη προστασία της από το «επιθετικό» θαλάσσιο περιβάλλον. Η διαδικασία αυτή στην αγγλική ορολογία ονομάζεται *marinisation*. Παραδείγματος χάριν, κάποια από αυτά τα μέτρα είναι η πρόσθετη προστασία των εξωτερικών επιφανειών της με την επίστρωση υλικού κατά της διάβρωσης ή άλλο τρόπο, τη στεγανοποίηση αεροστεγώς των εδράνων, τη χρήση συστημάτων ψύξης για να αποφευχθεί η επαφή των εσωτερικών συνιστωσών (π.χ. γεννήτρια, κιβώτιο ταχυτήτων κλπ) με το αλμυρό νερό ή αέρα, και εναλλακτικά τη χρήση ενός αεροστεγούς θαλάμου των ηλεκτρομηχανικών συνιστωσών, εγκατεστημένο πολύ υψηλότερα από το επίπεδο της θάλασσας. (7)

### 3.2.2 Τοποθεσία αιολικού πάρκου, μέγεθος και χωροθέτηση ανεμογεννητριών.

Η δυνατότητα ανάπτυξης μεγάλης κλίμακας αιολικών πάρκων είναι μεγαλύτερη στην ανοιχτή θάλασσα απ ότι στη στεριά. Η χωρική έκταση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου είναι μεγαλύτερη από αυτήν ενός ισοδύναμου χερσαίου λόγω του διαθέσιμου ελεύθερου χώρου γνωρίζοντας ότι με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των μηχανών μειώνονται οι αεροδυναμικές επιπτώσεις από τη δημιουργία του ομόρρους των ανεμοκινητήρων. Προφανώς βέβαια, αυξάνει και το απαιτούμενο μήκος καλωδίων για την εσωτερική διασύνδεσή τους. Επομένως στη χωροταξική διάταξη του πάρκου θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη απ τη μία μεριά οι ηλεκτρικές απώλειες κατά τη μεταφορά (μεγάλο μήκος καλωδίων) και απ την άλλη οι αεροδυναμικές απώλειες από τους ομόρρους (μικρή απόσταση μεταξύ των μηχανών). Επίσης η απόσταση απ την ακτή και το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύς καθορίζει το τρόπο διασύνδεσης, συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύμα. (7)

### 3.2.3 Προσβασιμότητα στη περιοχή

Εκτός από το μέγεθος του υπεράκτιου αιολικού πάρκου, τη δυσκολότερη και δαπανηρότερη εγκατάσταση του, μία ακόμα σημαντική διαφορά από τα χερσαία πάρκα είναι η δυνατότητα πρόσβασης. Είναι πολύ πιθανό η πρόσβαση στο πάρκο να μην είναι εφικτή είτε με σκάφος είτε με ελικόπτερο, για διαστήματα ενός ή και δύο μηνών λόγω των αντίξοων καιρικών συνθηκών (άνεμος, κύματα).

Αλλά ακόμα και όταν ο καιρός επιτρέπει τη πρόσβαση το κόστος της υπεράκτιας συντήρησης είναι πολύ μεγάλο. Οι διαδικασίες ανύψωσής είναι ιδιαίτερα



δύσκολες σε ένα τέτοιο περιβάλλον και απαιτούνται ειδικές τεχνικές και φυσικά πολλά έξτρα έξοδα.

Κατά το παρελθόν, οι κατασκευαστές σχεδίαζαν ανεμογεννήτριες κυρίως για χρήση τους επί της ξηράς. Και αν και η τεχνολογία σήμερα τους έχει καταστήσει πολύ αξιόπιστους (διαθεσιμότητα 98%), η περιορισμένη πρόσβαση μαζί με τη περιορισμένη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού συντήρησης στα υπεράκτια έργα, μπορεί εύκολα να οδηγήσει σε μη αποδεκτά χρονικά επίπεδα διαθεσιμότητας. Αυτό καθιστά αναπόφευκτη την εκτίμηση των απαιτήσεων της λειτουργίας και της συντήρησης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου σε συνδυασμό με όλες τις άλλες σχεδιαστικές παραμέτρους! (7) (6) (2)

### 3.2.4 Σχεδιασμός και προγραμματισμός

Πρώτα απ' όλα θα πρέπει να βρεθεί η κατάλληλη τοποθεσία. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δίνεται στους εξής παράγοντες:

Είναι σημαντική η μετεωρολογία όσον αφορά τα χαρακτηριστικά του ανέμου, που βοηθούν τους φορείς ανάπτυξης στην επιλογή των ανεμογεννητριών. Η μετεωρολογία είναι σημαντική και όσον αφορά τα επίπεδα υγρασίας. Η υγρασία στα ανοιχτά της θάλασσας μπορεί να περιέχει πολύ αλάτι, το οποίο μπορεί να προκαλέσει διάβρωση.

Θα πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά η φύση και το βάθος του θαλάσσιου βυθού, καθώς αυτά μπορούν να επηρεάσουν την επιλογή του συστήματος έδρασης.

Πρέπει επίσης να εξετάζεται η απόσταση από την ξηρά ή άλλο σταθμό εξυπηρέτησης, για ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής και συντήρησης. Η απόσταση αυτή επηρεάζει το κόστος υποδομών σε σχέση με τη μεταφορά της παραγόμενης ισχύος καθώς και την απαιτούμενη για τη σύνδεση με το δίκτυο τάση και συχνότητα.

Εξετάζονται οι επιπτώσεις στο περιβάλλον και το οικοσύστημα. Πρέπει να διερευνώνται οι επιπτώσεις στα θαλάσσια θηλαστικά, τα ψάρια, τα αποδημητικά πτηνά καθώς και οι διάδρομοι πτήσης τους.

Στην περίπτωση ενός αιολικού πάρκου απαιτείται η ύπαρξη συστήματος εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (SCADA). Το σύστημα αυτό διασύνδει όλες τις συνιστώσες (π.χ. μετεωρολογικούς σταθμούς και υποσταθμούς της ανεμογεννήτριας) του αιολικού πάρκου με έναν κεντρικό Η/Υ που παρέχει τη δυνατότητα στο χειριστή να παρακολουθεί και ελέγχει τη λειτουργία του αιολικού πάρκου. (4) (6) (13)

### 3.2.5 Βασικά κριτήρια σχεδίασης

#### Ταχύτητες ανέμου

Ο φορέας ανάπτυξης του αιολικού πάρκου πρέπει πρώτα να εντοπίσει αρκετές τοποθεσίες με τις πλέον κατάλληλες μέσες ταχύτητες ανέμου. Μολονότι οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες απαιτούν μία ταχύτητα ανέμου 4-5 m/s για την εκκίνησή τους, συνιστάται να γίνεται η εγκατάσταση των ανεμογεννητριών σε τόπους όπου η μέση ταχύτητα του ανέμου είναι 7 m/s ή μεγαλύτερη, ώστε να μπορούν οι ανεμογεννήτριες να λειτουργούν και να παράγουν ηλεκτρισμό για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους καθ' όλο τον κύκλο ζωής τους. Αυτό κρίνεται αναγκαίο για τη μείωση του συνολικού κόστους ανά κιλοβατώρα (kWh).

#### Κλίμακα Τεχνολογίας

Το μέγεθος των σύγχρονων ανεμογεννητριών κυμαίνεται από τις μικρές μηχανές που αποδίδουν ισχύ λίγων εκατοντάδων βατ έως τις πολύ μεγάλες μηχανές ονομαστικής ισχύος πέντε μεγαβάτ ή περισσότερο. Για να συμφέρει οικονομικά ένα υπεράκτιο έργο, σε γενικές γραμμές πρέπει να χρησιμοποιούνται μεγάλες ανεμογεννήτριες ισχύος πολλών μεγαβάτ. Οι ανεμογεννήτριες μπορούν να εγκαθίστανται ως μεμονωμένες διατάξεις ή ως συστοιχίες/πάρκα απαρτιζόμενα από πολλές μηχανές για τη μεγιστοποίηση της αναχαιτιζόμενης επιφάνειας του ανέμου.

#### Απόσταση Ανεμογεννητριών

Η απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών δεν θα πρέπει να παρεκκλίνει από τις προδιαγραφές του κατασκευαστή λόγω των πιθανών απωλειών οπισθορεύματος, αφού η κατάλληλη απόσταση εξαρτάται κατά πολύ από τη φύση του ανάγλυφου του πεδίου και τον ρόδακα του ανέμου στη θέση ενδιαφέροντος. Η απόσταση μεταξύ των ανεμογεννητριών μπορεί να διαφέρει για την επίτευξη βέλτιστης απόδοσης του αιολικού πάρκου. (14) (4)

## 3.3 Τύποι τεχνολογίας

Οι ανεμογεννήτριες κατασκευάζονται για την απόσπαση της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Αυτό επιτυγχάνεται με το πέρασμα του ανέμου μέσα από τα πτερύγια του ρότορα που αναγκάζονται να περιστραφούν και έτσι δίνουν κίνηση σε μια άτρακτο.

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε δύο βασικούς τύπους: οριζόντιου άξονα και κατακόρυφου άξονα.

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα αποτελούν τη συνηθέστερη μορφή των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιούνται σήμερα. Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα είναι ο μόνος τύπος ανεμογεννήτριας που εγκαθίσταται σε υπεράκτιες τοποθεσίες, κυρίως λόγω της μεγαλύτερης αποδοτικότητάς τους. Οι ανεμογεννήτριες μπορεί να βρίσκονται κοντά στην ακτή ή σε βαθύτερα, υπεράκτια ύδατα. Οι εγκαταστάσεις έχουν περιοριστεί σε σχετικά αβαθή ύδατα, ωστόσο με την απόκτηση μεγαλύτερης εμπειρίας και τις πρόσφατες εξελίξεις, οι εγκαταστάσεις των βαθύτερων υδάτων αποτελούν μια δυνητικά υποσχόμενη ευκαιρία. Οι εγκαταστάσεις αυτές θα κάνουν χρήση των ισχυρότερων ανέμων που επικρατούν στα ανοιχτά της θάλασσας και θα παράσχουν την ευκαιρία ανάπτυξης περισσότερων περιοχών, ελαχιστοποιώντας το αισθητικό αποτέλεσμα από τη στεριά.

### 3.3.1 Αρχές λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας των ανεμογεννητριών είναι απλή. Ο άνεμος περιστρέφει τον ρότορα (δρομέα) που, με τη σειρά του, περιστρέφει τον κύριο άξονα ο οποίος είναι συνδεδεμένος στην πλήμνη του ρότορα. Μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων, η κίνηση του άξονα του ρότορα μεταδίδεται στη γεννήτρια η οποία παράγει ηλεκτρισμό.

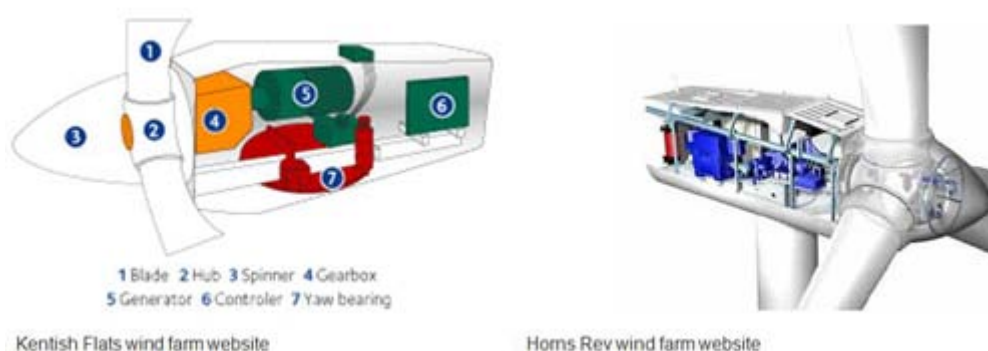
Κατά το παρελθόν υπήρξαν σχεδιάσεις ανεμογεννητριών τόσο κατακόρυφου όσο και οριζόντιου άξονα. Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα εγκαταλείφθηκαν στα μέσα της δεκαετίας του 1990 λόγω της αεροδυναμικής τους ανεπάρκειας, καθότι το εύρος της γωνίας προσβολής μεταξύ του ανέμου και των πτερυγίων του ρότορα είναι πολύ μεγάλο.

Οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα μπορούν να διακριθούν σε αρκετές κατηγορίες, αφού μπορούν να εφαρμοστούν πολλές και διαφορετικές αρχές σχετικά με τη λειτουργία τους. Υπάρχουν ανεμογεννήτριες τύπου κατάντι με τα πτερύγια αντίκρυ στον άνεμο, ενώ στην αντίθετη περίπτωση έχουμε το τύπο ανάντι, όπου ο άνεμος ρέει από το πίσω μέρος της ανεμογεννήτριας προς τους δρομείς, .

Οι ανεμογεννήτριες μπορούν επίσης να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με τον τρόπο ρύθμισης της ισχύος τους σε υψηλές ταχύτητες του ανέμου. Μια τέτοια κατηγορία είναι οι ανεμογεννήτριες ρύθμισης μέσω αποκόλλησης της ροής (stall-regulated). Αυτές έχουν σταθερή γωνία βήματος των πτερυγίων του ρότορα και, με την αύξηση της ταχύτητας του ανέμου, τα πτερύγια σταδιακά παθαίνουν απώλεια στήριξης και έτσι ρυθμίζεται η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει τις ανεμογεννήτριες μεταβλητού βήματος στις οποίες, αντί της χρήσης μιας σταθερής γωνίας δρομέα, μεταβάλλεται η γωνία προκειμένου να ρυθμιστεί η ισχύς της ανεμογεννήτριας. (12) (4) (13)

### 3.3.2 Κύριες συνιστώσες

Σε σχέση με τα χερσαία έργα αιολικής ενέργειας, η κατασκευή υπεράκτιων ανεμογεννητριών απαιτεί σημαντική εφαρμοσμένη μηχανική όσον αφορά την υποδομή, τοποθέτηση, ηλεκτρική σύνδεση και την χρήση υλικών που αντέχουν στο διαβρωτικό θαλάσσιο περιβάλλον. Μολονότι η ταχύτητα των υπεράκτιων ανέμων είναι γενικά μεγαλύτερη αυτής των ανέμων της στεριάς, οι προαναφερθέντες παράγοντες δεν επέτρεψαν την υπεράκτια χρήση των ανεμογεννητριών κατά το παρελθόν. Πάντως, είναι πιο εφικτή η χρήση ανεμογεννητριών μεγάλης κλίμακας υπεράκτια. Στο σχήμα 3-2 φαίνονται οι κύριες συνιστώσες της ανεμογεννήτριας. (4) (15)



Εικόνα 3-2. Κύριες συνιστώσες ανεμογεννήτριας

Κατά το παρελθόν, οι κατασκευαστές σχεδίαζαν ανεμογεννήτριες κυρίως για χρήση τους επί της ξηράς. Σήμερα οι περισσότεροι κατασκευαστές σχεδιάζουν ανεμογεννήτριες καθαρά για χρήση τους σε υπεράκτια αιολικά πάρκα.

Οι κατασκευαστές τώρα αναπτύσσουν γεννήτριες άμεσης οδήγησης (direct drive), πράγμα που καταργεί το κιβώτιο ταχυτήτων από την άτρακτο. Με τον τρόπο αυτό, λόγω της απουσίας κιβωτίου ταχυτήτων, βελτιώνεται η αποδοτικότητα των ανεμογεννητριών καθώς και η αξιοπιστία τους. Εξάλλου έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται αναστροφείς ή άλλα μέσα μετασχηματισμού της ισχύος για να παρέχεται η δυνατότητα λειτουργίας των στροβίλων σε μεταβλητές ταχύτητες για την αύξηση του χρόνου λειτουργίας.

Αντικείμενο συστηματικής έρευνας αποτελούν οι δυνατότητες βελτίωσης στις κατασκευές έδρασης προκειμένου να καταστεί δυνατή η χρήση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών σε βαθύτερα ύδατα και σε δύσκολες συνθήκες βυθού. Η πλωτή στήριξη είναι η σημαντικότερη κατασκευή έδρασης που ερευνάται. (4) (16) (6)

## 4. Θεμελίωση και εγκατάσταση

### 4.1 Κατασκευή υποστήριξης

Με τον όρο *κατασκευή υποστήριξης* εννοούμε τον πύργο και την έδραση μαζί που στηρίζουν την άτρακτο και τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας. Ο πύργος ανυψώνει το ρότορα στον άνεμο και μεταφέρει επίσης όλα τα φορτία στην έδραση. Η έδραση είναι αυτή που στηρίζει με τη σειρά της τον πύργο, την άτρακτο και τα πτερύγια και αντιστέκεται στη φόρτιση από τον άνεμο και τα κύματα. Η έδραση είναι η κύρια διαφορά μεταξύ των υπεράκτιων και των χερσαίων σχεδίων ανεμογεννητριών. Η εκτίμηση των φορτίων του ανέμου και του κύματος είναι το πρώτο βήμα για το σχεδιασμό των εδράσεων. Για λόγους ασφάλειας φυσικά τα φορτία είναι υπολογισμένα για τις πιο αντίξοες συνθήκες που μπορεί να συμβούν μία φορά στα 50 χρόνια. (6)

Ενώ οι χερσαίες ανεμογεννήτριες απαιτούν μεγάλες κατασκευές έδρασης από σκυρόδεμα, οι υπεράκτιες ανεμογεννήτριες απαιτούν διαφορετικούς τύπους κατασκευών έδρασης αναλόγως του βάθους και του υλικού του θαλάσσιου βυθού. Οι πιθανές δυνατότητες έδρασης για μία υπεράκτια ανεμογεννήτρια είναι ο μονός πυλώνας (monopile), το τρίποδο (tripod), η έδραση που βασίζεται στη βαρύτητα από σκυρόδεμα (gravity based), και η πλωτή κατασκευή. Παρακάτω παρουσιάζεται η κάθε έδραση ξεχωριστά. (14)

Επιλογές Θεμελίωσης	Βάθος νερού (m)
<b>Θεμελίωση βαρύτητας</b>	0-10
<b>Μονός πυλώνας</b>	0-30
<b>Τρίποδο</b>	>20
<b>Πλωτή</b>	>50

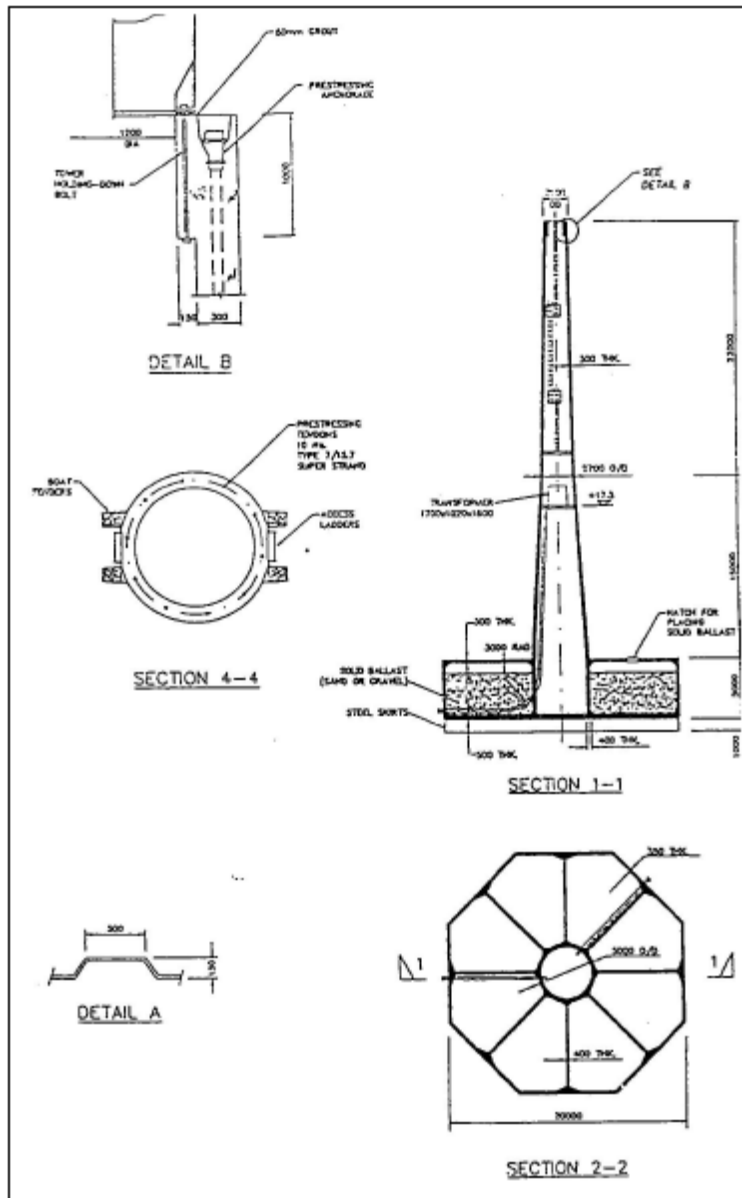
Πίνακας 4-1. Δυνατότητες θεμελίωσης.

#### 4.1.1 Θεμελίωση βαρύτητας από σκυρόδεμα

Ο τρόπος αυτός θεμελίωσης αποτελείται από μια μεγάλη επίπεδη βάση από σκυρόδεμα η οποία μπορεί να αντιστέκεται στα φορτία που επιβάλλονται από τον άνεμο και τα κύματα. Το αποτέλεσμα της σταθερότητας της οφείλεται στο ίδιο της το βάρος. Επίσης υπάρχει ένα κωνικό κομμάτι στο επίπεδο της επιφάνειας της θάλασσας ώστε στη περίπτωση σχηματισμού πάγου να το θρυμματίζει και να τον οδηγεί προς τα κάτω μειώνοντας έτσι την επιπλέον φόρτιση.

Η κατασκευή αυτής της δομής γίνεται στη ξηρά, σε ειδικές λιμενικές εγκαταστάσεις, συνήθως σε χερσαίες δεξαμενές. Όταν είναι έτοιμη η κατασκευή, η δεξαμενή πλημμυρίζει και η τσιμεντένια βάση σύρεται στη περιοχή που θα

τοποθετηθεί επωφελούμενη της δικής της πλευστότητας (ή με πρόσθετη αν απαιτείται). Ο πύργος μπορεί να είναι είτε από χάλυβα είτε από ενισχυμένο σκυρόδεμα, η επιλογή εξαρτάται από οικονομικούς λόγους. Ο πύργος και ο ανεμοκινητήρας μπορούν να συναρμολογηθούν στη διάρκεια που η βάση βρίσκεται στη δεξαμενή, και η πλήρης ανεμογεννήτρια να εγκατασταθεί ενιαία. Μπορεί όμως να συναρμολογηθούν και υπεράκτια μετά τη τοποθέτηση της βάσης.

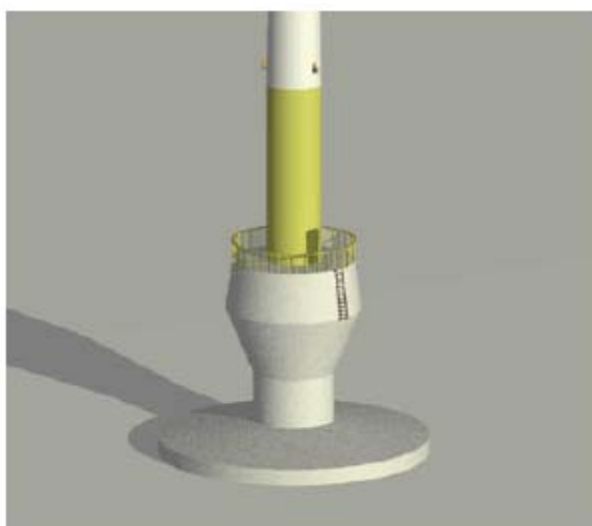


Σχήμα 4-1. Όψεις της θεμελίωσης με βάση από σκυρόδεμα.

Μια πρόσθετη ενίσχυση απαιτείται προκειμένου να σταθεροποιηθεί καλύτερα η βάση στο πυθμένα της θάλασσας ώστε για να παρέχει την απαραίτητη αντίσταση στην ανατροπή. Η ενίσχυση αυτή συνήθως είναι από άμμο και τοποθετείται στη

βάση όταν ο ανεμοκινητήρας είναι στη τελική του θέση, αλλά σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να χρειαστεί ένα πιο συμπαγές υλικό (χαλίκι τσιμέντου).

Οι βάσεις αυτές έχουν χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο αριθμό πλατφόρμων πετρελαίου και η τεχνολογία τους είναι εύκολα διαθέσιμη. Σχεδιαστικές μελέτες στη Μεγάλη Βρετανία έχουν παρουσιάσει το μοντέλο αυτό με το χαμηλότερο σχεδιαστικό κόστος για έναν υπεράκτιο ανεμοκινητήρα αν και αυτό το συμπέρασμα δεν υποστηρίζεται εξ ολοκλήρου από τα αποτελέσματα πιο πρόσφατων μελετών, τα οποία δείχνουν ότι οι λύσεις χάλυβα μπορούν να έχουν χαμηλότερο κόστος. Αυτή η διαφορετική άποψη μπορεί καλώς να προέκυψε απ το συνδυασμό του μεγέθους της ανεμογεννήτριας και των θαλάσσιων συνθηκών στη περιοχή, που αποτελούν και τη βάση κάθε σχεδιαστικής λύσης. Στη πρώτη περίπτωση θεωρούμε μεγέθη ανεμογεννητριών πολύ μεγάλα (3 έως 6 MW) και βάθη νερού πάνω από 15 μέτρα ενώ στις πιο πρόσφατες μελέτες επικεντρωθήκαμε σε μηχανές μέχρι 1,5 MW. Στο σχήμα που ακόλουθη φαίνεται μια τέτοια δομή θεμελίωσης. (14) (16) (14)

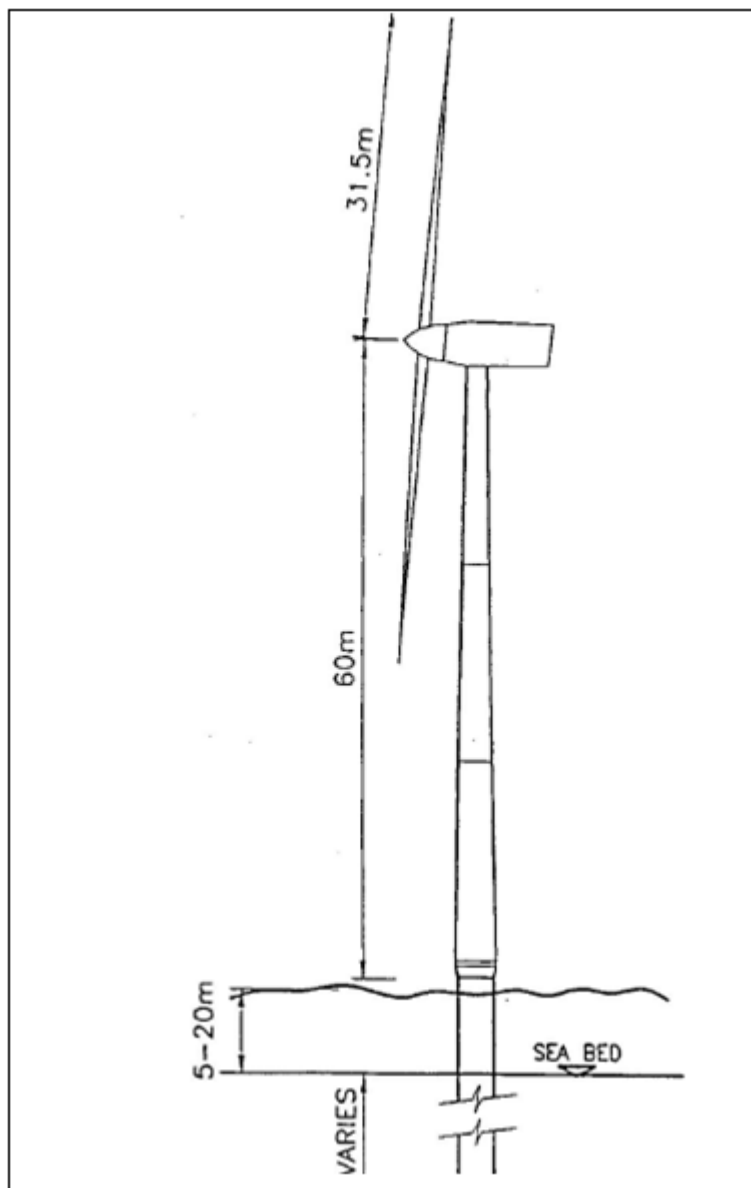


Σχήμα 4-2. Προοπτικό σχέδιο θεμελίωσης βαρύτητας από σκυρόδεμα.

#### 4.1.2 Μονός πυλώνας

Αποτελείται από ένα χαλύβδινο πυλώνα που βυθίζεται στο έδαφος. Ουσιαστικά ανοίγεται μια υποδοχή στο πυθμένα με ειδικό γεωτρύπανο (sea core), εγκατασταίνεται ο πυλώνας και το κενό γεμίζεται με σκυρόδεμα. Η άτρακτος του κινητήρα και ο δρομέας εγκαθίστανται μετά, με τη βοήθεια πλωτού γερανού. Αυτή η δομή έχει χρησιμοποιηθεί σε πρόσφατα έργα υπεράκτιων αιολικών πάρκων και αποτελεί τη βάση σε πολλά προκαταρκτικά σχέδια που έχουν αναλάβει ήδη υπεύθυνοι για την μελλοντική υπεράκτια ανάπτυξη. Η λύση αυτή μπορεί να είναι λιγότερο οικονομική για μηχανές μεγάλου μεγέθους και για μεγάλα βάθη εντούτοις, για ανεμογεννήτριες μέχρι 2 MW και για βάθη από 10-20 μέτρα μια τέτοια

προσέγγιση είναι πολύ εφικτή. Ωστόσο, εάν αυτή η λύση επιλεγεί για ένα μεγάλο αριθμό έργων μεσαίου έως μεγάλου μεγέθους μπορεί να καθιερωθεί βιομηχανικά τυποποιημένη και στη συνέχεια να ακολουθήσει η απαραίτητη ανάπτυξη της τεχνολογίας για αιολικά πάρκα πολύ μεγαλύτερου μεγέθους.

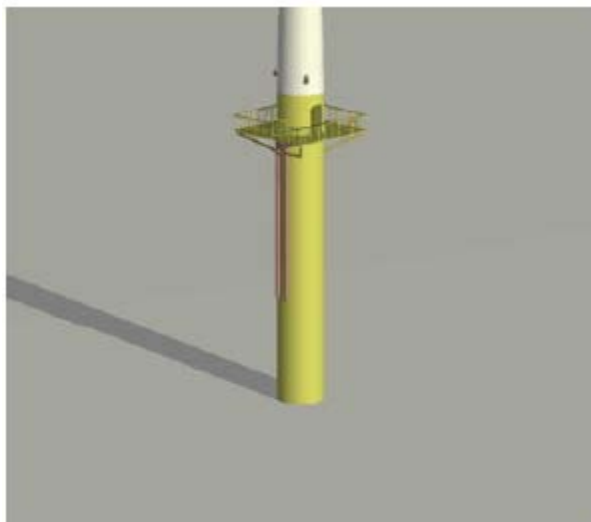


Σχήμα 4-3. Θεμελίωση μονού πύλωνα.

Ο πύργος είναι εξοπλισμένος με ένα ενδιάμεσο κομμάτι μεταξύ αυτού και της έδρασης, για να αφομοιώνει τις ανοχές από την κλίση του πύλωνα και να μειώσει το χρόνο συναρμολόγησης του πύργου στο υπεράκτιο περιβάλλον (σχήμα 4-4). Ο χαλύβδινος σωλήνας μεταφέρει με τη βοήθεια της κάθετης και παράπλευρης γήινης πίεσης όλα τα φορτία στο έδαφος.



Η αναμφίβολη όμως φύση του υλικού του εδάφους και τα αυλάκια (scour) που δημιουργούνται δια ροής της άμμου γύρω από το πυλώνα στο πυθμένα της θάλασσας, μπορεί να οδηγήσουν σε μια κατασκευή με αρκετά διαφορετική απόκριση από τη σχεδιασμένη της. Για τους λόγους αυτούς ο σχεδιασμός μιας τέτοιας έδρασης παραμένει ακόμα μία πρόκληση. (14) (6)



Σχήμα 4-4. Προοπτικό σχέδιο μονού πυλώνα.

#### 4.1.3 Τρίποδο

Αποτελείται από ένα κεντρικό χαλύβδινο άξονα και τρεις κυλινδρικούς χαλύβδινους σωλήνες που καταλήγουν σε χαλύβδινους πυλώνες βυθισμένους στο πυθμένα. Το κεντρικό μέρος διανέμει τα φορτία στους κυλινδρικούς σωλήνες που λειτουργούν σαν το ενδιάμεσο κομμάτι για το πύργο.

Το χαλύβδινο τρίποδο χρησιμοποιείται περισσότερο για μεσαίου μεγέθους υπεράκτιες κατασκευές. Όλα τα μέρη κατασκευάζονται σε ένα υπάρχον ναυπηγείο και μεταφέρονται ύστερα στην περιοχή με μια φορηγίδα μαζί με τον στρόβιλο. Το χαμηλότερο μέρος του τριπόδου τοποθετείται στο βυθό με τη βοήθεια ενός πλωτού γερανού και οι στύλοι οδηγούνται μέσω των ποδιών του τριπόδου μέσα στο βυθό (σχήμα 4-6). Για τους περιορισμούς στο μέγεθος των επιμέρους συνιστωσών οφείλεται κυρίως η σταθερότητα της δομής και μετά οι στύλους που μπαίνουν μέσα στο έδαφος και η ικανότητα του γερανού. Το τελευταίο είναι μια οικονομική εκτίμηση καθώς οι πλωτοί γερανοί έχουν κάνει ανυψώσεις μέχρι και 100 τόνων. Το ελάχιστο μέγεθος συνιστώσας ζυγίζει μεταξύ 80-100 τόνους για πρακτικούς λόγους. Οι δομές τριπόδου παρουσιάζουν περισσότερα προβλήματα πρόσβασης από της βάσεις σκυροδέματος που οφείλονται εν μέρη στη δυσκολία πλεύσης κοντά στα πόδια του τριπόδου ιδιαίτερα στις περιοχές που παρουσιάζουν μεγάλο εύρος παλίρροιας.

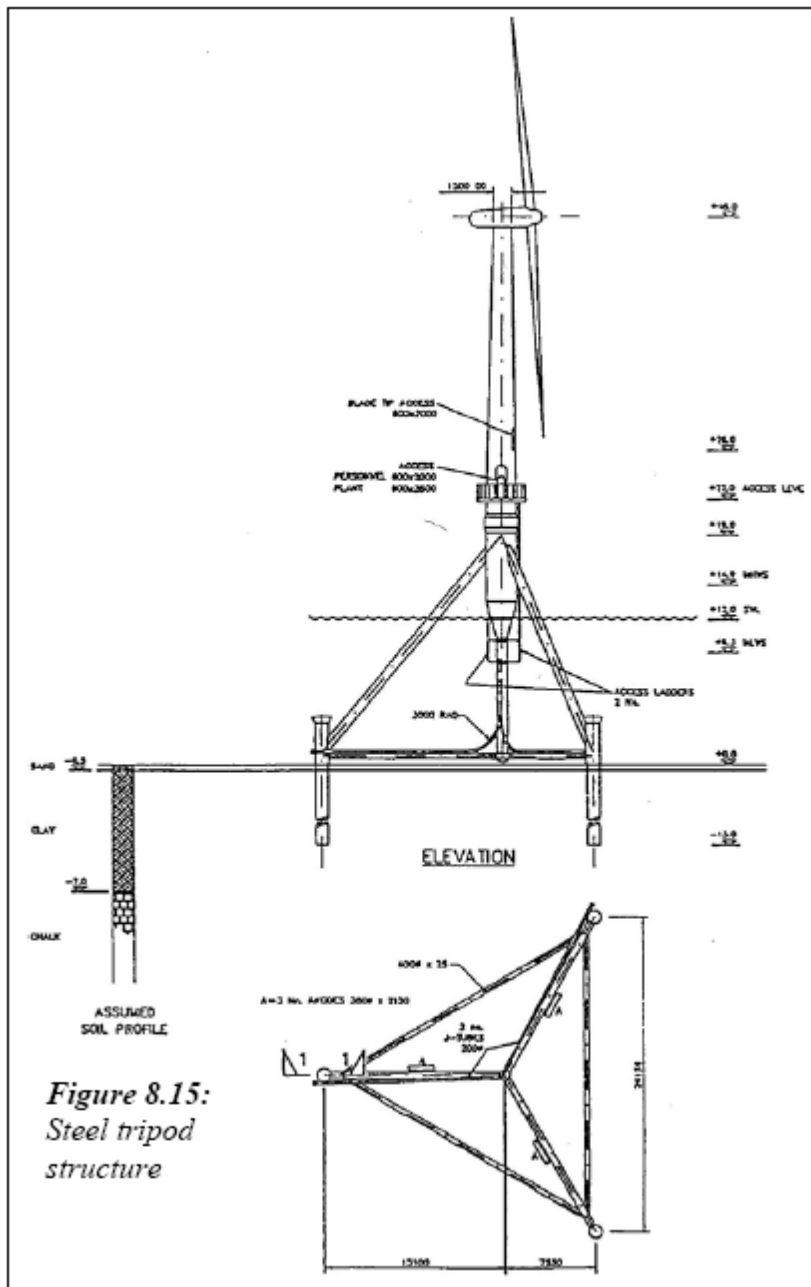
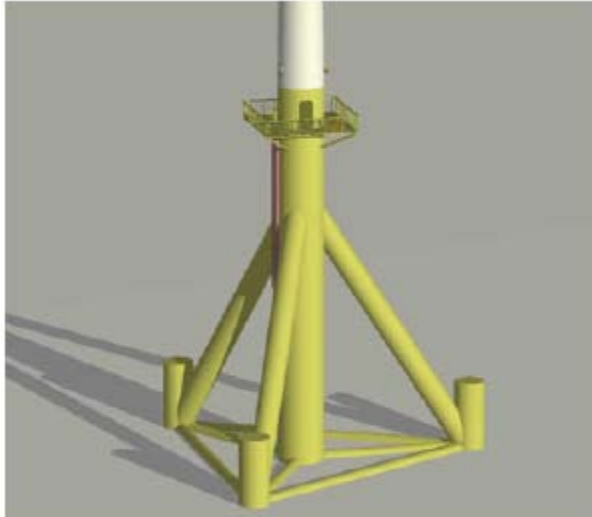


Figure 8.15:  
Steel tripod  
structure

Σχήμα 4-5. Όψεις θεμελίωσης τύπου τριπόδου.

Το πλεονέκτημα αυτής της έδρασης είναι η πρόσθετη ακαμψία και σταθερότητα που δίνουν οι τρεις χαλύβδινοι σωλήνες, αυξάνοντας την ικανότητα της κατασκευής να ανθίσταται στις ροπές ανατροπής. Επίσης απαιτεί λιγότερη προστασία σε σχέση με την έδραση μονού πυλώνα ενάντια στα αυλάκια που σχηματίζονται με το καιρό από τη κίνηση του αμμόδους πυθμένα (scour). (12) (6) (17)



Σχήμα 4-6. Προοπτικό σχέδιο θεμελίωσης τύπου τριπόδου.

#### 4.1.4 Πλωτή έδραση

Η πλωτή έδραση είναι περισσότερο γνωστή στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου σε βάθη νερού μέχρι 200m, αν και πρόσφατα διάφορες εταιρείες έχουν εγκαινιάσει τις πρώτες πλωτές ανεμογεννήτριες μεγάλης κλίμακας. Αποτελείται από μία επιπλέονσα πλατφόρμα και το σταθερό σύστημα που δένεται μαζί της. Η πλατφόρμα έχει το ενδύαμεο κομμάτι για την εγκατάσταση του πύργου πάνω σ αυτήν. Η διαμόρφωση της μπορεί να είναι απλή ή πολλαπλών επιπλέον ανεμοκινητήρων όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-7. Το σύστημα που δένεται με τη πλατφόρμα τη σταθεροποιεί.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της λύσης σε σχέση με τις εμπεπηγμένες είναι τα εξής:

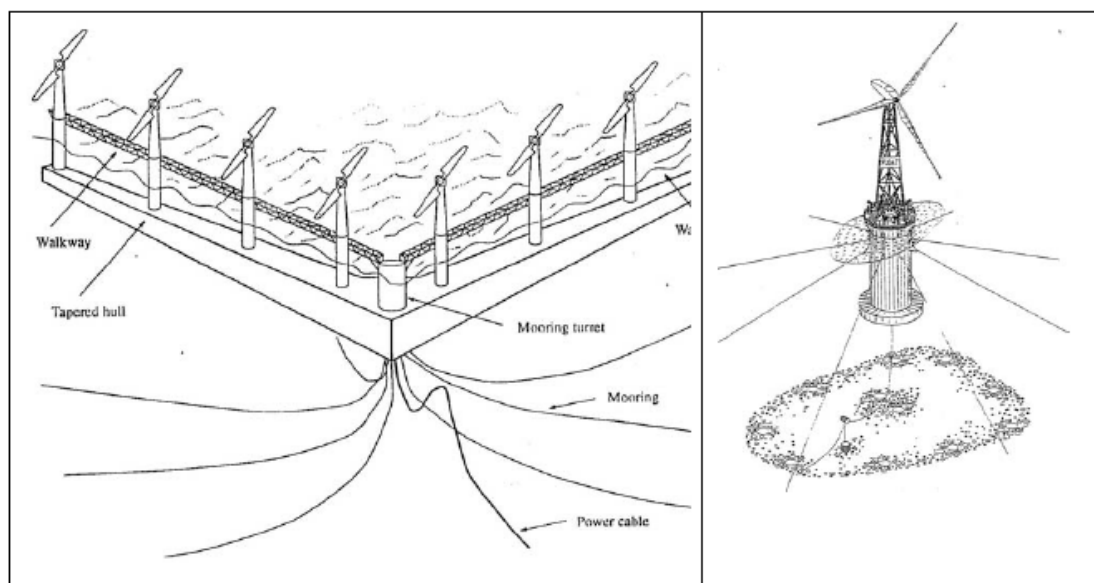
- μειώνει σημαντικά το συνολικό βάρος της κατασκευής άρα και το κόστος π.χ. Οι σταθερές κατασκευές (στο θαλάσσιο χώρο) των 5 MW ζυγίζουν 2.100 τόνους ενώ το αντίστοιχο πλωτό μοντέλο αναμένεται να έχει βάρος λιγότερο από 800 τόνους.
- μπορεί να συναρμολογείται επί ξηράς και να ρυμουλκείται μακριά από την ακτή σε αποστάσεις 10 ναυτικών μιλίων ή παραπάνω και να τοποθετείται σε βάθη άνω των 50 μέτρων
- επιτρέπει τοποθέτηση μακριά τόσο μακριά από τις ακτές ώστε να επωφελείται ισχυρότερων και πιο σταθερών ανέμων (ώστε να μειώνεται το κόστος ανά κιλοβατώρα), να ξεπερνάει τις συχνές αντιδράσεις των οικολογικών οργανώσεων σε χωροθέτηση επί ξηράς και να έχει τη δυνατότητα να φέρει επί του πλωτήρα τις ολοένα μεγεθυνόμενες ανεμογεννήτριες. Συχνά δε μπορεί να τοποθετηθεί κοντά στα κέντρα υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης.

- είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον γιατί μπορεί να απομακρυνθεί και να

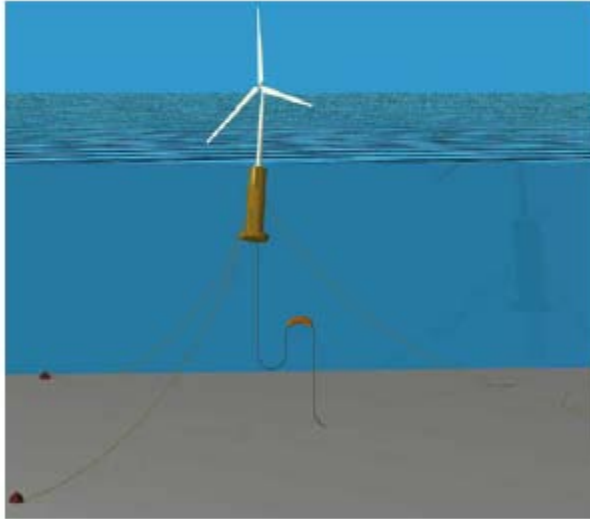
αποσυναρμολογηθεί χωρίς να αφήσει κανένα κατάλοιπο στην περιοχή χωροθέτησης της

Επίσης δέχεται μικρότερα φορτία από την επίδραση των κυμάτων απ ότι μια άκαμπτη πακτωμένη έδραση. Παρόλα αυτά κανένα από αυτά τα πιθανά πλεονεκτήματα για τη πλωτή κατασκευή δεν έχει καταδειχθεί σαφώς μέχρι σήμερα, αν και η αλήθεια είναι ότι, γενικά, για αυτού του τύπου δομές έχουν γίνει οι λιγότερες μελέτες σε σχέση με τις άλλες συμβατικότερες επιλογές. Στο Σχήμα 4-7 βλέπουμε σχέδια για πολλαπλούς ανεμοκινητήρες που τοποθετούνται σε μία ενιαία πλωτή εξέδρα. Επίσης παρουσιάζεται η ιδέα της Technomare και της Garrad Hassan πάνω στις ενιαίες πλωτές μονάδες. Το συγκεκριμένο αυτό σχέδιο είναι βασισμένο στη χρήση ενός στροβίλου 1.4MW και διαμέτρου 60m τοποθετημένο σε τσιμεντένιο εκτόπισμα 3500 τόνων.

Η ιδέα αυτή προτείνεται για βάθη νερού μεταξύ 75 και 500m. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα όλων των πλωτών σχεδίων είναι το εκτενές σύστημα αγκυροβολίου που απαιτείται και που θα είναι δαπανηρό τόσο στην εγκατάσταση όσο και στη συντήρηση καθώς επίσης θα αποκλείει και την αλιεία και τη ναυσιπλοΐα από τις περισσότερες περιοχές του αιολικού πάρκου. (6) (16) (18) (7)



Σχήμα 4-7. Πλωτή εξέδρα με πολλαπλές ανεμογεννήτριες.



*Σχήμα 4-8. Μία ιδέα πλωτής ανεμογεννήτριας*

## 4.2 Έργα υποδομής

Το πρώτο στάδιο που αφορά στην εγκατάσταση των ανεμογεννητριών είναι τα έργα υποδομής και η προετοιμασία της τοποθεσίας. Αυτό περιλαμβάνει όλα τα απαραίτητα έργα και ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιηθούν έτσι ώστε να εξοικονομηθεί όσο το δυνατόν περισσότερος χρόνος και να βελτιστοποιηθούν οι διαδικασίες των επόμενων σταδίων. (2)

### 4.2.1 Υποδομές για τη σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο

Μια παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη πριν ξεκινήσει η διαδικασία της εγκατάστασης των ανεμογεννητριών είναι η κατασκευή υποδομών για τη μετέπειτα σύνδεση τους με το ηλεκτρικό δίκτυο. Έτσι, πρέπει να γίνουν κατασκευές, όπως δημιουργία υπεράκτιων υποσταθμών μετασχηματισμού τάσης, καθώς και σταθμών μετασχηματισμού και στη στεριά. Επίσης, πρέπει να πραγματοποιηθούν έργα όπως διάνοιξη καναλιών στο πυθμένα της θάλασσας και στη στεριά για την υποδοχή των καλωδίων μεταφοράς ρεύματος. (2) (9)

### 4.2.2 Λιμενικές υποδομές - Χώροι αποθήκευσης και εφοδιασμού ανεμογεννητριών και υπόλοιπου εξοπλισμού

Ένας τομέας που πρέπει οι υπεύθυνοι του έργου να επιστήσουν τη προσοχή τους είναι η δημιουργία κατάλληλων λιμενικών υποδομών κοντά στα υπεράκτια αιολικά πάρκα για τις διάφορες διεργασίες που γίνονται στη ξηρά, όπως η κατασκευή των βάσεων, καθώς και κατάλληλου χώρου φύλαξης και αποθήκευσης των επιμέρους εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών και του λοιπού εξοπλισμού. Αυτή η τοποθεσία μπορεί να είναι είτε κάποιες από τις αποθήκες που περιλαμβάνονται στις υποδομές του λιμένα είτε κάποια από τις προβλήτες. Έτσι με αυτόν το τρόπο συνδυάζεται η διευκόλυνση της εκφόρτωσης και φόρτωσης τους από και προς τα σκάφη μεταφοράς καθώς και η ασφαλής αποθήκευση και ταξινόμηση των εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών. Τέλος εφόσον τα κομμάτια των ανεμογεννητριών βρίσκονται όλα συγκεντρωμένα σε έναν χώρο τότε αντίστοιχα απλοποιείται η διαδικασία συναρμολόγησης τους και μεταφοράς στην συγκεκριμένη υπεράκτια τοποθεσία εγκατάστασης. (13) (2)

### 4.3 Κατασκευή

Ο χρόνος κατασκευής ενός υπεράκτιου πάρκου είναι μεγαλύτερος από αυτόν ενός αντίστοιχου χερσαίου λόγω των πιο δυσχερέστερων συνθηκών. Η κατασκευή των περισσοτέρων συστατικών τμημάτων γίνεται στην ξηρά. Η άτρακτος συνήθως συναρμολογείται εξ ολοκλήρου πριν τη μεταφορά της στο σημείο εγκατάστασης. Όλα τα άλλα συστατικά τμήματα μεταφέρονται με ειδικά σκάφη και στη συνέχεια συναρμολογούνται επιτόπου, μετά την ασφαλή κατασκευή και εγκατάσταση των εδράσεων. Τα ηλεκτρικά καλώδια πρέπει να βρίσκονται ήδη στη θέση εγκατάστασης για να μπορέσει να ξεκινήσει η συναρμολόγηση της ανεμογεννήτριας.

Η μονταρισμένη άτρακτος, ο πύργος, η πλήμνη και τα πτερύγια του ρότορα μεταφέρονται στο σημείο εγκατάστασης και αρχίζει η συναρμολόγηση κατά τον ίδιο τρόπο όπως και στα χερσαία αιολικά πάρκα. Ο πύργος ανυψώνεται και στερεώνεται στις δομές έδρασης (ο πύργος μπορεί να αποτελείται από 2 ή περισσότερα τεμάχια). Μετά ακολουθεί η άτρακτος και τα πτερύγια.

Η οικοδόμηση ενός υπεράκτιου πάρκου και ο έλεγχος λειτουργίας του έχει πολλά και διάφορα στάδια.



Εικόνα 4-1. Πρόσβαση με ειδικό σκάφος.



Εικόνα 4-2. Το σύστημα bird collision..

#### 4.4 Διαδικασία μεταφοράς

Περισσότερες δυσκολίες προκύπτουν κατά τη μεταφορά των συστατικών τμημάτων των ανεμογεννητριών στο σημείο εγκατάστασης. Η συνεχής τεχνολογική εξέλιξη έχει επιφέρει αύξηση στο μέγεθος και στο βάρος των εξαρτημάτων της ανεμογεννήτριας. Με τις βάσεις έδρασης έτοιμες να στηρίξουν τον πύργο και τις άλλες συνιστώσες, απαιτείται ειδικός εξοπλισμός μεταφοράς αποτελούμενος από ειδικά διαμορφωμένα σκάφη (σχήμα 4-3), ακόμα και φορηγίδες, για να καταστεί δυνατή η μεταφορά των συστατικών τμημάτων. Πιο εξειδικευμένος εξοπλισμός απαιτείται και για να ολοκληρωθεί η τελική συναρμολόγηση στο υπεράκτιο περιβάλλον. Στον εξοπλισμό αυτό περιλαμβάνονται γερανοί και άλλα ανυψωτικά μηχανήματα. (6) (2)



Εικόνα 4-3. Ειδικό σκάφος μεταφοράς.



## 4.5 Συναρμολόγηση και κατάσταση

### 4.5.1 Παράδειγμα εγκατάστασης

Ένα παράδειγμα τυπικού υπεράκτιου αιολικού πάρκου είναι το αιολικό πάρκο Horns Rev, στην δυτική ακτή της Δανίας. Σ' αυτό το έργο κατασκευής αιολικού πάρκου επελέγη η έδραση μονού πυλώνα.

Η πρώτη φάση κατασκευής της έδρασης απαιτούσε την προετοιμασία του θαλάσσιου βυθού. Για ελαχιστοποίηση της διάβρωσης, τοποθετήθηκε ένα στρώμα από σκύρα για τη θεμελίωση. Κατόπιν, τοποθετήθηκε ο μονός πυλώνας στην απαιτούμενη θέση και στερεώθηκε μέσω του στρώματος στον πυθμένα. Η βύθιση του μονού πυλώνα στον πυθμένα της θάλασσας είναι περίπου 25 μέτρα. Χρησιμοποιήθηκαν ειδικά σχεδιασμένες φορτηγίδες, εξοπλισμένες με ενισχυμένο καταδυτικό έμβολο. Τα τεμάχια μεταβατικής ζεύξης ποντίστηκαν μαζί με τους μονούς πυλώνες, αναδεικνύοντας τις διατάξεις αποβίβασης του πλοίου και την καθοδική προστασία. Οι αγωγοί καλωδίων για τα υποβρύχια καλώδια σφραγίστηκαν με σκυρόδεμα και το στρώμα των σκύρων καλύφθηκε με χαλίκια και πέτρες. Για την ανέγερση των ανεμογεννητριών χρησιμοποιήθηκαν ειδικές ανυψωτικές εξέδρες με βυθιζόμενα υποστηρίγματα, εφοδιασμένες με ανυψωτικό εξοπλισμό για την ανύψωση όλων των τμημάτων των ανεμογεννητριών και την απευθείας συναρμογή τους. (4)



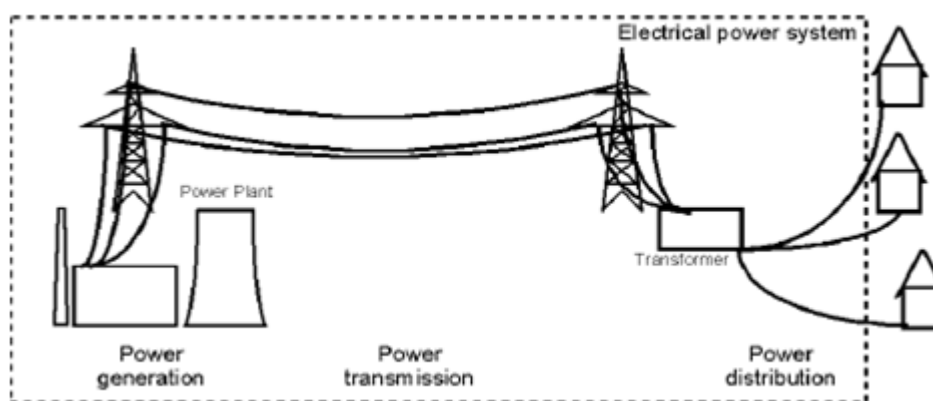
Εικόνα 4-4. Εγκατάσταση με ειδικό σκάφος – γερανοφόρο.

## 5. Διασύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο

### 5.1 γενικά

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι γνωστό ότι αποτελεί την προσηφορότερη για χρήση μορφή ενέργειας. Για το λόγο αυτό πρωταρχική επιδίωξη για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας αποτέλεσε απ' αρχής η μετατροπή της σε ηλεκτρική.

Η παραγόμενη από τον άνεμο ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιείται σε 'αυτόνομα συστήματα'. Τότε όμως προκύπτει θέμα είτε αποθηκεύσεως, που δεν ενδείκνυται οικονομικά για μεγάλες ισχύεις, είτε συνεργασίας με άλλες συμβατικές πηγές ώστε να υπάρχει η δυνατότητα συνεχούς καλύψεως των αναγκών. Συνηθέστερα όμως η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια διοχετεύεται στο 'Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας' (ΣΗΕ), δεδομένου ότι στις ανεπτυγμένες τουλάχιστον χώρες, τα ΣΗΕ καλύπτουν με τα δίκτυά τους το σύνολο σχεδόν της επιφάνειάς τους. Η δομή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζεται στο σχήμα 5-1.. (6)



Σχήμα 5-1. Δομή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

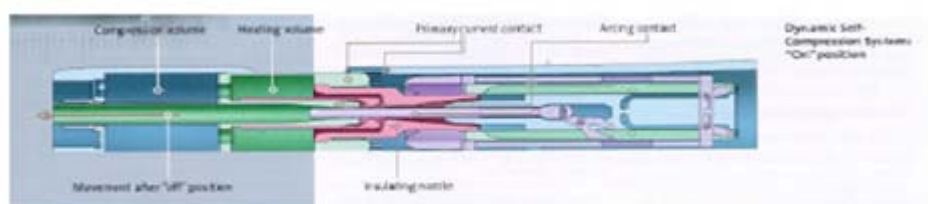
Όμως η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί την παραγωγή της υπό σταθερή (εντός ορισμένων ορίων) τάση και συχνότητα, ενώ ο άνεμος παρουσιάζει συνεχή αστάθεια. Επίσης, όταν οι μετατροπείς αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική (Ανεμογεννήτριες) λειτουργούν παράλληλα με τα ΣΗΕ, συνδεδεμένες συνήθως στο Δίκτυο Διανομής αυτών, δεν πρέπει να δημιουργούν ανεπίτρεπτες διαταραχές στην τάση (ή και τη συχνότητά τους). Για σταθερή λειτουργία του δικτύου η παραγόμενη ισχύς πρέπει οποιαδήποτε στιγμή να εξισορροπείται με το φορτίο του δικτύου το οποίο μεταβάλλεται συνεχώς. Οι βασικές λειτουργίες του ηλεκτρικού συστήματος αφορούν κυρίως τον έλεγχο της ισχύος, τον έλεγχο της τάσης και την προστασία. Η

μέθοδος του ελέγχου της τάσης, δηλαδή η συνεχής προσαρμογή της παραγόμενης ισχύος με το φορτίο του δικτύου είναι η θεμελιώδης αρχή της λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος. Η σταθεροποίηση της τάσης μπορεί να επιτυγχάνει με την αντιστάθμιση της μειωμένης τάσης κατά μήκος των γραμμών μετάδοσης, με τη προσαρμογή της τάσης στη πηγή και με την εισαγωγή της άεργου ισχύος.

### Μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ισχύος

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος γίνεται σε υψηλές τάσεις (110kV-1.1MV) έτσι έχουμε λιγότερες απώλειες στις μεγάλες αποστάσεις, ενώ η διανομή της ηλεκτρικής ισχύος (σχήμα 5-2) γίνεται σε χαμηλές τάσεις (190V – 50kV) και λόγω των μικρότερων αποστάσεων πάλι καταφέρνουμε να έχουμε λιγότερες απώλειες.

Η κύρια λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ισχύος είναι η διανομή του απαιτούμενου ποσού ηλεκτρικής ισχύος διατηρώντας παράλληλα τις αποκλίσεις της συχνότητας του συστήματος και της τάσης στους κόμβους μέσα στο απαραίτητο περιθώριο από τις ονομαστικές τους τιμές (καμπύλη φορτίου).



Σχήμα 5-2 Δομή του μηχανισμού διανομής (switch gear)

### Προστασία και έλεγχος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

- Έλεγχος της συχνότητας του δικτύου
- Έλεγχος της τάσης του δικτύου
- Ενεργός και άεργος ισχύς
- Προστασία ηλ.συστήματος ενέργειας

### Έλεγχος της τάσης δικτύου

Θέλουμε η τιμή της τάσης στους κόμβους να είναι κοντά στην ονομαστική της τιμή ώστε:

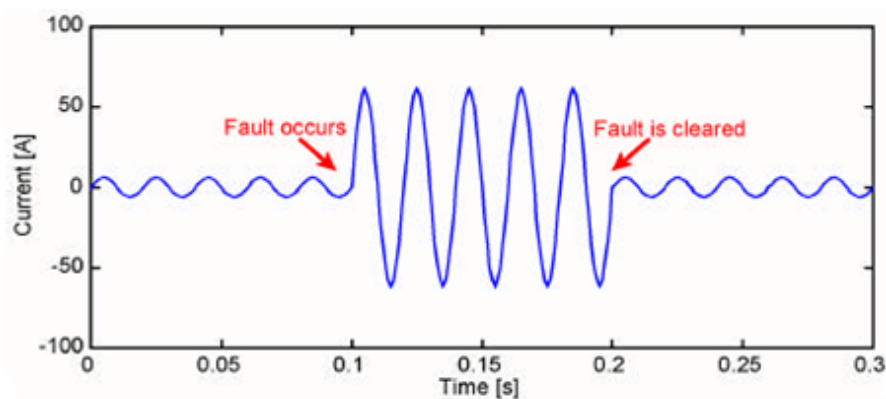
- Να εξασφαλιστεί σωστή λειτουργία διανομής στους πελάτες
- Αποτροπή οποιασδήποτε καταστροφής του εξοπλισμού της εταιρείας του δικτύου ή των πελατών

### Διαφορές τάσης και συχνότητας

- Η συχνότητα είναι 'σφαιρικό' μέγεθος
- Η τάση είναι 'τοπικό' μέγεθος
- Τα προβλήματα συχνότητας μπορούν να λυθούν οπουδήποτε μέσα στο σύστημα(εάν η ικανότητα μεταφοράς είναι δυνατή)
- Τα προβλήματα τάσης πρέπει να λυθούν στη περιοχή του κόμβου που εμφανίζεται το πρόβλημα

### Προστασία του ηλεκτρικού συστήματος ισχύος

- Η προστασία των ηλεκτρικών συστημάτων προστατεύει τον εξοπλισμό από τη ζημία που προκαλούν εσφαλμένες εντάσεις ρευμάτων.
- Η ένταση του ρεύματος ελέγχεται συνεχώς
- Εάν ανιχνευτεί μεγάλη ένταση σε κάποιο στοιχείο, τότε το στοιχείο αποσυνδέεται αυτομάτως από το μηχανισμό διανομής.
- Ο μηχανισμός διανομής πρέπει να είναι σε θέση να διακόπτει την εσφαλμένη ένταση ρεύματος (σχήμα 5-3). (6) (16) (13)



Σχήμα 5-3 Παράδειγμα εσφαλμένου ρεύματος

Επομένως, είναι γενικά αναγκαίο, οι ανεμογεννήτριες να επιτυγχάνουν την παραγωγή σταθερής (εντός ορίων) τάσεως και συχνότητας, παρά τη μεταβλητότητα της ταχύτητας του ανέμου, δηλαδή της διατιθέμενης προς μετατροπή ισχύος.

Η σταθερότητα της συχνότητας στις μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές πηγές, επιτυγχάνεται με τον έλεγχο των στροφών της κινητήριας

μηχανής, μέσω του ελέγχου της παροχής καυσίμου, με κατάλληλους 'ρυθμιστές στροφών'. Στις ανεμογεννήτριες αντίθετα, επιθυμητό είναι οι στροφές να προσαρμόζονται έτσι ώστε να είναι δυνατή η κατά το δυνατόν μεγαλύτερη μετατροπή από τη διατιθέμενη ενέργεια του ανέμου και ταυτόχρονα να εξασφαλίζεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υπό σχετικά σταθερή συχνότητα και τάση. (6) (16)

Η τάση λειτουργίας της γεννήτριας είναι γενικά χαμηλή (συνήθως κάτω από 1kV, σπανίως 3kV, και συχνά 690kV). Αυτό το επίπεδο της τάσης δεν είναι αρκετά υψηλό για την αλληλοσύνδεση με τις υπόλοιπες ανεμογεννήτριες αλλά ούτε και με το δίκτυο στο οποίο πρόκειται να συνδεθεί. Είναι απαραίτητο λοιπόν κάθε ανεμογεννήτρια να έχει ένα μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης, για να ανεβάσει τη τάση σε μεσαίο επίπεδο (MV – 10 έως 35 kV). Επιπλέον, κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη διακόπτη για την αποσύνδεση της ανεμογεννήτριας σε περίπτωση βραχυκυκλώματος για την αποφυγή της λεγόμενης νησιδοποίησης, κατάσταση κατά την οποία ένα μικρό τμήμα του δικτύου λειτουργεί με τοπική ισορροπία μεταξύ παραγωγής και φορτίου, αλλά χωρίς σύνδεση στο κύριο σύστημα. Η κατάσταση αυτή λειτουργίας είναι ανεπιθύμητη καθώς προκύπτουν τάσεις και συχνότητες έξω από τα επιτρεπτά όρια καθώς και κίνδυνος για το τεχνικό προσωπικό που αναλαμβάνει την επισκευή του σφάλματος στη νησιδοποιημένη περιοχή. Τις περισσότερες φορές οι ανεμογεννήτριες είναι αλληλοσυνδεδεμένες με υπόγεια καλώδια.

Οι απαιτήσεις σχεδιασμού για το ηλεκτρικό σύστημα του αιολικού πάρκου καθορίζονται στη συμφωνία διασύνδεσης, είναι σαν ένας «κώδικας διασύνδεσης» ή κάτι παρόμοιο. Το ηλεκτρικό σύστημα θα πρέπει να:

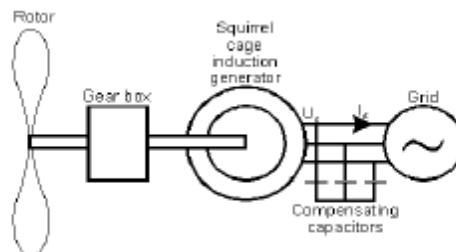
- ✓ Καλύπτει τις τοπικές ηλεκτρικές απαιτήσεις ασφάλειας και θα είναι ικανό να λειτουργεί με ασφάλεια
- ✓ Επιτυγχάνει τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ του κόστους κεφαλαίου και του κόστους λειτουργίας (ηλεκτρικές απώλειες) και αξιοπιστία
- ✓ Εξασφαλίζει ότι το αιολικό πάρκο ικανοποιεί όλες τις τεχνικές απαιτήσεις από το διαχειριστή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας
- ✓ Εξασφαλίζει ότι οι ηλεκτρικές απαιτήσεις των ανεμογεννητριών καλύπτονται. (2)

Στα μεγάλα αιολικά πάρκα ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός περιλαμβάνει τα τρία βασικά υποσυστήματα: τους ανεμοκινητήρες, την εσωτερική δομή στο αιολικό πάρκο και τη σύνδεση στο δίκτυο. Επιπλέον, επειδή τα μεγάλης κλίμακας αιολικά πάρκα παράγουν μεγαλύτερες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας, συνδέονται σε υψηλότερα επίπεδα τάσης απ' ότι οι μεμονωμένες ανεμογεννήτριες. Επειδή όμως τα δίκτυα Υ.Τ είναι λιγότερο πυκνά από τα δίκτυα Χ.Τ, συχνά πρέπει να καλυφθεί μεγάλη απόσταση μέχρι το σημείο σύνδεσης στο δίκτυο. (1)

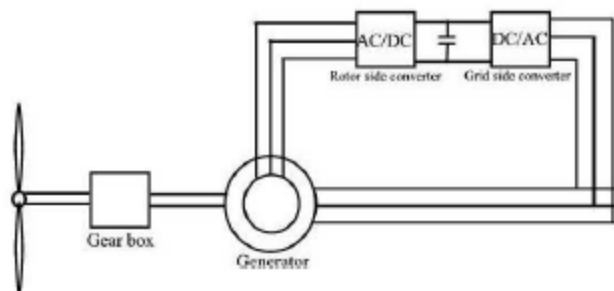
## 5.2 Ηλεκτρικά συστήματα μετατροπής ανεμογεννητριών

Τα βασικά ηλεκτρικά συστήματα μετατροπής των ανεμογεννητριών είναι:

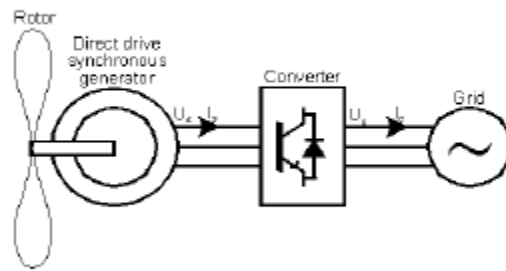
1. Σύστημα επαγωγικής γεννήτριας (κλωβού) και κιβώτιου ταχυτήτων άμεσα συνδεδεμένα με το δίκτυο.



2. Σύστημα επαγωγικής γεννήτριας διπλής τροφοδοτήσεως (doubly fed) και κιβώτιου ταχυτήτων, όπου ο στάτορας συνδέεται άμεσα με το δίκτυο ενώ ο ρότορας συνδέεται μέσω ενός μετατροπέα.



3. Σύστημα σύγχρονης γεννήτριας, χωρίς κιβώτιο ταχυτήτων (direct drive) που είναι συνδεδεμένη με το δίκτυο μέσω ενός ηλεκτρονικού μετατροπέα ισχύος.



Οι κατασκευαστές σήμερα παράγουν γεννήτριες άμεσης οδήγησης (direct drive), πράγμα που καταργεί το κιβώτιο ταχυτήτων από την άτρακτο. Με τον τρόπο αυτό, λόγω της απουσίας κιβωτίου ταχυτήτων, βελτιώνεται η αποδοτικότητα των ανεμογεννητριών καθώς και η αξιοπιστία τους. Εξάλλου έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούνται αναστροφείς ή άλλα μέσα μετασχηματισμού της ισχύος για να παρέχεται η δυνατότητα λειτουργίας των ανεμοκινητήρων σε μεταβλητές ταχύτητες, απόσπασης περισσότερης αιολικής ισχύος και αύξησης του χρόνου λειτουργίας. (1) (12)

### 5.3 Επιλογές ηλεκτρικής διασύνδεσης

Εξετάζονται διάφορες ηλεκτρικές δυνατές επιλογές για παράκτια και υπεράκτια αιολικά πάρκα και του τρόπου που αυτά συνδέονται με το δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο. Για τα απομακρυσμένα υπεράκτια αιολικά πάρκα (>60-100Km) η μεταφορά εναλλασσομένου ρεύματος δεν είναι πλέον εφικτή λόγω της χωρητικότητας του καλωδίου. Οι διάφορες επιλογές για τη διασύνδεση τέτοιων πάρκων, συμπεριλαμβάνουν χρήση συνεχούς ρεύματος (dc) και τη διανεμημένη αντιστάθμιση. Με βάση τις ιδιότητες των ηλεκτρικών συστημάτων μετατροπής ενέργειας εξετάζονται οι επιδράσεις στα δημόσια ηλεκτρικά δίκτυα. Αυτές περιλαμβάνουν: την άνοδο της τάσης, την αρμονικότητα, την αύξηση των λάθους ρευμάτων, την υπερφόρτωση του μηχανισμού και των καλωδίων, την απομόνωση (νησιδοποίηση), τον προγραμματισμό των συστημάτων ισχύος κ.. Για τα διάφορα συστήματα αυτές οι πτυχές παρουσιάζονται με κάποιες λεπτομέρειες. Έπειτα εξετάζονται οι διάφορες μέθοδοι που μπορούν να συμβάλλουν για τη καλύτερη ενσωμάτωση της αιολικής ισχύος στο δημόσιο ηλεκτρικό δίκτυο. Οι μέθοδοι αυτοί περιλαμβάνουν: έλεγχο της τάσης, περιορισμός της ισχύος βραχυκυκλώματος, πρόβλεψη ισχύος, συστήματα DC. (6)

Σαν αποτέλεσμα, σε περίπτωση μεγάλων Α/Π, μια σύνδεση DC (συνεχούς ρεύματος) για τη σύνδεση του πάρκου στο δίκτυο μπορεί να είναι πιο συμφέρουσα. Οι απώλειες στις συμβατικές AC (εναλλασσομένου ρεύματος) συνδέσεις, και κατά συνέπεια το λειτουργικό κόστος, αυξάνονται πιο πολύ με το μήκος απ' ότι στην

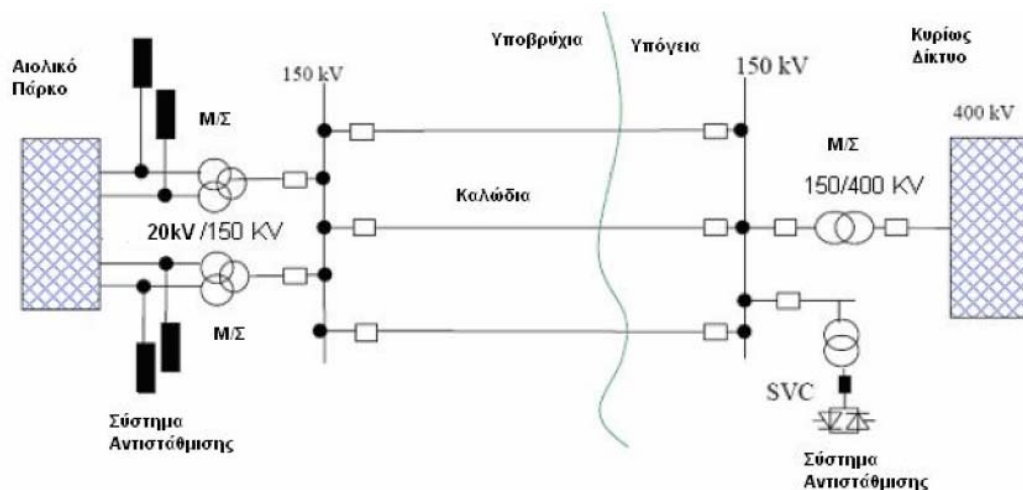
περίπτωση των DC συνδέσεων. Πάνω από ένα όριο απόστασης, η χρήση σύνδεσης συνεχούς ρεύματος παρά την αρχικά μεγαλύτερη επένδυση είναι προτιμητέα λόγω του χαμηλού λειτουργικού κόστους. Το τελευταίο οφείλεται στους μετατροπείς ισχύος που χρησιμοποιούνται: τα καλώδια από μόνα τους είναι φθηνότερα σε DC απ' ότι σε AC από τη στιγμή που απαιτούνται δύο αντί για τρία καλώδια και γιατί οι ανάγκες σε μόνωση είναι μικρότερες για την ίδια ονομαστική τάση. Επίσης, το άεργο ρεύμα σε ένα μεγάλο μήκος AC καλώδιο φαίνεται να θέτει τεχνικό όριο στο μήκος των AC συνδέσεων. (18) (10)

### 5.3.1 HVAC – HVDC

#### HVAC

Μια τυπική γραμμή μεταφοράς HVAC (High Voltage Alternative Current) παρουσιάζεται στο σχήμα 5-4 και αποτελείται από:

- Μετασχηματιστές ανύψωσης – υποβιβασμού τάσης στα δύο άκρα της.
- Εναέριους, υπόγειους, υποβρύχιους αγωγούς ή συνδυασμούς αυτών.
- Συστήματα αντιστάθμισης (SVC, Statcoms, Πηνία αντιστάθμισης) και στα δύο άκρα ή και ενδιάμεσα.



Σχήμα 5-4. Τυπικό παράδειγμα HVAC γραμμής από αιολικό πάρκο.

Τα πλεονεκτήματα της HVAC είναι τα εξής:

- ✓ Η παλαιότερη και πιο διαδεδομένη τεχνολογία μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- ✓ Σχετικά απλός εξοπλισμός, ειδικά για εναέριες γραμμές και μικρές αποστάσεις.



- ✓ Αξιόπιστη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας
- ✓ Σχετικά χαμηλό κόστος επένδυσης όταν η γραμμή συνδέεται σε γραμμή μεταφοράς μεγάλης ισχύος (ισχυρό δίκτυο).

Τα μειονεκτήματα της HVAC είναι τα εξής:

Σε περίπτωση μεταφοράς με υπόγεια ή υποβρύχια καλώδια παρουσιάζονται προβλήματα με τη δημιουργία άεργου ισχύος.

Η αύξηση του μήκους του καλωδίου αυξάνει τη χωρητικότητα του και συνεπώς την παραγόμενη από αυτό άεργο ισχύ.

Απαραίτητη η χρήση συστημάτων αντιστάθμισης άεργου ισχύος (Statcoms, SVC, πηνία αντιστάθμισης) στα άκρα της γραμμής αλλά και σε ενδιάμεσα τμήματα εφόσον αυτό είναι δυνατό.

Απαραίτητη κατασκευή πυλώνων για εναέριες γραμμές μεταφοράς – οπτική όχληση, δέσμευση μεγάλων εκτάσεων γης.

Τα AC διασυνδεδεμένα δίκτυα μεταφέρουν τυχόν σφάλματα σε γειτνιάζοντα δίκτυα χωρίς να αναγνωρίζουν σύνορα κρατών.

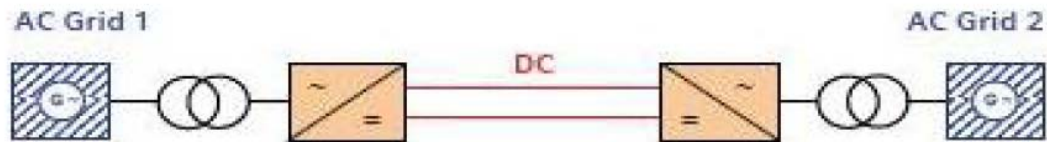
Σε περίπτωση έντονων σφαλμάτων υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης του φαινομένου της νησιδοποίησης (αποκοπή καταναλωτών ή μονάδων παραγωγής για τη διαφύλαξη της ευστάθειας)

Μη έγκαιρη διάγνωση έντονων σφαλμάτων και λήψη μέτρων είναι πιθανό να οδηγήσει σε εμφάνιση φαινομένου domino και γενικό black out.

Τα προβλήματα αυτά γίνονται εντονότερα σε περιπτώσεις κατανεμημένης παραγωγής. Δηλαδή μικρές σε μέγεθος μονάδες, με μη προβλέψιμη και πολλές φορές μη προγραμματιζόμενη παραγωγή, συνδεδεμένες σε όχι και τόσο ισχυρό δίκτυο.

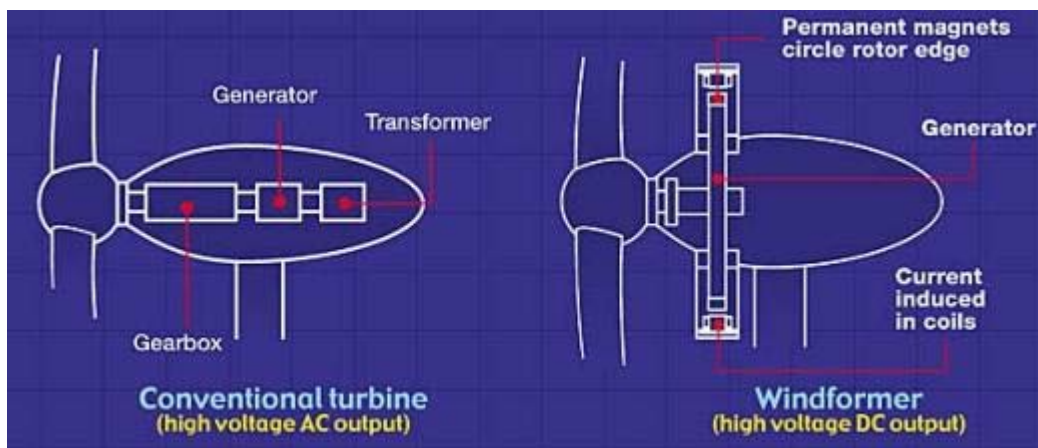
## HVDC

Σε ένα HVDC σύστημα (σχήμα 5-5), η ηλεκτρική ενέργεια λαμβάνεται από ένα τριφασικό AC δίκτυο, μετατρέπεται σε DC με τη βοήθεια ενός σταθμού μετατροπής (converter station), μεταφέρεται με τη βοήθεια των HVDC αγωγών στο σημείο λήψης και τελικά μετατρέπεται πάλι σε AC με τη βοήθεια ενός σταθμού μετατροπής, ο οποίος είναι συνδεδεμένος σε AC δίκτυο.



Σχήμα 5-5. HVDC σύστημα.

Στο σταθμό μετατροπής (converter station) γίνεται η μετατροπή της υψηλής τάσης από AC σε DC και αντίστροφα χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικές εισαγωγίμες βαλβίδες υψηλής τάσης. Οι ημιαγωγίμες αυτές βαλβίδες, (thyristor valves, IGBTs) βοηθούν στην απρόσκοπτη μετατροπή από AC σε DC και αντίστροφα μέσα από ένα σύστημα ελέγχου εγκατεστημένο σε υπολογιστές. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο της μεταφερόμενης ενέργειας και αποτελεί μοναδικό χαρακτηριστικό της τεχνολογίας HVDC (Στην τεχνολογία AC αυτό δεν μπορεί να ελεγχθεί άμεσα διότι εξαρτάται από εξωτερικούς παράγοντες). (12) (13) (7)



Σχήμα 5-6 Παραγωγή υψηλής τάσης AC/DC

Οι αγωγοί HVDC:

Συνήθως λειτουργούν με διπολικό τρόπο, δηλαδή υπάρχει ένας αγωγός με θετική και ένας με αρνητική πολικότητα.

Έχουν πολυμερές μονωτικό υλικό το οποίο είναι ανθεκτικό και εύρωστο. Στο σχήμα 5-7 παρουσιάζονται διάφορα είδη αγωγών HVDC.

Η αντοχή και η ελαστικότητα που έχουν επιτρέπει την εγκατάστασή τους ακόμη και σε θαλάσσιο πυθμένα με μεγάλο βάθος ενώ παράλληλα μειώνεται το κόστος εγκατάστασης.

Δεν περιέχουν λάδια ή άλλα τοξικά στοιχεία, δεν επηρεάζουν τους θαλάσσιους οργανισμούς και δε δημιουργούν ηλεκτρικά πεδία και γενικά δεν έχουν περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Μετά το πέρας του χρόνου ζωής τους μπορούν να αντικατασταθούν και να ανακυκλωθούν.



Σχήμα 5-7. Αγωγοί HVDC.

Τα πλεονεκτήματα της HVDC τεχνολογίας είναι τα ακόλουθα:

- ✓ Τα συστήματα HVDC μπορούν να συνδέουν δίκτυα με ασύγχρονο τρόπο, μεταφέροντας δηλαδή μόνο ενέργεια και όχι σφάλματα.
- ✓ Μικρές απώλειες ισχύος. Ο κάθε σταθμός μετατροπής έχει απώλειες της τάξεως των 0,6% ενώ ο DC αγωγός έχει απώλειες της τάξεως των 0,3-0,4% ανά 100km.
- ✓ Δεν υπάρχει περιορισμός στην απόσταση μεταφοράς καθώς το φαινόμενο της άεργου ισχύος υφίσταται στη συνεχή τάση.
- ✓ Η κατασκευή των συστημάτων παρουσιάζει συγκεντρωτική δομή βελτιώνοντας έτσι τη διαδικασία συντήρησης. (16) (5)

Πίνακας 5-1. Σύγκριση AC και DC τεχνολογίας

Αγωγοί DC	Αγωγοί AC
Δεν έχουν όριο μήκους αγωγού.	Η χωρητικότητα του αγωγού περιορίζει το πρακτικό μήκος του.
Δε χρειάζονται ενδιάμεσοι σταθμοί.	Χρειάζεται αντιστάθμιση της άεργους ισχύος.
Δεν αυξάνουν τη χωρητικότητα του AC δικτύου.	Μεγαλύτερες απώλειες ισχύος.
Τάση DC σημαίνει μικρότερη γήρανση του αγωγού και άρα μεγαλύτερος χρόνος ζωής.	Δυσκολία στη διαχείριση του αγωγού λόγω μεγέθους.
Είναι ελαφρύτεροι από τους AC αγωγούς για την ίδια μεταφορική ικανότητα.	

## 5.4 Προβλήματα σύνδεσης A/Γ στο ΣΗΕ

Αναφορικά με τα τεχνικά προβλήματα που αντιμετωπίζει η διείσδυση αιολικής ενέργειας σε μικρής και μεσαίας κλίμακας Σ.Η.Ε, αυτά μπορούν να ταξινομηθούν ως εξής:

Προβλήματα καλής και ασφαλούς λειτουργίας

Προβλήματα ποιότητας ισχύος

Η επίδραση της διείσδυσης αιολικής ενέργειας στην ανάπτυξη και τη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας οφείλεται στη στοχαστικότητα της ταχύτητας ανέμου και άρα και της παραγωγής ενεργού ισχύος των ανεμογεννητριών. Για το λόγο αυτό οι ανεμογεννήτριες δε συμβάλλουν στη ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου, ούτε πρέπει να υπολογίζονται στη στρεφόμενη εφεδρεία του συστήματος, αντίθετα δημιουργείται η ανάγκη για μεγαλύτερη στρεφόμενη εφεδρεία για την κάλυψη τυχούσας απώλειας παραγωγής των ανεμογεννητριών. Έτσι, μέρος μόνο του συνολικού φορτίου κάθε χρονική στιγμή είναι δυνατόν να καλύπτεται από την παραγωγή των ανεμογεννητριών έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία και η αξιοπιστία του συστήματος. (16)

Δύο σημαντικά ζητήματα σχετικά με την αιολική παραγωγή είναι η μεταβλητότητα και η προβλεψιμότητα. Η μεταβλητότητα της ισχύος εξόδου μιας μόνο Α/Γ είναι μικρή σε κλίμακα χρόνου μερικών λεπτών και για αιολικά πάρκα κατά μήκος μιας μεγάλης περιοχής, είναι μικρή σε κλίμακα χρόνου μερικών ωρών. Πληροφόρηση υψηλού επιπέδου επιτρέπει στους διαχειριστές του συστήματος να καθορίζουν το βαθμό εφεδρείας. Οι τεχνικές πρόβλεψης του ανέμου είναι προς το παρόν σε αρχικό στάδιο ανάπτυξης, και κάθε βελτίωση εδώ μπορεί να βοηθήσει σημαντικά τους διαχειριστές να ελέγχουν την αιολική παραγωγή με τη μείωση και τον καθορισμό με ακρίβεια του σφάλματος πρόβλεψης.

Είναι επίσης πιθανό σε μία μικρή χώρα όπως Ελλάδα να μεταβληθεί σε αρκετά σύντομο χρονικό διάστημα ο άνεμος και έτσι η ισχύς που θα παρείχαν τα αιολικά πάρκα να πρέπει να παραχθεί από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής. Αυτό το ζήτημα είναι κυρίως μετεωρολογικό. Όμως ένα σημαντικό ζήτημα είναι πόσα MW συμβατικών σταθμών παραγωγής ενέργειας μπορεί να αντικαταστήσει 1 MW αιολικής ενέργειας. Δηλαδή αν πούμε ότι θέτουμε σε λειτουργία ακόμα και διασπαρμένα αιολικά πάρκα σε όλη τη χώρα ισχύος 1 GW μπορούμε να «κλείσουμε» κάποιους συμβατικούς σταθμούς και πόσους. Πάντως αν πάρουμε το δυσμενέστερο σενάριο επάρκειας ηλεκτρικής ισχύος το οποίο είναι η θερινή αιχμή οφειλόμενη στα κλιματιστικά μηχανήματα μπορούμε να κάνουμε τον εξής συλλογισμό: η υψηλή θερμοκρασία σε συνδυασμό με την άπνοια είναι αυτή που μας κάνει όλους να θέσουμε σε λειτουργία τα κλιματιστικά. Άρα υπάρχει το πρόβλημα ότι το μέγιστο του συστήματος συμπίπτει με μηδενική αιολική παραγωγή. Συνεπώς οδηγούμαστε στο εξής συμπέρασμα: δεν μπορούμε να «κλείσουμε» κανένα συμβατικό σταθμό παραγωγής όση αιολική «εν δυνάμει» διείσδυση να υπάρχει στην ηλεκτροπαραγωγή. Δηλαδή η μέγιστη εγκατεστημένη ισχύς συμβατικών σταθμών παραγωγής πρέπει να ακολουθεί το μέγιστο φορτίο του συστήματος. Έτσι θα υπάρχουν στο Σύστημα συμβατικές μονάδες τις οποίες θα ονομάζουμε μονάδες αιχμής και θα καλύπτουν την αιχμή του φορτίου ή και περιπτώσεις όπου η αιολική διείσδυση είναι μικρή. Ακόμα όμως και σε πιο μέσες καταστάσεις ζήτησης θα υποχρεώνονται οι συμβατικοί σταθμοί να υπολειτουργούν για λόγους εφεδρείας σε πιθανή περίπτωση απώλειας αιολικής παραγωγής και να περιορίζονται σε ρόλο ρύθμισης. (19)

Έκτος όμως από το πρόβλημα της αβεβαιότητας της αιολικής παραγωγής υπάρχει και το πρόβλημα που θα διοχετευτεί πιθανή περίσσεια ενέργειας. Για αυτό το λόγο χρειάζονται ισχυρές διασυνδέσεις με γειτονικές χώρες έτσι ώστε και να μπορεί να διοχετευτεί η περίσσεια ενέργειας, αλλά και να είναι ικανές να σταθεροποιήσουν το σύστημα σε ξαφνικές διακυμάνσεις της παραγωγής, οι οποίες θα είναι ολοένα και πιο πιθανές όσο η αιολική διείσδυση αυξάνει.

Έχει προταθεί ότι θέματα ευστάθειας του συστήματος μπορούν να προκύψουν αν η αιολική παραγωγή ξεπεράσει κάποιο όριο διείσδυσης. Τέτοιες ανησυχίες πρέπει να λάβουν υπόψη τους τα πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένου της τοπικής ενίσχυσης του δικτύου και της δυνατότητας των Α/Γ μεταβλητών στροφών να συμβάλλουν στην ευστάθεια του συστήματος. Για την εξασφάλιση της ισορροπίας

στο σύστημα έτσι ώστε να μπορεί να δεχθεί τη μεταβαλλόμενη ισχύ εξόδου των Α/Π, είναι διαθέσιμες στους διαχειριστές των συστημάτων μια σειρά από τεχνικές. Σε μια κατάσταση όπου πολύς άνεμος είναι διαθέσιμος, για παράδειγμα, ο διαχειριστής μπορεί να διατηρεί άλλους τύπους σταθμών παραγωγής σε χαμηλά επίπεδα εξόδου. Άλλες λύσεις είναι πιθανόν να γίνουν εξαιρετικά σημαντικές καθώς η διείσδυση της αιολικής παραγωγής επεκτείνεται συνεχώς. Αυτές περιλαμβάνουν πρόβλεψη, διασυνδέσεις και αποθήκευση ηλεκτρισμού. Χρησιμοποιώντας τέτοιες τεχνικές, όπως επίσης και ενίσχυση του ίδιου του δικτύου, και αυξημένη γεωγραφική εξάπλωση της αιολικής ισχύος, είναι δυνατόν να εξασφαλιστεί πολύ υψηλό επίπεδο διείσδυσης στα Ευρωπαϊκά ηλεκτρικά συστήματα χωρίς επίδραση στην ποιότητα της παροχής. (6) (16) (20)

Από την άλλη πλευρά οι Α/Γ συνήθως είναι εξοπλισμένες με ασύγχρονες γεννήτριες οι οποίες ως γνωστόν διεγείρονται από το δίκτυο καταναλώνοντας άεργο ισχύ, και για το λόγο αυτό δεν συμβάλλουν στον έλεγχο των τάσεων του δικτύου. Το πρόβλημα συνήθως αντιμετωπίζεται με συσκευές αντιστάθμισης άεργου ισχύος, αν και τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί συστήματα ελέγχου του συντελεστή ισχύος των Α/Γ με χρήση ηλεκτρονικών ισχύος.

Η καλή και ασφαλής λειτουργία των Σ.Η.Ε με διείσδυση Α/Π αφορά στην επίλυση προβλημάτων μόνιμης κατάστασης λειτουργίας (ικανότητα του δικτύου μεταφοράς να μεταφέρει την παραγόμενη ισχύ, διατήρηση των τάσεων των ζυγών του συστήματος σε κανονικές και έκτακτες καταστάσεις λειτουργίας εντός προκαθορισμένων ορίων κλπ.) και μεταβατικής συμπεριφοράς του συστήματος σε περιπτώσεις σημαντικών διαταραχών.

Η ανάλυση των παραπάνω οδηγεί στη διατύπωση κανόνων λειτουργίας που εξασφαλίζουν την καλή και ασφαλή λειτουργία του συστήματος. Οι κανόνες αυτοί επικεντρώνονται κυρίως στα εξής:

- Στον καθορισμό του τρόπου ένταξης των συμβατικών μονάδων παραγωγής, δηλαδή ποιες μονάδες θα πρέπει να βρίσκονται κάθε στιγμή εντός λειτουργίας προκειμένου να εξασφαλίζεται η ομαλή και ασφαλής λειτουργία του συστήματος.
- Στον καθορισμό της μέγιστης επιτρεπόμενης αιολικής διείσδυσης, στη μέγιστη δηλαδή παραγόμενη ισχύ από τα Α/Π που μπορεί ασφαλώς να απορροφηθεί από το δίκτυο κάθε χρονική στιγμή. (6) (7)

Οι δύο παραπάνω κανόνες οι οποίοι καθορίζουν τον ασφαλή τρόπο ένταξης των Α/Π στα ΣΗΕ καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό το ποσοστό της ενέργειας από Α/Π που

εγγέεται στα δίκτυα και άρα το ανά μονάδα κόστος της παραγόμενης από αυτά ενέργειας.

Τα προβλήματα ποιότητας ισχύος κυρίως αφορούν τις μεταβολές της τάσης που παρατηρούνται τόσο κατά την σύνδεση και αποσύνδεση των Α/Γ στο δίκτυο όσο και από τις διακυμάνσεις στην παραγωγή τους λόγω της μεταβολής της ταχύτητας του ανέμου, καθώς και προβλήματα ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Τα προβλήματα αυτά γίνονται εμφανή στους καταναλωτές που τροφοδοτούνται από σημεία του δικτύου που είναι ηλεκτρικά "κοντά" με τα σημεία σύνδεσης των Α/Π. Τα προβλήματα αυτά λαμβάνονται υπόψη κατά την διαδικασία επιλογής του τρόπου σύνδεσης των Α/Π στο δίκτυο και καθορίζουν τελικά τον αντίστοιχο εξοπλισμό και το κόστος σύνδεσης.

Από τα παραπάνω γίνεται εμφανής η επίδραση που έχουν οι διάφοροι τεχνικοί περιορισμοί που καθορίζουν τη διείσδυση των Α/Π στα Σ.Η.Ε, στην οικονομική βιωσιμότητα των επενδύσεων σε αιολική ενέργεια, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την από κοινού αντιμετώπιση των δύο αυτών προβλημάτων. (3)

## 5.5 Χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών δικτύων

Το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να χωριστεί σύμφωνα με το επίπεδο τάσης στο:

- ✓ Δίκτυο χαμηλής τάσης (ονομαστική τάση κάτω του 1 kV)
- ✓ Δίκτυο μέσης τάσης (ονομαστική τάση 1 kV έως 60 kV)
- ✓ Δίκτυο υψηλής τάσης (ονομαστική τάση πάνω από 60 kV)

Μικροί καταναλωτές, όπως οικίες, συνδέονται με το δίκτυο χαμηλής τάσης. Μεγάλοι καταναλωτές, όπως βιομηχανίες, συνδέονται με το δίκτυο μέσης τάσης. Συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ενέργειας συνδέονται με το δίκτυο υψηλής τάσης.

Η σύνδεση Α/Γ με το δίκτυο διανομής μπορεί να γίνει:

- Στο δίκτυο χαμηλής τάσης για μικρές και μεσαίες Α/Γ
- Στο δίκτυο μέσης τάσης για μεσαίες ή μεγάλες Α/Γ ή μικρά και μεσαία Α/Π
- Στο δίκτυο υψηλής τάσης για μεγάλα Α/Π

Η ικανότητα μεταφοράς ισχύος συνήθως μειώνεται όσο μειώνεται η πυκνότητα του πληθυσμού. Οι περιοχές όπου βρίσκονται συνήθως οι Α/Γ είναι περιοχές με μειωμένη πληθυσμιακή πυκνότητα και επομένως μικρή ικανότητα μεταφοράς ισχύος.

Η ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί είναι:

- 2- 5 MW κατευθείαν στο δίκτυο μέσης τάσης
- 10 - 40 MW σε ένα υποσταθμό μετασχηματισμού μέσης τάσης / υψηλής τάσης
- >100 MW στο δίκτυο υψηλής τάσης (6)

Τα ηλεκτρικά δίκτυα μπορούν επίσης να διακριθούν σε αυτά που είναι μέρος του κεντρικού ηλεκτρικού δικτύου της χώρας, δηλαδή στα τοπικά δίκτυα και στα αυτόνομα δίκτυα τα οποία αποτελούνται συνήθως από ένα σταθμό παραγωγής από νηξελογεννήτριες ή και αποθηκευτικές διατάξεις. Τα αυτόνομα δίκτυα ονομάζονται έτσι γιατί δεν είναι συνδεδεμένα με το κεντρικό δίκτυο διανομής λόγω κόστους ή τεχνικών δυσκολιών. Στο Ελλαδικό χώρο θα μπορούσαμε με βάση τα παραπάνω να διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις:

- Το κεντρικό δίκτυο διανομής το οποίο υπάρχει στην ηπειρωτική Ελλάδα και είναι μεγάλο σε μέγεθος,
- τα δίκτυα που υπάρχουν στα μεγάλα νησιά (π.χ. Κρήτη) και που διαθέτουν μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μεσαίου μεγέθους και διάφορων τεχνολογιών (π. χ. αεροστρόβιλους, αμοπαραγωγούς, κ.α.) και που είναι αυτόνομα και
- για αυτόνομα δίκτυα των μικρών νησιών που τροφοδοτούνται από μικρούς σταθμούς, νηξελογεννήτριες

Τέλος, μια σημαντική διάκριση των ηλεκτρικών δικτύων είναι αυτή σε ασθενή και ισχυρά. Τα ισχυρά δίκτυα χαρακτηρίζονται από μεγάλη ηλεκτρική ισχύ και μεγάλη στιβαρότητα, καθώς επίσης και από μικρή ενόχληση λόγω διαταραχών. Τα ασθενή δίκτυα είναι ακριβώς το αντίθετο. Επίσης, ένα ισχυρό δίκτυο μπορεί να είναι ασθενές τοπικά. (6) (13) (11)



## 5.6 Ηλεκτρικές συνιστώσες για μια υπεράκτια διασύνδεση

### 5.6.1 Υποβρύχια καλώδια

Αυτά τα καλώδια είναι πολύ ακριβότερα από αυτά που χρησιμοποιούνται χερσαία αφού είναι έτσι σχεδιασμένα ώστε να αντέχουν στις συνθήκες του βυθού. Αν έχει χρησιμοποιηθεί μόνωση XLPE (Cross Linked Poly-Ethylene) απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην αποφυγή της εισόδου υγρασίας. Επίσης είναι καλύτερο να θάβονται γιατί είναι ευπαθή στο πέρασμα των πλοίων. Τα καλώδια αυτά είναι διαθέσιμα στο εμπόριο με απλή η διπλή εξωτερική θωράκιση. Αποτελείται από τρία επιμέρους καλώδια χαλκού, το καθένα απ τα οποία διαθέτουν ασπίδα μολύβδου για να εξασφαλιστεί ότι είναι υδατοστεγή, καθώς επίσης και διάφορες οπτικές ίνες για την επικοινωνία και ανταλλαγή πληροφοριών με τις ανεμογεννήτριες. (7)

### 5.6.2 HVDC σύνδεση

Οι εξελίξεις στον τομέα της ηλεκτρονικής τεχνολογίας έχουν οδηγήσει σε οικονομικά αποδοτικότερες λύσεις στις συνδέσεις HDVC. Ένα πλεονέκτημα της πηγής τάσης που μετατρέπει το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές είναι ότι οι σύγχρονες περιστρεφόμενες μηχανές δεν απαιτούν στο τέλος κάθε σύνδεσης τους παραδοσιακούς μετατροπείς πηγής HVDC. Ακόμα η τάση σύνδεσης εναλλασσόμενου ρεύματος δεν είναι απαραίτητο να είναι η ίδια στο τέλος των γραμμών, γλιτώνοντας ενδεχομένως τη χρήση ενός μετασχηματιστή στην ακτή. Αυτό που χρειάζεται είναι περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας στο τομέα αυτό με τη δυνατότητα μακροπρόθεσμα να συνδέονται οι ανεμοκινητήρες υπεράκτια στο συνεχές ρεύμα, πράγμα που καθιστά τις συνδέσεις HDVC ελκυστικότερες. (7) (18)



Σχήμα 5-8. Δομή υπεράκτιου σταθμού μετατροπής

### 5.6.3 Εξοπλισμός διανομής και μετασχηματιστές

Εάν η τάση που χρησιμοποιείται για τη διασύνδεση με τη στεριά είναι μεγαλύτερη από 33 kV, τότε απαιτείται και ένας υπεράκτιος υποσταθμός στο αιολικό πάρκο. Ο υποσταθμός αυτός είναι μια αρκετά μεγάλη κατασκευή που απαιτεί προσωπικό για το συνεχή του έλεγχο. Οι χερσαίοι μηχανισμοί διανομής και οι μετασχηματιστές για μεταφορά σε υψηλές τάσεις είναι γενικά υπαίθριοι ώστε να εκμεταλλεύονται τα μεγάλα κενά αέρα για μόνωση. Οι υπεράκτιοι υποσταθμοί απαιτούν ακριβότερο εσωτερικό εξοπλισμό και πρόσθετη προστασία από το εξωτερικό περιβάλλον. Η δομή ενός τέτοιου σταθμού φαίνεται στο σχήμα 5-8. Επίσης ο μηχανισμός διανομής θα χρειαστεί για να απομονώσει τα τμήματα του αιολικού πάρκου στην περίπτωση συντήρησης ,επισκευής κλπ, εάν μία κύρια ρευματοδοσία χρησιμοποιείται, παρέχοντας έτσι την επαρκή προστασία. Στην αγορά υπάρχουν διαθέσιμοι συσκευασμένοι υποσταθμοί, αν και αυτοί χρησιμοποιούνται συνήθως για αντικατάσταση σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης ή για γρήγορη εγκατάσταση στις απομονωμένες περιοχές. Οι κατασκευαστές είναι επιφυλακτικοί στην προσφορά αυτών για υπεράκτια τοποθέτηση. Η επιφυλακτικότητα αυτή μπορεί να φύγει με την ανάπτυξη μιας μεγαλύτερης αγοράς και πιο αξιόπιστης. (18) (7)

### 5.6.4 Εγκατάσταση καλωδίων

Οι δαπάνες για την εναποθέτηση των καλωδίων είναι αρκετά μεγάλες σε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο. Ειδικά διαμορφωμένες λέμβοι απαιτούνται για τη διαδικασία αυτή που να μπορούν να ελιχθούν και στα ρηγά νερά. Η μεταφορά του

καλωδίου μεταξύ των ανεμογεννητριών είναι σχετικά απλή και μπορεί να αντιμετωπιστεί από τα βαρούλκα που τοποθετούνται προσωρινά στα θεμέλια.

## 5.7 Σύστημα έλεγχου SCADA

Το σύστημα SCADA λειτουργεί σαν ένα “κέντρο νεύρων” για το έργο. Συνδέει τις ανεμογεννήτριες, τον υποσταθμό και τους μετεωρολογικούς σταθμούς με ένα κεντρικό υπολογιστή. Το σύστημα αυτό επιτρέπει στο διαχειριστή να επιβλέπει τη συμπεριφορά όλων των ανεμογεννητριών και όλου του αιολικού πάρκου συνολικά. Κρατάει ένα αντίγραφο όλων των ενεργειών και επιτρέπει στο διαχειριστή να καθορίζει τι διορθωτικές ενέργειες που πρέπει να ληφθούν. Επίσης καταγράφει την ενεργειακή απόδοση, την διαθεσιμότητα και τα σήματα σφάλματος/βλάβης που θα ενεργήσουν σε βάση για οποιαδήποτε εγγυήσεις υπολογισμών και απαιτήσεων. Το σύστημα SCADA εφαρμόζει επίσης οποιαδήποτε αίτηση σε απάντηση του διαχειριστή του ηλεκτρικού δικτύου. (4)

## 5.8 Πανευρωπαϊκό υπεράκτιο ηλεκτρικό δίκτυο

Προκειμένου να πραγματοποιήσει τις φιλοδοξίες της, να βελτιώσει την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και τα οφέλη των καταναλωτών, η Ευρώπη χρειάζεται τη κατασκευή ενός υπερεθνικού υπεράκτιου ηλεκτρικού δικτύου. Ένα τέτοιο πανευρωπαϊκό δίκτυο δε θα παρέχει μόνο τη πρόσβαση των απομακρυσμένων υπεράκτιων αιολικών πάρκων στο δίκτυο αλλά θα παρέχει και την ικανότητα διασύνδεσης μεταξύ των διαφόρων εθνικών αγορών ηλεκτρικής ενέργειας που υπάρχουν σήμερα για τη συγκρότηση μιας ενιαίας ευρωπαϊκής αγοράς. Λόγω της συγκέντρωσης των περισσότερων προγραμματισμένων υπεράκτιων πάρκων στη βόρεια θάλασσα, τη Βαλτική και τη Μεσόγειο, το υπερεθνικό αυτό δίκτυο θα πρέπει να αρχίσει από αυτές τις περιοχές και πιθανώς αργότερα προχωρήσει στην Ιρλανδία, τη Γαλλία και την Ισπανία. Επίσης θα πρέπει να σχεδιαστεί σαν αναπόσπαστο κομμάτι του Ευρωπαϊκού συστήματος μεταφοράς όπου θα περιλαμβάνει και τις χερσαίες ενισχύσεις.

Σε μια προκαταρκτική αξιολόγηση της Trade Wind εκτιμήθηκε ότι η πραγματοποίηση ενός τέτοιου δικτύου θα μειώσει τις λειτουργικές δαπάνες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη στο επίπεδο των 326€ εκατομμυρίων το χρόνο.

## 5.9 Ένα υπεράκτιο δίκτυο για την ενσωμάτωση της αιολικής ενέργειας

Η υπεράκτια αιολική ενέργεια έχει την ικανότητα να παράγει ένα σημαντικό μερίδιο ηλεκτρικής ενέργειας μελλοντικά στη Ευρώπη. Μαζί με τις επενδύσεις στην υπεράκτια αιολική ενέργεια στις επόμενες δύο δεκαετίες, η διασύνδεση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων μεταξύ τους, μέσω ενός υπεράκτιου δικτύου έχει παρουσιαστεί σαν πρόκληση επανειλημμένα από τις δημόσιες υπηρεσίες και τις ιδιωτικές εταιρείες.

Με τα αυξανόμενα ποσά ισχύος από τις ανανεώσιμες πηγές στο σημερινό ηλεκτρικό σύστημα, επηρεάζεται η προώθηση επενδύσεων σε συμβατικές εγκαταστάσεις παραγωγής. Απαραίτητο είναι ένα ευρωπαϊκό σήσαμα μεταφοράς με υψηλή ικανότητα μεταφοράς μεταξύ των χωρών της Ευρώπης για της μεγάλης κλίμακας αιολικής ισχύος.

### 5.9.1 Ανάπτυξη του υπεράκτιου δικτύου

Υπάρχουν δύο σενάρια για την ανάπτυξη του υπεράκτιου ηλεκτρικού δικτύου ισχύος:

#### Συνδεσιμότητα μεταξύ των χωρών και των περιοχών αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Η ικανότητα διασύνδεσης μεταξύ των διαφόρων χωρών στην Ευρώπη επιτρέπει τη δράση των διεθνών μέτρων στήριξης σε περίπτωση απρόβλεπτων βλαβών και black-outs. Επιπλέον ανασυνδέοντας διαφορετικές περιοχές αγοράς την Ευρώπη επιτρέπεται η πρόσβαση μεταξύ των αγορών, με αποτέλεσμα την ρευστότητα και τη χαμηλότερη τιμή κατανάλωσης μέσω του επαρκούς ανταγωνισμού. Επιπρόσθετα, η υπεράκτια μεταφορά μπορεί μερικές φορές να παρέχει μια εναλλακτική λύση για τις εκτενείς διαδικασίες αδειοδότησης και προγραμματισμού των χερσαίων διασυνδέσεων.

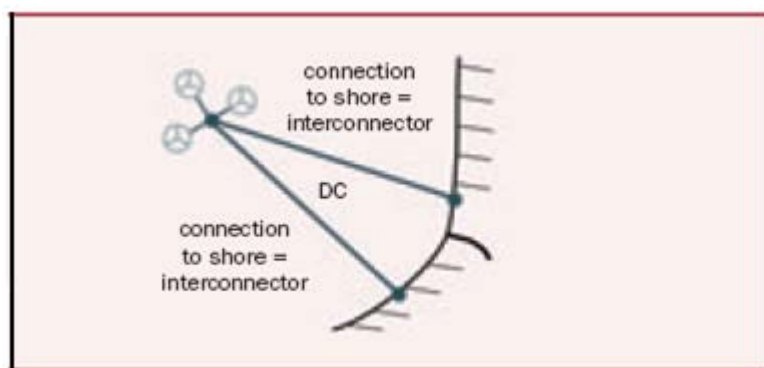
Μια αποδοτικά οικονομική σύνδεση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων

Όταν η υπεράκτια τοποθεσία είναι αρκετά μακριά από την ακτή, είναι οικονομικώς πιο αποδοτικό να συγκεντρώνονται σε μια περιοχή και να συνδέονται με την ακτή μέσω μιας δέσμης γραμμών HVDC. Με τη σύνδεση των υπεράκτιων σταθμών μετατροπής σε μία δεύτερη ακτή ή με έναν άλλο σταθμό μετατροπής, δημιουργείται μια πρόσθετη ικανότητα διασύνδεσης μεταξύ των χωρών με πολύ χαμηλότερο κόστος από αυτό μιας ανεξάρτητης διασύνδεσης από ακτή σε ακτή. Η μη αξιοποιήσιμη ικανότητα διασύνδεσης είναι έπειτα διαθέσιμη για το εμπόριο. Η σύγκριση της υπεράκτιας ηλεκτρικής παραγωγής και της διασύνδεσης επιτρέπει τη διανομή ισχύος στους τομείς υψηλής ζήτησης και αξίας. Επιπλέον, αυξάνεται ο συνολικός αξιοποιήσιμος χρόνος της διασύνδεσης του αιολικού πάρκου.

Η τοπολογία ενός υπεράκτιου αιολικού δικτύου θα προκύψει από τα παραπάνω και επομένως θα εξαρτηθεί από την ανάλογη σημασία που θα εκχωρηθεί σε κάθε ένα από αυτά στις πολιτικές και οικονομικές λήψεις αποφάσεων. (2)

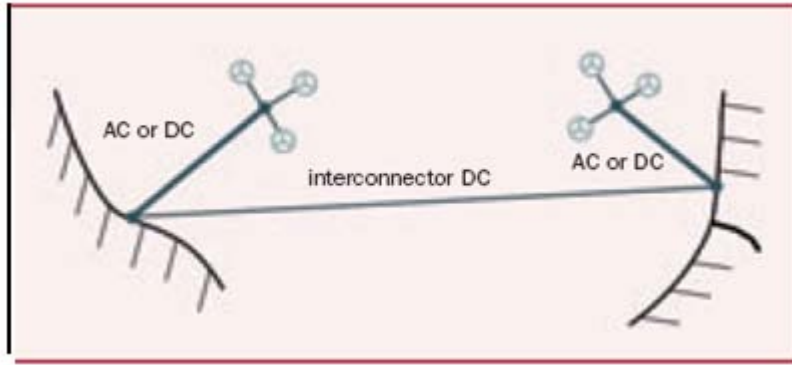
## 5.10 Πιθανές εξελίξεις

Σήμερα, με την περιορισμένη εγκατεστημένη ισχύ και τις σχετικά κοντινές αποστάσεις από την ακτή, τα υπεράκτια αιολικά πάρκα συνδέονται ακόμα ξεχωριστά με την ακτή με υποβρύχια καλώδια διασύνδεσης με στόχο τη χρήση της κλασσικής τεχνολογίας HVDC εξαλείφοντας έτσι τη δυνατότητα διασύνδεσης υπεράκτιων αιολικών πάρκων μεταξύ τους. ( σχήμα 5-9)

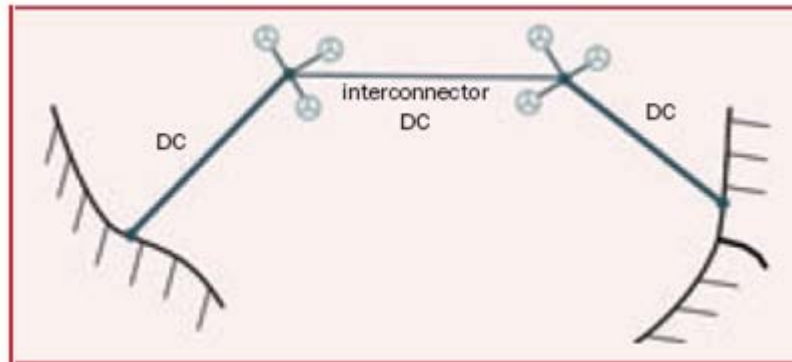


Σχήμα 5-9. Ξεχωριστή διασύνδεση με τη στεριά.

Στο μέλλον, με την αύξηση της εγκατεστημένης υπεράκτιας ισχύος στη βόρεια θάλασσα και την αυξανόμενη απαίτηση για ευελιξία και στα εθνικά ηλεκτρικά συστήματα, η υπεράκτια αιολική ισχύς θα γίνει η κινητήρια δύναμη για την εξέλιξη των υποβρύχιων καλωδίων HVDC και των υπεράκτιων σταθμών μετατροπής, σχήμα 5-10, 5-11. Μετά, οι απαιτούμενες ικανότητες για τη διασύνδεση των υπεράκτιων συστάδων αιολικών πάρκων θα είναι πέντε με δέκα φορές υψηλότερες από τη τυπική ικανότητα διασύνδεσης που χρησιμοποιείται μόνο στο εμπόριο ενέργειας. Με κάποιες σχετικά μικρές πρόσθετες επενδύσεις, μπορεί να διαμορφωθεί ένα διασυνδεδεμένο υπεράκτιο ηλεκτρικό δίκτυο.



Σχήμα 5-10. Διασύνδεση μεταξύ χερσαίων υποσταθμών.



Σχήμα 5-11. Διασύνδεση μεταξύ δύο υπεράκτιων σταθμών μετατροπής.

### 5.10.1 Αντίκτυπος της ενσωμάτωσης της αιολικής ενέργειας

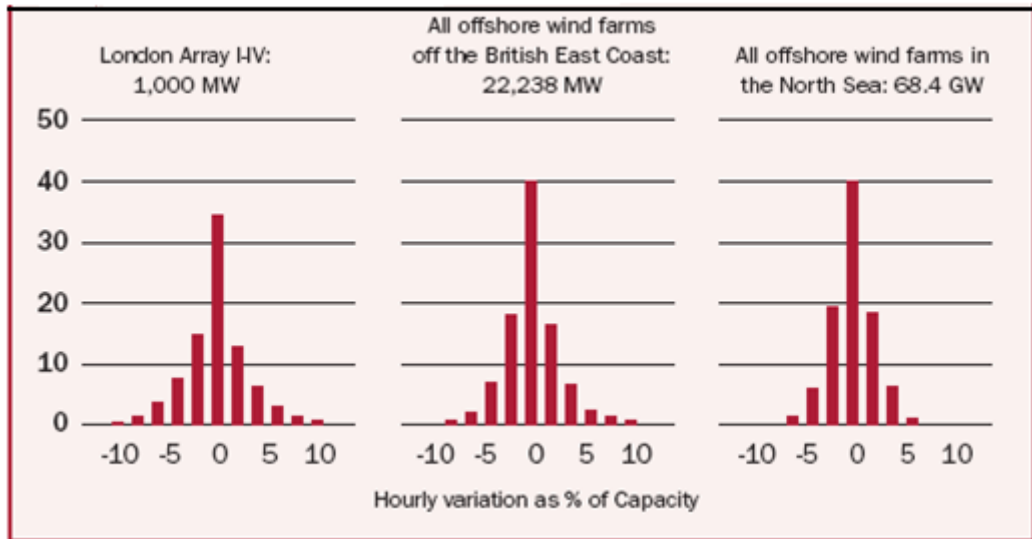
Για την αξιολόγηση των επιπτώσεων ενός υπεράκτιου ηλεκτρικού δικτύου στις βόρειες θάλασσες, έχει αναπτυχθεί ένα σενάριο αιολικής ισχύος και έχει υπολογιστεί με βάση δορυφορικών δεδομένων η ωριαία ταχύτητα του ανέμου και η ισχύς στη διάρκεια πολλών ετών (Final Analysis, FNL). Τα αποτελέσματα του σεναρίου παρουσιάζονται στο πίνακα παρακάτω. Η εγκατεστημένη ισχύς των 68.4 MW θα παράγει 247 TWh ηλεκτρικής ενέργειας το χρόνο. Ο συνολικός αθροισμένος συντελεστής απόδοσης (wind power capacity factor) ισοδυναμεί με 41.2%.

Η ανάλυση αυτή δείχνει ότι η χωρική επέκταση των αιολικών πάρκων πέρα από τις Βόρειες θάλασσες οδηγούν σε ένα μεγαλύτερο κλάσμα της διάρκειας του χρόνου στο οποίο παράγεται ένα μεσαίο επίπεδο ισχύος.

Πίνακας 5-2. Σενάριο αιολικής ισχύος στη Βόρεια θάλασσα

Country	Installed Capacity [MW]	Energy / year [TWh]	Average Capacity Factor [%]	Total Electricity Consumption 2006 [TWh]
Belgium	3,846	13.1	38.9	89.9
Denmark	1,577	5.6	40.5	36.4
France	1,000	3.4	38.8	478.4
Germany	26,418	97.5	42.1	559
Great Britain	22,238	80.8	41.5	405.8
Netherlands	12,039	41.7	39.6	116.2
Norway	1,290	4.9	43.7	122.6
<b>Total</b>	<b>68,408.0</b>	<b>247.0</b>	<b>41.2</b>	<b>1,808.3</b>

Η μεταβλητότητα μπορεί να περιγραφεί με τη διακύμανση της ισχύος, π.χ. με τη διαφορά της παραγόμενης ενέργειας σε δύο διαδοχικά χρονικά στάδια. Το σχήμα 5-1, δείχνει ένα παράδειγμα για τα αιολικά πάρκα της Βρετανίας και το London Array στη Βόρεια θάλασσα. Για τη συσσωρευμένη παραγωγή όλων των αιολικών πάρκων μαζί στη Βόρεια θάλασσα, το 42% όλων των ωριαίων διακυμάνσεων είναι λιγότερο από το +/-1% της εγκατεστημένης ισχύος. Περισσότερο από το 50% όλων των διακυμάνσεων είναι λιγότερο από +/-2%. Διακυμάνσεις μεγαλύτερες από το +/-5% εμφανίζονται μόνο στο 6% του χρόνου, συγκρινόμενο με το περίπου 20% για ένα μόνο αιολικό πάρκο. Εμφανίσεις διακυμάνσεων πάνω από +/- 10% είναι σχεδόν αμελητέες. Μακροχρόνιες διακυμάνσεις εμφανίζονται τυχαία σε όλες τις περιοχές. (2)



Διάγραμμα 5-1. Σχετικές συχνότητες από την ωριαία διακύμανση της παραγωγής – για ένα αιολικό πάρκο, όλων των αιολικών πάρκων στις Ανατολικές Βρετανικές ακτές και συσσωρευμένων όλων των υπεράκτιων αιολικών πάρκων στη Βόρεια θάλασσα.



## 6. Λειτουργία και συντήρηση

### 6.1 Γενικά

Σκοπός της συντήρησης είναι η διατήρηση των μηχανών σε καλή κατάσταση και η επισκευή τους όταν σταματούν λόγω βλάβης, ώστε να επιτύχουμε υψηλή διαθεσιμότητα. Οι διαχειριστές των υπεράκτιων πάρκων προσδοκούν διαθεσιμότητες της τάξης του 98% όπως και στα χερσαία πάρκα. Ωστόσο το πρόβλημα υπεράκτια είναι πολύ πιο δύσκολο αφού χρειάζεται ειδική μεταφορά του πληρώματος και του εξοπλισμού από και στο κτήριο υπηρεσιών η οποία πολλές φορές είναι πολύ δύσκολη ή και αδύνατη λόγω των αντίξωων καιρικών φαινομένων. (6)

Σίγουρα η λειτουργία και η συντήρηση ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου είναι πολύ πιο δαπανηρή και δύσκολη από ένα ισοδύναμο χερσαίο. Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός σημαντικών παραγόντων που πρέπει να εξετασθούν για να βρεθεί μια βέλτιστη λύση όπως:

- Το μέρος που θα γίνεται η βασική συντήρηση. Οι δύο δυνατότητες που υπάρχουν είναι είτε σε λιμενικές εγκαταστάσεις είτε υπεράκτια πάνω σε πλωτά μέσα (σκάφη). Στις Ευρωπαϊκές περιοχές που υπάρχουν διαθέσιμες σε αρκετές περιοχές καλές λιμενικές εγκαταστάσεις μια τέτοια χερσαία βάση είναι η πιο οικονομικά αποδοτική προσέγγιση.
- Η μεταφορά του πληρώματος. Μπορεί να γίνει με ελικόπτερο ή με σκάφος. Το ελικόπτερο απαιτεί εγκατάσταση προσγείωσης, ενώ η μεταφορά με σκάφος για όλες τις αποστάσεις μέχρι 70Km είναι πολύ φθηνότερη.
- Ο ανυψωτικός μηχανισμός για τις περισσότερες επισκευές είναι πολύ σημαντικός. Μπορεί να επιτευχθεί είτε με ελικόπτερο, που είναι και η πιο ακριβή επιλογή, είτε με ανυψωτικές φορηγίδες (lifting barges), είτε τέλος με αυτοπροωθούμενες ανυψωτικές πλατφόρμες (self propelled jack-up platforms) που έχουν το πλεονέκτημα να προσφέρουν σταθερότητα κατά την διαδικασία της επισκευής ή της αποσυναρμολόγησης.

Η διαθεσιμότητα των μηχανών είναι πολύ σημαντική και επηρεάζει κρίσιμα ζητήματα όσον αφορά τα οικονομικά του αιολικού πάρκου:

- Όσο πιο απόμακρη είναι η περιοχή τόσο πιο δύσκολες και δαπανηρές είναι οι επισκέψεις σε αυτήν
- Όσο πιο αντίξοες είναι οι συνθήκες που επικρατούν (θύελλες, καταιγίδες κλπ) τόσο πιο πολλές αστοχίες έχουμε και συγχρόνως δυσκολότερη προσέγγιση για επισκευή.

Τελικά ο σχεδιασμός της μηχανής είναι πολύ σημαντικός για τη μείωση των δαπανών κατά τη λειτουργία και τη συντήρηση καθόλα τη διάρκεια ζωής του πάρκου. Γι' αυτό το λόγο η συντήρηση είναι εντελώς συσχετιζόμενη με τις μηχανικές και

ηλεκτρικές συνιστώσες του ανεμοκινητήρα, μιας και αυτές είναι που παρουσιάζουν βλάβη πιο συχνά και όχι με τη κατασκευή υποστήριξης (πύργος, έδραση) και το σύστημα εκμετάλλευσης της ενέργειας. Έχοντας αυτά κατά νου, ο ανεμοκινητήρας πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι ανάγκες για προληπτικές και διορθωτικές επισκέψεις! (6) (18)

Μέχρι σήμερα τα υπεράκτια αιολικά πάρκα που είναι σε λειτουργία είναι σε σχετικά ρηγά νερά και σε προφυλασσόμενες περιοχές. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι εφικτό να χρησιμοποιήσουμε μηχανές που είναι παραπλήσιες με αυτές που χρησιμοποιούμε χερσαία και να διατηρούμε τη διαθεσιμότητα μέσω προσεκτικών επενδύσεων στις εγκαταστάσεις συντήρησης.

Αυτό που εξετάζεται είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ του σχεδιασμού της μηχανής και της αξιοπιστίας, της προσβασιμότητας και της «σύλληψης» ενέργειας. Τα γενικά συμπεράσματα είναι:

- ✓ Η βελτιωμένη αξιοπιστία της μηχανής μειώνει το κόστος λειτουργίας και συντήρησης και αυξάνει τη διαθεσιμότητα και την ενεργειακή απόδοση. Άρα μειώνει και το μοναδιαίο κόστος κεφαλαίου.
- ✓ Περισσότερες επισκέψεις για συντήρηση αυξάνουν το κόστος, μειώνουν τις αστοχίες, αυξάνουν τη διαθεσιμότητα και τη συλλεγόμενη ενέργεια.
- ✓ Κινούμενοι περισσότερο υπεράκτια, αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου και το αιολικό δυναμικό αλλά μειώνεται η διαθεσιμότητα λόγω των πιο συχνών και έντονων καιρικών φαινομένων (καταιγίδες, θύελλες κλπ).
- ✓ Με τα σχέδια της προηγμένης τεχνολογίας η αύξηση στο ενεργειακό δυναμικό αναιρείται από τη μείωση της διαθεσιμότητας και επομένως δεν υπάρχει κανένα πλεονέκτημα στη μετακίνηση σε λιγότερο προσβάσιμες περιοχές που έχουν όμως μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου. Με μία βελτιωμένη αξιοπιστία, η διαθεσιμότητα είναι λιγότερο ευαίσθητη από τη προσβασιμότητα.

Η φιλοσοφία αυτή που εξετάζει τη συντήρηση και την αξιοπιστία σαν έναν απτούς βασικότερους οδηγούς κατά το σχεδιασμό της μηχανής ενός μεγάλου υπεράκτιου ανεμοκινητήρα, έχει σημαντική επίπτωση στη μελλοντική εστίαση του σχεδιασμού της μηχανής, και μπορεί, για παράδειγμα, να καταλαμβάνει την αρχή για θέματα σημαντικά που κυριαρχούν στο σχεδιασμό μεγάλων χερσαίων μηχανών. (3)

## 6.2 Λειτουργία του αιολικού πάρκου

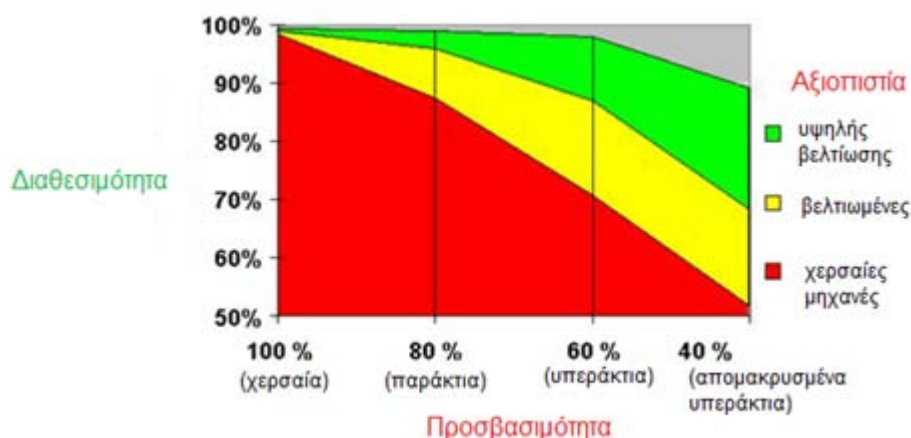
Με την έννοια *commissioning* εννοούμε όλες αυτές τις δραστηριότητες που λαμβάνουν μέρος αμέσως μετά την εγκατάσταση όλων των συνιστωσών της

υπεράκτιας ανεμογεννήτριας. Παίρνει περίπου δύο- τρεις μέρες, περιλαμβάνοντας τις τυπικές ηλεκτρικές δοκιμές των ηλεκτρικών υποδομών και του ανεμοκινητήρα, καθώς και τη συνήθη επιθεώρηση των πολιτικών-μηχανολογών μηχανικών. Ουσιαστικά είναι η πρώτη δοκιμή λειτουργίας του αιολικού πάρκου. Συνήθως παίρνει από έξι μήνες ως και ένα χρόνο μέχρι την ολοκληρωμένη εμπορική λειτουργία του. Που σημαίνει ότι η διαθεσιμότητα του αυξάνεται από το 80-90% μετά την έναρξη στο μακροπρόθεσμο επίπεδο κατά μέσο όρο του 97% και περισσότερο. (2)

Η καθημερινή λειτουργία ενός αιολικού πάρκου παρακολουθείται και ελέγχεται με τη χρήση ενός συστήματος εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (SCADA). Το σύστημα αυτό διασύνδεει όλα τα συστατικά μέρη (δηλ. ανεμογεννήτριες, μετεωρολογικούς σταθμούς και υποσταθμούς) του αιολικού πάρκου σε έναν κεντρικό Η/Υ που παρέχει τη δυνατότητα στο χειριστή να παρακολουθεί και να ελέγχει τη λειτουργία του αιολικού πάρκου. Το σύστημα παρέχει και αποθηκεύει πληροφορίες σχετικά με τη λειτουργία του αιολικού πάρκου και έτσι μπορούν να εντοπιστούν αστοχίες ή προβλήματα λειτουργίας συγκεκριμένων ανεμογεννητριών.

### 6.3 Συντήρηση και μεταφορά πληρώματος

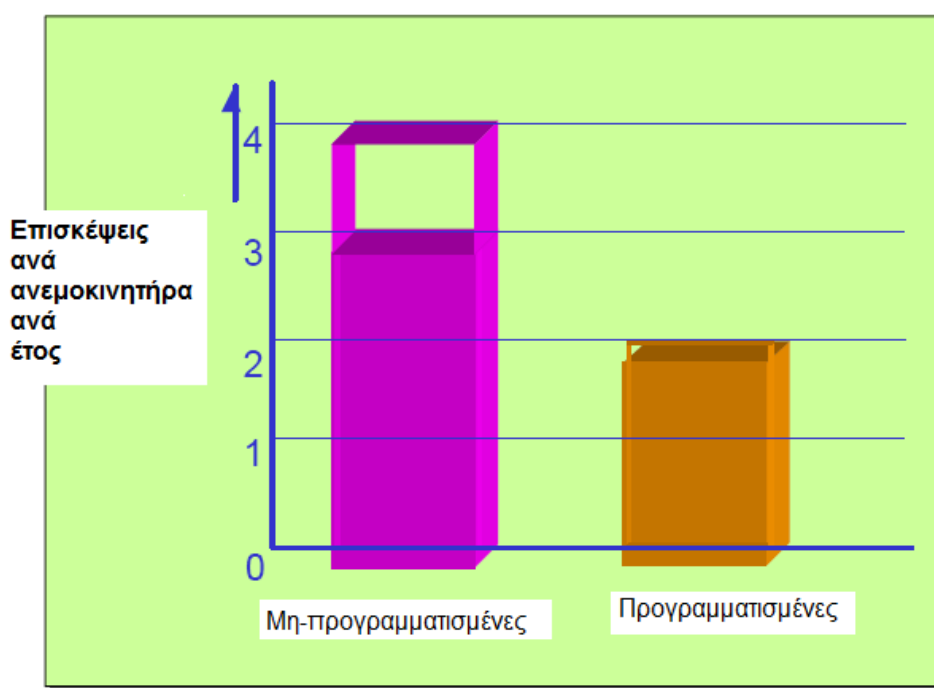
Η διαδικασία συντήρησης των υπεράκτιων ανεμογεννητριών απαιτεί τεχνογνωσία παρόμοια με αυτή των χερσαίων ανεμογεννητριών λόγω του ότι χρησιμοποιούνται παρόμοιες συνιστώσες. Ωστόσο, οι συνιστώσες στην περίπτωση των υπεράκτιων ανεμογεννητριών είναι συνήθως μεγαλύτερου μεγέθους. Το Διάγραμμα 6-1 επισημαίνει πόσο σημαντική είναι η αξιοπιστία των μηχανών, ιδίως για τις απομακρυσμένες υπεράκτιες τοποθεσίες, που μερικές φορές απέχουν 14-20 Km από την ακτή, όπως στην περίπτωση του αιολικού πάρκου Horns Rev.



Διάγραμμα 6-1. Αλληλεπίδραση της αξιοπιστίας, της διαθεσιμότητας και της προσβασιμότητας.

Οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται έτσι ώστε να απαιτούνται περιοδικοί έλεγχοι μία έως τρεις φορές κατά έτος. Στην περίπτωση του αιολικού πάρκου Horns Rev, στη

Δανία, οι ανεμογεννήτριες σχεδιάστηκαν για δύο ετήσιες επισκέψεις συντήρησης. Οι περιοδικοί έλεγχοι συντήρησης διαφέρουν ασφαλώς ανάλογα με τις οδηγίες του κατασκευαστή και την τεχνολογία που χρησιμοποιεί η συγκεκριμένη ανεμογεννήτρια. Η μη προγραμματισμένη συντήρηση μπορεί να αυξήσει σημαντικά το κόστος συντήρησης (δηλ. τις δαπάνες λειτουργίας και διαχείρισης, συνεπώς και το κόστος ανά κιλοβατώρα) στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται οι ετήσιες προγραμματισμένες και μη προγραμματισμένες επισκέψεις για τη συντήρηση ενός ανεμοκινητήρα.. (4)



Διάγραμμα 6-2. Προγραμματισμένες και μη προγραμματισμένες επισκέψεις ανά ανεμοκινητήρα

### Μεταφορά πληρώματος

Η διαδικασία της συντήρησης απαιτεί τη μεταφορά του πληρώματος και του εξοπλισμού του στο πάρκο. Εάν η συντήρηση απαιτήσει ανταλλακτικά που δεν περιλαμβάνονται στο συνηθισμένο εξοπλισμό πρέπει να μεταφερθούν επίσης και αυτά από τη θέση αποθεμάτων τους στο πάρκο.

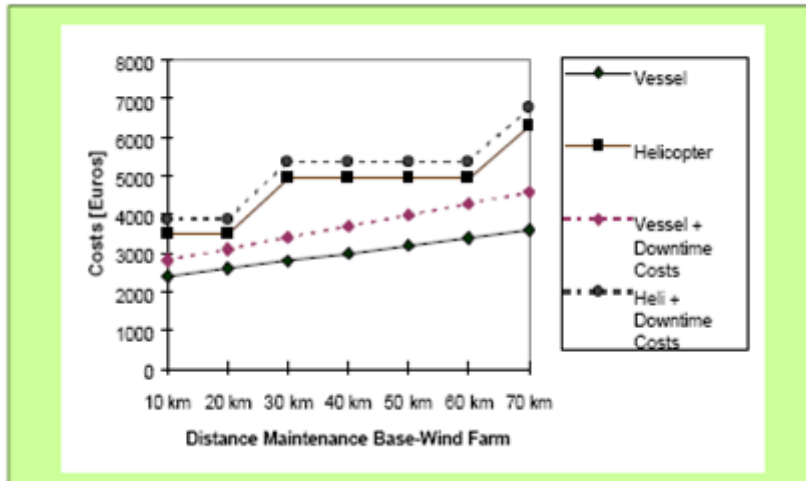
Ο τρόπος μεταφοράς παίζει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη του μέγιστου χρόνου λειτουργίας των ανεμογεννητριών και την ελάττωση του χρόνου επισκευής και συντήρησης. Η κατάσταση του καιρού είναι ένας απ τους κύριους περιοριστικούς παράγοντες στη συντήρηση των υπεράκτιων αιολικών πάρκων. Κατά συνέπεια, η μικρή εξάρτηση του τρόπου μεταφοράς, από τη ταχύτητα του ανέμου και το ύψος-τύπο των κυμάτων είναι σημαντική.

Επιπλέον, σε περίπτωση ξαφνικής αλλαγής του καιρού, θα πρέπει να εξασφαλιστεί ότι το πλήρωμα θα μπορεί να επιστρέψει με ασφάλεια στη βάση. Επομένως, άλλος ένας σοβαρός παράγοντας είναι η αξιοπιστία της επιλεγμένης μεθόδου μεταφοράς.

Άλλοι παράγοντες που πρέπει να εξεταστούν είναι η αρχική επένδυση και οι τρέχουσες δαπάνες του μέσου μεταφοράς, καθώς επίσης και οι επιπλέον δαπάνες, ανάλογα με την επιλεγμένη μέθοδο μεταφοράς, για τη κατασκευή στο πάρκο εγκαταστάσεων όπως μικρών ελικοδρόμιων ή προβλητών, σκάλες αποβίβασης κλπ.

Οι επιλογές για τη μεταφορά του πληρώματος είναι οι εξής:

- *Ελικόπτερο.* Ως επί το πλείστον, στις Βόρειες θάλασσες το ελικόπτερο είναι το μέσον που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του προσωπικού από και στο υπεράκτιο πάρκο. Και αυτό γιατί είναι πολύ ευπροσάρμοστο, ικανό στις κάθετες απογειώσεις και στις προσγειώσεις με χαμηλές ταχύτητες. Φυσικά απαιτείται ελικοδρόμιο. Η διάμετρος περίπου ενός τέτοιου ελικοδρόμιου είναι 12m με το κέντρο του 10m απόσταση από οποιοδήποτε εμπόδιο. Στους πολύ μεγάλου μεγέθους ανεμοκινητήρες η ιδανική θέση είναι πάνω στο θάλαμο των μηχανισμών. Τα δε πτερύγια θα πρέπει να είναι σταθμευμένα στη σωστή (οριζόντια) θέση.
- *Σκάφος.* Η βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου έχει αποκτήσει μεγάλη εμπειρία στα σκάφη μεταφοράς του φορτίου και του πληρώματος. Ένα παράδειγμα είναι η χρήση των ταχύπλων «goal boats» που χρησιμοποιούνται για τους λιμενικούς πιλότους. Τα βοηθητικά σκάφη μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά του πληρώματος αλλά και του εξοπλισμού συντήρησης. Είναι επίσης επανδρωμένα με έναν καπετάνιο, έναν μηχανικό και έναν βοηθό. Η ταχύτητα τους βέβαια είναι αρκετά χαμηλότερη από αυτήν ενός σκάφους goal boat. Στο διάγραμμα 6-3 βλέπουμε καθαρά τη διαφορά του κόστους για τη χρήση σκάφους και ελικόπτερου. (6) (3)



Διάγραμμα 6-3. Σύγκριση του κόστους μεταφοράς με σκάφος/ελικόπτερο (για μέγεθος ανεμογεννήτριας 1.2MW)

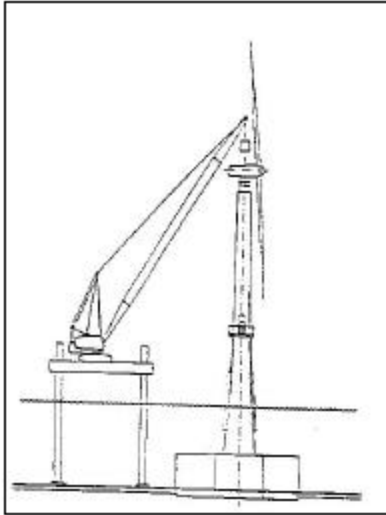
## 6.4 Ανυψωτικός εξοπλισμός

Η σωστή επιλογή του ανυψωτικού εξοπλισμού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Η διαδικασία της ανύψωσης στη πράξη θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ανεπηρέαστη από την ταχύτητα του ανέμου και το ύψος των κυμάτων. Ο ανυψωτικός εξοπλισμός για ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο είτε ενοικιάζεται είτε αγοράζεται. Όταν ενοικιάζεται από τοπικούς προμηθευτές πρέπει να εξασφαλίζεται ότι έχει μεγάλη διαθεσιμότητα και ταχεία λειτουργία, δεδομένου ότι η υπεράκτια εργασία είναι πολύ δαπανηρή και ο χρόνος περιορισμένος. Επίσης θα πρέπει να μελετηθούν και να εφαρμοστούν οι ελάχιστες δυνατές τροποποιήσεις στο όλο σύστημα του πάρκου για την προσαρμογή των ανεμογεννητριών στην επιλεγμένη μέθοδο ανύψωσης. Όταν ο ανυψωτικός εξοπλισμός αγοράζεται, προσοχή πρέπει να δοθεί στη χαμηλή αρχική επένδυση αλλά και στις μετέπειτα τρέχουσες δαπάνες.

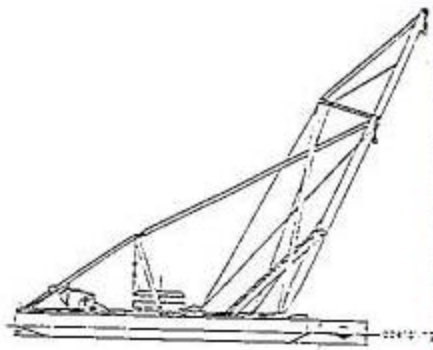
Επίσης πρέπει να είναι γνωστό ότι τα ρηγά νερά, περιορίζουν τη χρήση ορισμένων ανυψωτικών μέσων, όπως τη περίπτωση των ημικαταδύμενων σκαφών (semi submersible crane vessel).

Διάφοροι τρόποι ανύψωσης στο υπεράκτιο περιβάλλον παρουσιάζονται παρακάτω:

- *Jack up barge with land crane*



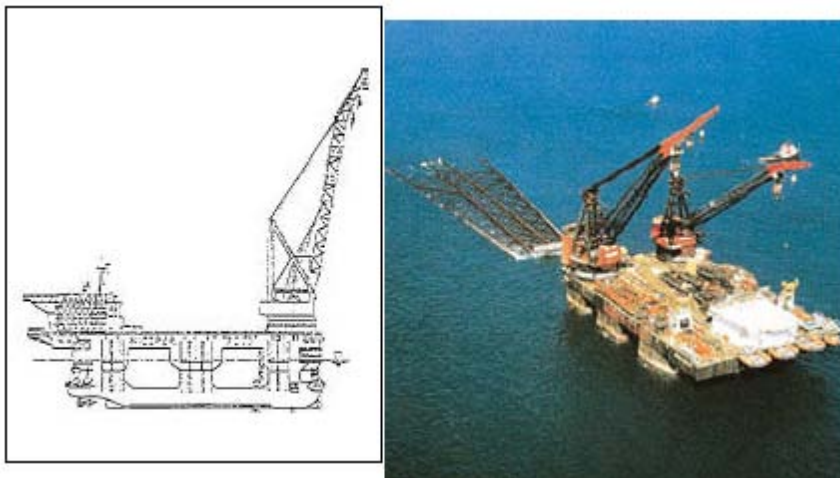
- *Flat bottom with sheer leg crane*



- *Ship type with rotating crane*



- *Semi submersible crane vessel*



Οι μέγιστες χωρητικότητες φορτίων ποικίλουν από 500tn η φορηγίδα με επίπεδη γάστρα μέχρι 7000 tn το ημικαταδυόμενο σκάφος. Ένα μεγάλο μειονέκτημα στη χρήση του τελευταίου είναι ότι βυθίζεται αρκετά (πάνω από 15m), δεδομένου ότι τα περισσότερα υπεράκτια αιολικά πάρκα βρίσκονται σε βάθος νερού από 5 έως 20m.  
(6) (2) (9)



- *Jack-up platform (self propelled)*



Χρησιμοποιούνται απ τις πετρελαϊκές επιχειρήσεις κυρίως. Είναι αυτοπροσθούμενες προκειμένου να εργάζονται ανεξάρτητα απ τις ρυμουλκούμενες βάρκες. Η κατασκευή μπορεί να τροποποιηθεί για να προσαρμόζεται κάθε φορά ανάλογα με το προοριζόμενο σκοπό.

- *Purpose built/adapted*



- *Ελικόπτερο*

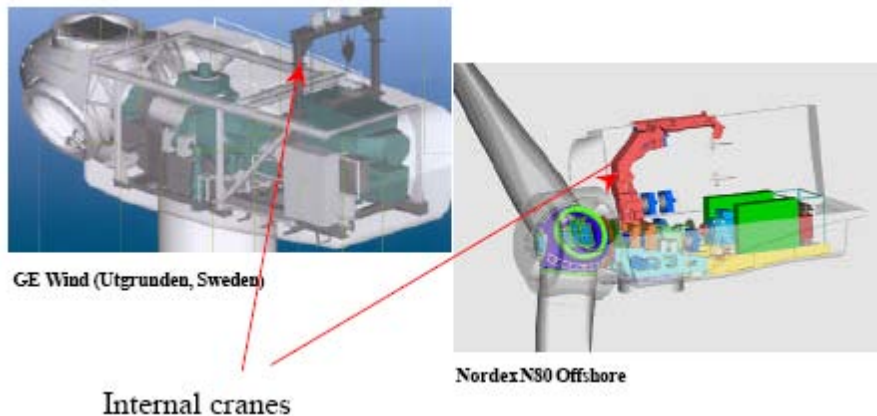
Η χρήση του ελικόπτερου για τη μεταφορά του πληρώματος αναφέρθηκε ανωτέρω. Πρόσθετες εκτιμήσεις στη χρήση τους και σαν ανυψωτικά είναι:

- Βάρος συνιστωσών που πρόκειται να ανυψωθεί μικρότερο των 10tn (ακόμα καλύτερα <4tn )
- Εκλεπτυσμένες ανυψωτικές λειτουργίες, ελικόπτερο που αιωρείται πάνω απ τον ανεμοκινητήρα είναι ευάλωτο στις ριπές του ανέμου.
- Όχι εφικτό για διαδικασίες π.χ. ανύψωσης των συνιστωσών προκειμένου να αφαιρεθούν τα μπουλόνια.
- Ακριβότερη λύση όσον αφορά την αναλογία δαπάνες/ικανότητα ανύψωσης

Επίσης υπάρχουν και ενσωματωμένες εγκαταστάσεις για την ανύψωση κατά τη λειτουργία και τη συντήρηση, μερικές εικόνες παρουσιάζονται παρακάτω.



Σχήμα 6-1 Ενσωματωμένος γερανός στο θάλαμο τη ανεμογεννήτριας.



Σχήμα 6-2. Περίπτωση 2.

Όπως στη περίπτωση του υπεράκτιου αιολικού πάρκου Vindeby στη Δανία. Ένας ανυψωτικός βραχίονας για μικρά κομμάτια αποθηκεύεται σε κάθε θάλαμο μηχανισμών των ανεμογεννητριών. Σε περίπτωση σημαντικής βλάβης κάποιας συνιστώσας μπορεί να εγκατασταθεί στο θάλαμο μηχανισμών ένας μεγαλύτερος γερανός. Με τη βοήθεια αυτού του γερανού οι συνιστώσες μεταφέρονται στην κύρια πλατφόρμα προσγείωσης και από εκεί ανυψώνονται στη φορτηγίδα με τη χρήση του γερανού που φέρει η ίδια. Ο κύριος λόγος για την επιλογή μιας τέτοιας προσέγγισης είναι η μείωση της χρήσης του εξωτερικού ανυψωτικού εξοπλισμού που απαιτείται. (6) (9)

## 6.5 RAMS

### 6.5.1 Εισαγωγή

Για την σωστή κατανόηση των ζητημάτων της αξιοπιστίας παρακάτω ορίζονται οι όροι που χρησιμοποιούνται συχνά, σχετικά με τα ζητήματα της λειτουργίας και της συντήρησης:

**Accessibility** Είναι το ποσοστό του χρόνου στη διάρκεια ενός έτους όπου μια (υπεράκτια) κατασκευή είναι προσεγγίσιμη. Προφανώς, η δυνατότητα πρόσβασης εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες και από το χρησιμοποιούμενο εξοπλισμό.

**Reliability** Είναι η πιθανότητα που έχει το σύστημα να εκτελέσει τους στόχους του. Συνήθως καθορίζεται σαν ποσοστό του χρόνου.

**Availability** Είναι η πιθανότητα του συστήματος να λειτουργεί ικανοποιητικά. Η ουσιαστική διαφορά του με την αξιοπιστία είναι η στρατηγική της λειτουργίας και συντήρησης του συστήματος. Ένα σύστημα μπορεί να είναι πολύ αξιόπιστο, δηλ. η συχνότητα βλάβης να είναι εξαιρετικά χαμηλή, αλλά όταν δε λαμβάνεται καμία ενέργεια συντήρησης ή επισκευής μετά από μία βλάβη τότε και η διαθεσιμότητα του θα είναι πολύ χαμηλή.

**Maintainability.** Είναι ένα περισσότερο ποιοτικό ζήτημα που εξετάζει την ευκολία στη δυνατότητα επισκευής.

**Servisability.** Αναφέρεται με έναν αντίστοιχο τρόπο στη δυνατότητα υλοποίησης της προγραμματισμένης συντήρησης.

**Failure** Είναι η μη δυνατότητα της εκτέλεσης της απαραίτητης λειτουργίας ενός συστήματος

**Criticality.** Είναι ένα μέτρο προσέγγισης των συνεπειών μιας αστοχίας. (6)

## 6.6 Στρατηγικές συντήρησης των αιολικών πάρκων

Η συντήρηση μιας χερσαίας ανεμογεννήτριας απαιτεί μία επίσκεψη κάθε 6 μήνες και 2 κατά μέσο όρο μη προσχεδιασμένες κάθε χρόνο. Επίσης προγραμματίζεται και μία σημαντική ολοκληρωτική επισκευή συνήθως κάθε 5 χρόνια, στην οποία ελέγχονται οι σημαντικές συνιστώσες του όλου συστήματος ενώ τα «κλειδιά» υψίστης σημασίας του μηχανισμού αντικαθίστανται με καινούρια. Μία τέτοια απαίτηση συντήρησης σε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο θα οδηγούσε είτε σε καταστρεπτικά ύψη κόστους είτε σε καταστρεπτική μείωση της διαθεσιμότητας.

Οι διάφορες πιθανές στρατηγικές λειτουργίας και συντήρησης που μπορούν να αποδειχθούν κατάλληλες για τα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι οι εξής:

### Προληπτική και Διορθωτική συντήρηση (Preventive and Corrective maintenance)

Ουσιαστικά είναι η συνέχεια της χερσαίας πρακτικής για τη συντήρηση και την επισκευή. Είναι εφικτή στις περιπτώσεις που η αξιοπιστία των ανεμογεννητριών είναι σημαντικά βελτιωμένη και που η απαίτηση για συντήρηση μειώνεται σε μία κάθε 12 έως και 18 μήνες.

### Ευκαιριακή συντήρηση (Opportunity based maintenance)

Η ιδέα που κρύβεται εδώ είναι ότι οι ανεμογεννήτριες μπορούν να λειτουργούν μέσα σε ένα ευέλικτο διάστημα μεταξύ των συντηρήσεων και η προληπτική συντήρηση εκτελείται στις περιπτώσεις που έχει εμφανιστεί κάποια βλάβη και μπορεί να διορθωθεί μόνο με επίσκεψη του προσωπικού. Συνδυάζοντας έτσι την επισκευή και τη συντήρηση μειώνονται οι ακριβές επισκέψεις στο πάρκο. Η πρακτική αυτή θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι καθαρά υπεράκτια.

### Περιστασιακή συντήρηση (Condition based maintenance)

Σ' αυτή τη περίπτωση ένα σύστημα παρακολούθησης όλων των συνιστωσών της ανεμογεννήτριας υπαγορεύει την αναγκαιότητα επίσκεψης του προσωπικού όταν η κατάσταση μιας συνιστώσας υπερβαίνει κάποια θεωρούμενα όρια. Τότε πραγματοποιείται η επισκευή και η συντήρηση. Αυτός είναι ένας τελευταίος τρόπος για να μειωθεί ο αριθμός των επισκέψεων, αλλά απαιτείται πρόσθετη αρχική δαπάνη στα συστήματα παρακολούθησης.

Πάντως, ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός ανεμοκινητήρα για υπεράκτια εφαρμογή απαιτεί ριζική αλλαγή στη φιλοσοφία του σχεδιασμού που ακολουθείται στη χερσαία εφαρμογή. (6)

## 6.7 Παροπλισμός

Κανένα έργο ή αιολικό πάρκο δεν έχει ολοκληρώσει τον προβλεπόμενο κύκλο ζωής των 25 ετών. Ο παροπλισμός του έργου θα περιλαμβάνει την απομάκρυνση των διατάξεων και των θεμελιώσεων από τη θάλασσα προκειμένου να επανέλθει η περιοχή στην κατάσταση που ήταν πριν από το έργο, πράγμα που αποτελεί προϋπόθεση στα περισσότερα έργα. Αν και η απομάκρυνση των διατάξεων δεν θα είναι δύσκολη, πιο περίπλοκη αναμένεται να είναι η απομάκρυνση των κατασκευών έδρασης. Οι εδράσεις μονού πυλώνα ή πολλών πυλώνων, οι οποίες συνήθως γίνονται με πασσαλόπηγμα μέσα στον πυθμένα της θάλασσας, συνεπάγονται μια περίπλοκη διαδικασία για την απομάκρυνσή τους. Επίσης, η δαπάνη για τις κατασκευές που βασίζονται στη βαρύτητα θα είναι πολύ μεγάλη λόγω του τεράστιου βάρους τους.

Είναι πιθανή η εκ νέου χρησιμοποίηση των κατασκευών έδρασης για την τοποθέτηση άλλων ανεμογεννητριών στην ίδια περιοχή, εφόσον αυτές κριθούν κατάλληλες για τις τεχνολογίες που θα είναι διαθέσιμες κατά το χρόνο του παροπλισμού. (4)

## 7. Οικονομική ανάλυση

### 7.1 γενικά

Τα σχέδια για την υπεράκτια αιολική ενέργεια έχουν διάφορα θέλγητρα. Ο υπεράκτιος άνεμος είναι πιο ισχυρός και πιο σταθερός από αυτόν που επικρατεί στη στεριά. Για παράδειγμα, στα 10-15 m από την ακτή, η ταχύτητα του ανέμου είναι υψηλότερη κατά 20-25%. Δεδομένου ότι ταχύτητα ανέμου επηρεάζει σημαντικά την παραγόμενη ενέργεια και άρα και το μοναδιαίο κόστος, το υψηλό υπεράκτιο αιολικό δυναμικό είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα. Ακόμη, σε σύγκριση με το χερσαίο άνεμο ο υπεράκτιος είναι λιγότερο τυρβώδης. Αυτό μειώνει τα φορτία καταπόνησης στο στρόβιλο και άρα και τις συχνές επισκέψεις για επισκευή και συντήρηση. Όπως ξέρουμε αύξηση της διάρκειας ζωής του έργου σημαίνει μείωση του κόστους παραγωγής. Ομοίως η θάλασσα προσφέρει μικρότερη αντίσταση στη ροή του ανέμου, με συνέπεια χαμηλότερες ριπές ανέμου. Αυτό σημαίνει ότι στα υπεράκτια έργα μπορεί να μην απαιτούνται ψηλότεροι πύργοι. (Ωστόσο, μπορεί να υπάρχει ακόμα μια αύξηση της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος, έτσι συστήνεται ένα οικονομικά βέλτιστο ύψος πύργων.)

Εξ αιτίας αυτών των ειδικών αναγκών, τα υπεράκτια αιολικά πάρκα είναι δαπανηρότερα απ' ό,τι τα χερσαία. Τα οικονομικά των αιολικών πάρκων εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους, όπως το αιολικό δυναμικό, τα εδαφολογικά χαρακτηριστικά, τη πρόσβαση στο ηλεκτρικό δίκτυο, και την επικρατούσα ενεργειακή αγορά. Τα σημαντικότερα στοιχεία που προσθέτονται στο κόστος εγκατάστασης είναι η θεμελίωση και η διασύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο. Το κόστος θεμελίωσης αυξάνεται απότομα με το βάθος του νερού και το ύψος των κυμάτων, ενώ η απόσταση από την ακτή καθορίζει το κόστος διασύνδεσης. Σε κάποιες περιπτώσεις, το κόστος της δομής στήριξης και της διασύνδεσης, έφτασε το 40 % της συνολικής δαπάνης του έργου. Παρόλα αυτά, αυτές οι υψηλές επενδύσεις κεφαλαίου δικαιολογούνται συχνά από την καλύτερη ενεργειακή απόδοση των υπεράκτιων πάρκων. (3)

Σήμερα με ολοένα και περισσότερα υπεράκτια αιολικά πάρκα να κατασκευάζονται, το κόστος επένδυσης των αιολικών πάρκων μειώνεται καθώς εξελίσσεται η τεχνολογία και το μέγεθος των αιολικών πάρκων γίνεται μεγαλύτερο.

Το κόστος επένδυσης του πρώτου υπεράκτιου αιολικού πάρκου που κατασκευάστηκε στη Δανία ήταν της τάξης των 2.200 €/kW, ενώ στο αιολικό πάρκο του Horns Rev αυτό μειώθηκε στα 1.650 €/kW (που ισοδυναμεί με 4,9 €/kWh). Τα κόστη επένδυσης αναμένεται να μειωθούν περαιτέρω με την εξέλιξη της τεχνολογίας, και αυτό λόγω της αύξησης της ισχύος των ανεμογεννητριών και της αποκτηθείσας από προηγούμενα έργα εμπειρίας. Επίσης, κατασκευάζονται ειδικά πλοία για τη μεταφορά και εγκατάσταση των ανεμογεννητριών.

Το κόστος των κατασκευών έδρασης μπορεί να είναι έως και 30% μεγαλύτερο από αυτό των χερσαίων θεμελιώσεων, με τα άλλα κόστη να είναι υψηλότερα κατά 25% περίπου. Το κόστος κεφαλαίου σε ορισμένα νεότερα αιολικά πάρκα που ολοκληρώθηκαν το 2007, όπως το Arklow Bank (κομητεία Wicklow, Ιρλανδία), ανέρχεται στο ποσό των 1.200 - 1.300 €/kW, που είναι σαφώς πιο συγκρίσιμο με τα κόστη κεφαλαίου της τάξης των 700-1000 €/kW των χερσαίων αιολικών πάρκων.

Το ανά κιλοβάτ (ή μεγαβάτ) κόστος κεφαλαίου αναμένεται να μειωθεί μελλοντικά λόγω της διαρκούς εξέλιξης των ειδικών πλοίων που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά και εγκατάσταση των ανεμογεννητριών. Το αυξανόμενο μέγεθος των ανεμογεννητριών (δηλ. μεγαλύτερη ισχύς) συνεπάγεται οικονομίες κλίμακας. Ως αποτέλεσμα των αιολικών συνθηκών στις υπεράκτιες τοποθεσίες, το συνολικό κόστος ανά παραγόμενη κιλοβατώρα αναμένεται να καταστεί μικρότερο σε σχέση με αυτό μιας χερσαίας τοποθεσίας. (4) (19) (18)

## 7.2 Τεχνολογικοί κίνδυνοι:

Οι τεχνολογικές τάσεις επιτρέπουν τη χρήση ανεμογεννητριών μεγαλύτερης ισχύος (2 – 2,5 MW ή και περισσότερο) σε υπεράκτιες εφαρμογές. Υπάρχουν κίνδυνοι που σχετίζονται με την εντατική έρευνα και ανάπτυξη προς την επίτευξη του σκοπού αυτού. Αν και υπάρχουν οικονομίες κλίμακας στα κόστη παραγωγής ενέργειας, αυτές μπορεί να αυξήσουν τα κόστη κεφαλαίου και το κόστος της περαιτέρω έρευνας και ανάπτυξης. Ωστόσο, οι κίνδυνοι αυτοί μπορούν να ξεπεραστούν με τη βελτίωση της αποδοτικότητας των ανεμογεννητριών, λόγω των σταθερότερων αιολικών συνθηκών στις παράκτιες και υπεράκτιες τοποθεσίες.

Οι τεχνολογικοί κίνδυνοι σχετίζονται και με τον τομέα σχεδιασμού των συνιστωσών. Σε μια προσπάθεια μείωσης του κόστους συντήρησης, διεξάγεται έρευνα για την αντικατάσταση του κιβωτίου ταχυτήτων, ενός σημαντικού και δαπανηρού εξαρτήματος, με ένα σύστημα απευθείας μετάδοσης της κίνησης (Direct Drive). Μια τέτοια εξέλιξη θα αυξήσει τους κινδύνους λόγω της μη δοκιμασμένης ακόμα σχεδίασης του συστήματος.

Η χρηματοδότηση των έργων από τους επενδυτές ήταν μέχρι τώρα περιορισμένη λόγω του υψηλού κόστους κεφαλαίου που απαιτούνταν, ως αποτέλεσμα του κόστους των θεμελιώσεων και του υψηλού κόστους συντήρησης λόγω των απομακρυσμένων περιοχών. (4)

### 7.3 Το κόστος της δομής υποστήριξης

Ο σχεδιασμός της κατασκευής υποστήριξης (πύργος, θεμελίωση) συμπεριλαμβάνει τη μελέτη των εξής:

- Τα φορτία ανέμου και κύματος που καταπονούν τη κατασκευή, και σε κάποιες περιπτώσεις τα φορτία από τη δημιουργία πάγου.
- Τη συνολική δυναμική απόκριση της δομής υποστήριξης και τις συνθήκες που επικρατούν στο πυθμένα της θάλασσας.
- Τις μεθόδους και τρόπους εγκατάστασης, π.χ. κάποιιοι σχεδιασμοί περιέχουν πλωτές κατασκευές ενώ άλλες μεταφέρονται μέχρι τη θέση εγκατάστασης με φορτηγίδα.
- Τρόποι θεμελίωσης, ανάλογα με το βάθος και τη φύση του βυθού, μπορεί να είναι μια βαριά βάση από σκυρόδεμα (gravity based), ή πυλώνας βυθισμένος στο πυθμένα (mono-piled, multi-piled) ή ακόμα και πλωτή βάση (float)

Οι δύο πιο προτιμώμενοι τρόποι είναι ο gravity based mono-tower και ο monopile. Ο δεύτερος μάλιστα είναι πιο φθηνός και μειώνει το κόστος ενέργειας μέχρι και 20%. Σε άλλες περιπτώσεις όμως και ανάλογα με τις συνθήκες της εκάστοτε τοποθεσίας η χρήση μιας gravity based κατασκευής ακόμα και εν μέρει μπορεί να είναι πολύ καλύτερη λύση. (1)

### 7.4 Το κόστος εγκατάστασης

Εδώ εμπεριέχεται ένας μεγάλος αριθμός από σταθερά κόστη. Το μοναδιαίο κόστος πάντως πέφτει σημαντικά όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του αιολικού πάρκου. Σίγουρα πιο επικερδή είναι τα μεγάλης κλίμακας αιολικά πάρκα που αποτελούνται από 100 μηχανές και πάνω. (1)

### 7.5 Κόστος διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο (μεταφορά)

Εδώ απαιτείται ένα υποβρύχιο σύστημα συλλογής της ισχύος και μια γραμμή μεταφοράς της στη στεριά. Το κόστος της συλλογής ισχύος εξαρτάται από τη χωροθέτηση του πάρκου, το μέγεθος και τον αριθμό των μηχανών, ενώ το κόστος της διασύνδεσης εξαρτάται από το συνολικό επίπεδο ισχύος και από την απόσταση του πάρκου απ την ακτή. Οι τεχνικές επιλογές για τη μεταφορά είναι η χρήση AC ή DC συστήματος. Η μεταφορά με σύστημα AC εμπεριέχει μεγάλες ηλεκτρικές απώλειες που αυξάνονται με το μήκος του καλωδίου και την τάση. Απ την άλλη η χρήση DC συστήματος αποφεύγει τις ηλεκτρικές απώλειες αλλά απαιτεί ακριβό εξοπλισμό μετατροπής στο αιολικό πάρκο και στο συμβατικό σταθμό στην ακτή. Άρα η χρήση



AC είναι πιο επωφελής για κοντινές αποστάσεις ενώ η χρήση DC για μεγαλύτερες αποστάσεις. (1)

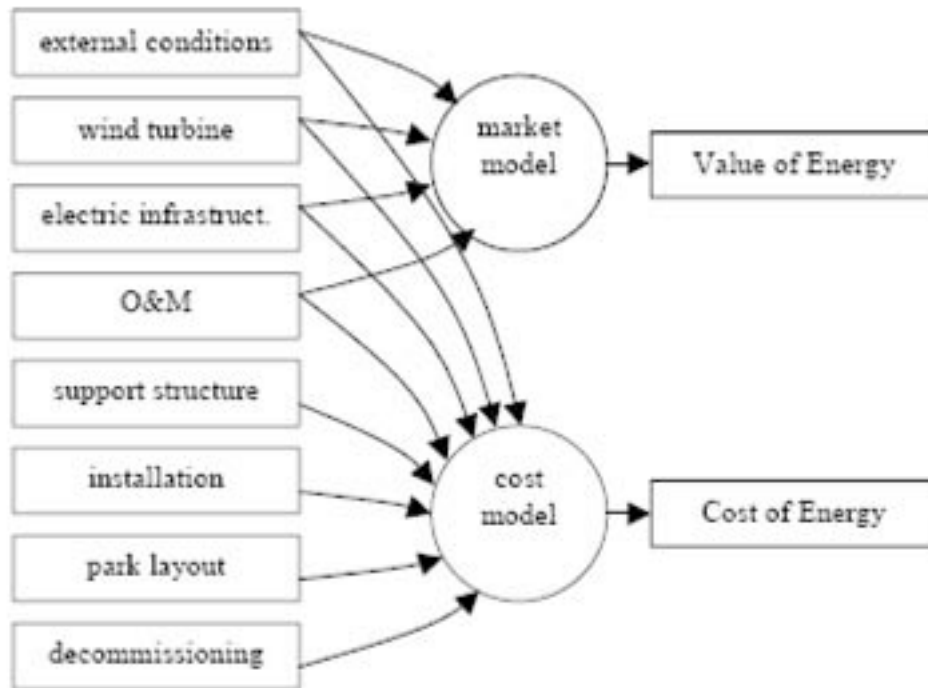
## 7.6 Το κόστος αλληλοσύνδεσης των ανεμογεννητριών (συνολική ισχύς)

Όπως είναι φανερό σημαντικός παράγοντας στην απόδοση του αιολικού πάρκου αποτελεί ο ρυθμός ανάπτυξης του ομόρρου του ανεμοκινητήρα και η ενεργειακή του κατάσταση όταν αλληλεπιδρά με το κατάντι ανεμοκινητήρα. Αυξάνοντας το διάστημα μεταξύ των ανεμογεννητριών, μειώνεται η αεροδυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ των πτερυγίων των ανεμοκινητήρων αλλά επίσης αυξάνεται το κόστος της εσωτερικής διασύνδεσης μέσα στο πάρκο. Παραδείγματος χάριν, σε πάρκο απόστασης 15Km από την ακτή και απόσταση μεταξύ των Α/Γ 10 διαμέτρων, το κόστος αλληλοσύνδεσης των ανεμογεννητριών ήταν περίπου διπλάσιο από το κόστος μεταφοράς.

Αυτό που εξετάζεται είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ του σχεδιασμού της μηχανής και της αξιοπιστίας, της προσβασιμότητας και της συλλογής ισχύος. Τα γενικά συμπεράσματα είναι:

- Η βελτιωμένη αξιοπιστία της μηχανής μειώνει το κόστος λειτουργίας και συντήρησης και αυξάνει τη διαθεσιμότητα και την ενεργειακή απόδοση. Και άρα μειώνει το μοναδιαίο κόστος.
- Περισσότερες επισκέψεις για συντήρηση αυξάνουν το κόστος, μειώνουν τις αστοχίες, αυξάνουν τη διαθεσιμότητα και τη συλλεγόμενη ενέργεια
- Κινούμενοι περισσότερο υπεράκτια, αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου και το αιολικό δυναμικό αλλά μειώνεται η διαθεσιμότητα λόγω των πιο συχνών έντονων καιρικών φαινομένων (καταιγίδες, θύελλες κλπ).
- Με τα σχέδια της προηγμένης τεχνολογίας αυξήσεις στο ενεργειακό δυναμικό αναιρούνται από τις μειώσεις στη διαθεσιμότητα και έτσι δεν υπάρχει κανένα πλεονέκτημα στη μετακίνηση σε λιγότερο προσβάσιμες περιοχές που έχουν όμως μεγαλύτερες ταχύτητες ανέμου. Με βελτιωμένη αξιοπιστία, η διαθεσιμότητα είναι λιγότερο ευαίσθητη από τη προσβασιμότητα. (1)

Στο σχήμα παρακάτω παρουσιάζεται το ολοκληρωμένο μοντέλο κόστους για ένα αιολικό πάρκο.



Σχήμα 7-1. Ολοκληρωμένο μοντέλο κόστους για ένα αιολικό πάρκο.

## 7.7 Οικονομικά μιας υπεράκτιας ανάπτυξης

Παρά τα μη ενθαρρυντικά αποτελέσματα των μελετών της δεκαετίας του '80, το ενδιαφέρον για την υπεράκτια αιολική ενέργεια παρέμεινε έντονο, εξαιτίας του τεράστιου διαθέσιμου αιολικού δυναμικού. Στα μέσα της δεκαετίας του '90, κατασκευάστηκαν τρία πειραματικά υπεράκτια αιολικά πάρκα. Τα πάρκα αυτά ήταν στο Vindeby της Ολλανδίας, το Lely επίσης στην Ολλανδία και το Tuno-knob. Από μηχανολογικής άποψης, και τα τρία πάρκα αποδείχτηκαν εντυπωσιακά επιτυχής και η αξιοποίηση του υπεράκτιου ανέμου έδειξε ότι μπορεί να γίνει πράξη. Για τα έργα του Vindeby και του Lely δεν έχουμε διαθέσιμες λεπτομερείς πληροφορίες, αλλά φαίνεται ότι οι διαχειριστές του πάρκου μπορούν να αποζημιώσουν τις δαπάνες τους πουλώντας την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στην αγορά, καθώς και με σημαντικές κρατικές επιδοτήσεις.

Σήμερα πιστεύουμε ότι η υπεράκτια αιολική ενέργεια μπορεί να κατορθώσει επίπεδα κόστους συγκρίσιμα με αυτά των χερσαίων και που είναι γενικά αποδεκτά με το κόστος της παραγόμενης ενέργειας από άλλα καύσιμα. (1)

### 7.7.1 Εκτίμηση του κόστους

Η εκτίμηση του κόστους σε ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο περιλαμβάνει:

- Καθορισμό του κόστους της επένδυσης αυτού του αιολικού πάρκου των 99MW στη παράκτια περιοχή μπροστά απ την ακτή Egmond aan Zee της Δανίας.
- Καθορισμός της χωροθέτησης των ανεμογεννητριών μέσα στο πάρκο, της αποδοτικότητας και της ετήσιας παραγωγής του πάρκου σ' αυτήν την υπεράκτια θέση (υποθέτοντας 7.5 m/s στο ύψος των 10m)
- Καθορισμός της δυνατότητας πρόσβασης στο αιολικό πάρκο (accessibility) χρησιμοποιώντας τα κριτήρια:
- Η πρόσβαση στις ανεμογεννήτριες δεν είναι δυνατή για ταχύτητες ανέμου πάνω από 10m/s
- Ο υπολογισμένος χρόνος μη δυνατής πρόσβασης θα πολλαπλασιαστεί με έναν παράγοντα 2.5 λόγω των κυμάτων που προκαλούνται από τους ισχυρούς ανέμους
- Καθορισμός της διαθεσιμότητας (availability) του αιολικού πάρκου στις περιπτώσεις που:
  - Κάθε ανεμογεννήτρια χρειάζεται μια προγραμματισμένη ετήσια επίσκεψη για service που απαιτεί τη διακοπή λειτουργίας για 3 ημέρες (72 ώρες)
  - Κάθε ανεμογεννήτρια υπόκειται σε δύο μη αναμενόμενες διακοπές λειτουργίες μέσα στο χρόνο, όπου απαιτείται επισκευή (repair) ή πρόσθετη συντήρηση (maintenance). Ο απαιτούμενος χρόνος είναι πάλι 72 ώρες.
- Καθορισμός του κόστους KWh χρησιμοποιώντας τις παρακάτω υποθέσεις:
  - Το κόστος συντήρησης είναι το 2.5% του συνολικού κόστους επένδυσης ανά χρόνο.
  - Η ετήσια απόσβεση είναι περίπου ίση με το 5% της αρχικής επένδυσης.
  - Η διάρκεια ζωής της επένδυσης του αιολικού πάρκου είναι 20 έτη.
 Επίσης:
- Καθορισμός του 'συντελεστή ισχύος' και της καμπύλης διάρκειας του αιολικού πάρκου. (6)

### 7.7.2 Το ρίσκο της επένδυσης

Η μεγάλη κλίμακα υπεράκτια αιολική ενέργεια περιλαμβάνει κάποια επικίνδυνα στοιχεία που μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά την παραγωγή και ως εκ τούτου και τα έσοδα. Επίσης δεν υπάρχει ακόμα αρκετή εμπειρία με τα υπεράκτια αιολικά πάρκα για την εκτίμηση της τεχνολογικής διαθεσιμότητας λόγω της όχι πάντα εύκολης πρόσβασης για επιδιόρθωση. Με τη πρόοδο όμως της τεχνολογίας (βασισμένη στη προηγούμενη εμπειρία) μπορούν να αυξήσουν τη τεχνική διαθεσιμότητα και ως εκ τούτου την ικανότητα παραγωγής. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι αρκετά δύσκολο να προβλεφθεί. Καμία εγγύηση δε μπορεί να

δοθεί σχετικά με τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού του αιολικού πάρκου στο δύσκολο υπεράκτιο περιβάλλον. (6) (16)

### 7.7.3 Χρηματοδότηση και ασφάλεια ενός υπεράκτιου έργου μεγάλης κλίμακας

Η επένδυση ενός υπεράκτιου έργου θεωρείται υψηλού κινδύνου επένδυση λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του. Επομένως, πρέπει να εξεταστεί πολύ προσεκτικά το πώς θα ασφαλίσουμε ένα τέτοιο πάρκο.

Οι τεχνολογίες ανανεώσιμης ενέργειας σήμερα στην ελεύθερη αγορά αντιμετωπίζουν σημαντικά εμπόδια όπως:

- Υψηλό κόστος κεφαλαίου
- Έλλειψη καλής υποδομής δικτύου
- Τεχνικά προβλήματα που συνδέονται με τη γεωγραφική διανομή του διαθέσιμου δυναμικού, και η τυχαία φύση της πρωτογενούς ενέργειας (άνεμος)
- Νομοθετικά εμπόδια τη λήψη αδειών κατασκευής και λειτουργίας

Απ την άλλη υπάρχει ένα ευρύ φάσμα σε όλη την Ευρώπη μηχανισμών που υποστηρίζουν την ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παραδείγματος χάριν στη Γερμανία τα σταθερά δασμολόγια δε βασίζονται στην αγορά αλλά είναι πολύ αποτελεσματικά στη τοπική βιομηχανία. (18)

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας από τα χερσαία αιολικά πάρκα μειώθηκε σταθερά τη διάρκεια των τελευταίων χρόνων καθιστώντας το συγκρίσιμο με αυτό από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής. Οι μειώσεις αυτές των τιμών έχουν επιτευχτεί κυρίως μέσω των χαμηλότερων κοστών κεφαλαίου των ανεμογεννητριών.

Συνοψίζοντας μειώσεις δαπανών μπορούν τελικά να επιτευχθούν με:

- Μεγαλύτερης κλίμακας αιολικών πάρκων.
- Βελτιωμένο σχεδιασμό του ανεμοκινητήρα για προσαρμογή στο υπεράκτιο περιβάλλον
- Νέες τεχνικές έδρασης
- Ανάλογα με τη κλίμακα του έργου και με τη τεχνική διασύνδεσης (άμεση μεταφορά) μειώνεται το κόστος του υποβρύχιου καλωδίου και της διασύνδεσης.

Αυτή τη στιγμή τα περισσότερα υπεράκτια πάρκα βρίσκονται στη βαλτική θάλασσα. Τα χαρακτηριστικά του υπεράκτιου περιβάλλοντος, το βάθος του νερού και η απόσταση από την ακτή οδηγούν σε υψηλότερη επένδυση και σε μεγαλύτερο κόστος λειτουργίας. Η οικονομική εκμετάλλευση του τεράστιου αιολικού δυναμικού απαιτεί νέους σχεδιασμούς ανεμοκινητήρων.

Οι δαπάνες αυτές μπορούν να μειωθούν μεγαλώνοντας τη κλίμακα μεγέθους του πάρκου. Σε ένα μεγάλης κλίμακας αιολικό πάρκο οι σχετικές δαπάνες για την ηλεκτρική του υποδομή, τη διασύνδεση του και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης μειώνονται σημαντικά.

Σε αυτό το κομμάτι διερευνούνται οι δυνατότητες μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης σχεδιασμού και της οικονομοτεχνικής βελτιστοποίησης. Η μελέτη έχει γίνει απ τη DOWEC (Dutch Wind Energy Converter) και σκοπό έχει την ανάπτυξη των αρχών και της τεχνολογίας προκειμένου η εφαρμογή ενός υπεράκτιου αιολικού πάρκου μεγάλης κλίμακας να είναι οικονομικά εφικτή.

Το πρότυπο πάρκο αποτελείται από ανεμογεννήτριες των 6MW συνολικού μεγέθους 500MW, σε απόσταση από την ακτή 20km, 30km και 60km και για βάθος νερού από 15m έως 30m. Οι τοπικές συνθήκες και τα στοιχεία του ανέμου και των κυμάτων έχουν ληφθεί από τη βάση δεδομένων NESS. (14) (18)

#### Ολοκληρωμένη σχεδιαστική προσέγγιση

Εδώ συναπαρτίζεται η αξιολόγηση όλων των διαφορετικών επιλογών σχεδιασμού. Αυτό υπονοεί ότι ο ανεμοκινητήρας αποτελεί μία από τις συνιστώσες του συνολικού αιολικού πάρκου και ότι λαμβάνονται υπόψη οι αλληλεπιδράσεις με τα άλλα τμήματα όπως την ηλεκτρική υποδομή, τη κατασκευή υποστήριξης κ.α. η αξιολόγηση της κάθε επιλογής βασίζεται στον υπολογισμό του κόστους της παραγόμενης ενέργειας σε κάθε περίπτωση. Ο υπολογισμός περιλαμβάνει το κόστος εγκατάστασης, λειτουργίας, συντήρησης και του αφοπλισμού/αποξήλωσης. Ζητήματα όπως ο κίνδυνος ανάπτυξης και ο χρόνος ανάπτυξης είναι αρκετά δύσκολα και επομένως μελετούνται ξεχωριστά. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται μια τέτοια ολοκληρωμένη μέθοδος σχεδιασμού. Στο τέλος βέβαια εκτός από το κόστος ενέργειας μελετάται και η τιμή αυτής της παραγόμενης ενέργειας.

Είναι σαφές ότι η ανωτέρω περιγεγραμμένη σχεδιαστική προσέγγιση απαιτεί λεπτομερή εμπειρία και τη γνώση πάνω σε ένα ευρύ τομέα επιστημονικής γνώσης.

## Οργανωμένη προσέγγιση σχεδιασμού

Ο σχεδιασμός του αιολικού πάρκου και των επιμέρους συνιστωσών του διαιρείται σε διάφορα στάδια. Στην αρχική φάση του σχεδιασμού γίνεται μία λειτουργική ανάλυση και επιλέγονται οι κύριες λειτουργικές αρχές του συστήματος. Στη φάση του σχεδιασμού του συστήματος τα κύρια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά όλων των συνιστωσών του συστήματος σχεδιάζονται λεπτομερώς. Οι φάσεις αυτές ισχύουν και σε επίπεδο αιολικού πάρκου και σε επίπεδο ανεμογεννητριών και σε κάθε μία ξεχωριστά εκτιμάται και το κόστος (19)

## Περιγραφή του μοντέλου δαπανών

Αδω έχουμε πληροφορίες από διάφορους τομείς, χρησιμοποιώντας υπό-μοντέλα. Επομένως, γίνεται μια καταμερισμό του κόστους και της ενεργειακής απόδοσης για να ταιριάζει με αυτά τα υπομοντέλα, με σκοπό τη δημιουργία του συνολικού μοντέλου δαπανών. Αυτή η κατανομή χρησιμοποιείται έπειτα για τον υπολογισμό LPC (Levelised Production Costs)

Η κατανομή των δαπανών είναι απλά ένας καταμερισμός του κόστους της κάθε συνιστώσας και δραστηριότητας. Αυτό βοηθάει έπειτα στον υπολογισμό εκ νέου του συνολικού κόστους ως άθροισμα των συνιστωσών, επιτυγχάνοντας την ακρίβεια που συνδέεται με τα υπό μοντέλα. (19)

Το κόστος και η αποδοτικότητα της κάθε συνιστώσας είναι συνάρτηση του σχεδιασμού. Λόγω των αλληλεπιδράσεων στο αιολικό πάρκο, κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του, υπάρχουν επίσης αλληλεπιδράσεις και στη διαδικασία-αξιολόγηση του σχεδιασμού ( π.χ. εκτίμηση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης και της διαθεσιμότητας). Ο σχεδιασμός μπορεί να έχει διάφορα επίπεδα ολοκλήρωσης, αλλά συνήθως οι αλληλεπιδράσεις περιλαμβάνονται στη διαδικασία του σχεδιασμού υπερβαίνοντας τα όρια των συνιστωσών του καταμερισμού.

Το μοντέλο αυτό των δαπανών έχει εφαρμοστεί με 4 διαφορετικά ιεραρχικά επίπεδα. Στο υψηλότερο επίπεδο οι συνιστώσες τού κόστους είναι:

- Σχεδιασμός του αιολικού πάρκου
- Χαλύβδινα τμήματα (hardware), συμπεριλαμβανομένης και της χερσαίας μεταφοράς
- Συναρμολόγηση, μεταφορά και εγκατάσταση
- Ετήσια λειτουργία και συντήρηση
- Επανεξοπλισμός και λεπτομερής επιθεώρηση
- Αποξήλωση/ αφοπλισμός

Τα χαλύβδινα τμήματα διαιρούνται περαιτέρω σε:

- Μεταλλάκτης υπεράκτιας αιολικής ενέργειας (OWEC)

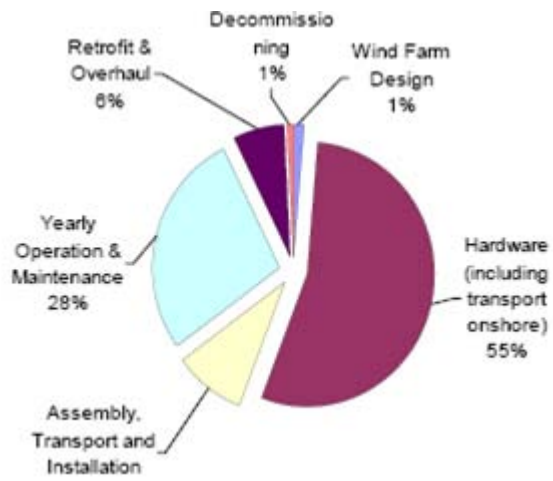
- Σύστημα συλλογής ηλεκτρικής ενέργειας
- Σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην ακτή
- Πύργος
- Αγορασμένος βοηθητικός εξοπλισμός
- Χερσαία μεταφορά
- Προ-συναρμολόγηση
- Χερσαίες εγκαταστάσεις

Μαζί με το κόστος καθορίζονται και οι παράμετροι απόδοσης της κάθε συνιστώσας. Και το κόστος και οι παράμετροι απόδοσης μπορούν να οριστούν ως συνάρτηση:

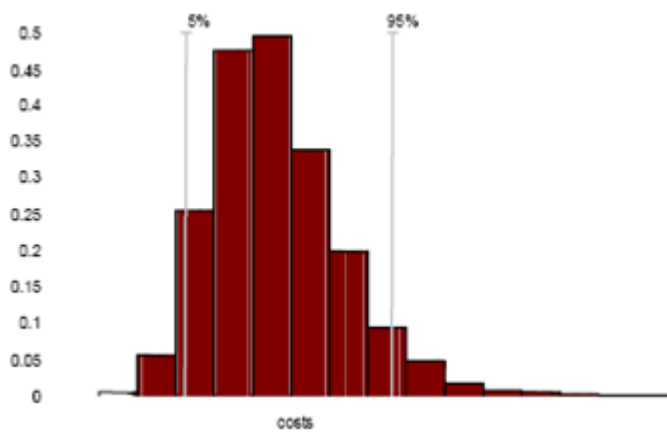
- Των κύριων παραμέτρων διαστασιολόγησης, όπως το μέγεθος του πάρκου και το μέγεθος της ανεμογεννήτριας
- Των κύριων εξωτερικών συνθηκών που επικρατούν
- Άλλων εισαγόμενων παραμέτρων (6) (3)

#### Εφαρμογή του μοντέλου δαπανών

Ο στόχος της μελέτης είναι να αξιολογηθεί η δυνατότητα πραγματοποίησης και τα οικονομικά των διαφόρων ολοκληρωμένων αρχών για ένα υπεράκτιο αιολικό πάρκο. Η αξιολόγηση έχει να κάνει με το κόστος της παραγόμενης ενέργειας, τη τιμή της ενέργειας και το κινδύνους μιας τέτοιας επένδυσης. Το μοντέλο αυτό δαπανών χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί το απόλυτο κόστος ανά KWh. Η απόλυτη αξία των δαπανών όμως επηρεάζεται κατά ένα μεγάλο μέρος από πολυάριθμους αβέβαιους ή άγνωστους παράγοντες για αυτό και τα αποτελέσματα κάθε επιλογής σχεδιασμού συγκρίνονται με ένα βασικό σχέδιο. Το σχέδιο αυτό συμμορφώνεται με διάφορους περιορισμούς προκειμένου να χρησιμεύσει ως μία καλή αναφορά για τις διάφορες περιπτώσεις σχεδιασμού που εξετάζουμε. Χαρακτηρίζεται ως σχέδιο χαμηλού κινδύνου και πρέπει να είναι βασισμένο όσο το δυνατόν περισσότερο στην υπάρχουσα τεχνολογία και εξοπλισμό και συγχρόνως να είναι όσο το δυνατόν πιο βέλτιστος συνδυασμός. (16) (6)



Σχήμα 7-2. Ανάλυση του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 7-3. Κατανομή του ενεργειακού κόστους.



## 8. Περιβαλλοντικές και κοινωνικές επιπτώσεις

### 8.1 Γενικά

Όπως γνωρίζουμε σήμερα, εν όψη της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής, η αιολική ενέργεια είναι μία από τις πιο καθαρές και πιο ουδέτερες περιβαλλοντικά πηγές ενέργειας. Τα αιολικά πάρκα χρησιμοποιούν μόνο την κίνηση του ανέμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οπότε δεν προκύπτουν καυσαέρια από καύση ορυκτών καυσίμων όπως είναι τα παράγωγα του πετρελαίου και το φυσικό αέριο που συμβαίνει με τους συμβατικούς σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Αυτό συμβάλλει στον αγώνα κατά της υπερθέρμανσης του πλανήτη λόγω της μείωσης των εκπομπών του CO<sub>2</sub> καθώς και άλλων αέριων ρύπων, όπως είναι το SO<sub>x</sub> ή/και NO<sub>x</sub>.

Στην τοποθεσία του υπεράκτιου αιολικού πάρκου βεβαίως υπάρχει περιβαλλοντική αλληλεπίδραση με τη θαλάσσια ζωή. Ενδέχεται, λοιπόν, το αιολικό πάρκο και οι υποδομές του να επηρεάσουν το οικοσύστημα της περιοχής. Αν και δεν είναι εμφανής κάποιος άμεσος κίνδυνος για την θαλάσσια ζωή, μπορεί να επηρεάζονται οι διαδρομές των ψαριών και των θαλάσσιων θηλαστικών, ενώ υπάρχει το ενδεχόμενο διατάραξης όλου του οικοσυστήματος. Ένας εμφανής άμεσος κίνδυνος είναι μόνο αυτός που αφορά τα πτηνά και τα αποδημητικά πουλιά που κατά καιρούς διέρχονται από τις τοποθεσίες αυτές.

Στο παρόν λοιπόν κεφάλαιο εξετάζονται οι επιπτώσεις που μπορεί να έχει η εγκατάσταση και η λειτουργία ανεμογεννητριών σε υπεράκτια αιολικά πάρκα και κυρίως οι επιδράσεις στα θαλάσσια θηλαστικά, στην αποδημία και την αναπαραγωγή των πουλιών, στα ψάρια και τη θαλάσσια χλωρίδα. Καθώς επίσης και οι επιδράσεις στον άνθρωπο από τη φυσική παρουσία των ανεμογεννητριών και την οπτική όχληση. Όλα αυτά περιγράφονται στο πίνακα που ακολουθεί, αναλυτικά για το κάθε στάδιο ανάπτυξης του υπεράκτιου αιολικού πάρκου. (6) (4) (17)

### 8.2 Πιθανές βασικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υπεράκτιων αιολικών πάρκων και του περιβάλλοντος στη θέση εγκατάστασής τους

Φάση ανάπτυξης	Δραστηριότητα	Μηχανισμός επίδρασης	Αλληλεπιδράσεις με το φυσικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με το βιολογικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με την οικολογία (οικολογικοί χαρακτηρισμοί, φυσική κληρονομιά, ανθρωπογενής κληρονομιά, κλπ.)	Αλληλεπιδράσεις με το κοινωνικό-οικονομικό περιβάλλον
Προκαταρκτικές εργασίες	Έρευνα	Όχληση του πιθμένα λόγω της δειγματοληψίας	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία προβλεπόμενη βασική αλληλεπίδραση	Διατάραξη της συμπεριφοράς των θαλάσσιων θηλαστικών	Μπορεί να απασχοληθούν τοπικοί αναδοχοί και εμπνεργούμενοι για να διεξήκουν και να υποστηρίξουν βασικές έρευνες, π.χ. ως χείριστές σκαφών, σιμβούλοι και δύτες, κλπ.
		Ηχητική όχληση λόγω αυξημένης δραστηριότητας των σκαφών και έρευνας μέσω σόναρ / σεισμικής έρευνας	Μεγάλες περιοχές των εκβολών του ποταμού μπορούν να βυθοκορηθούν επιδρώντας στη μορφολογία του πιθμένα και αυξώντας την θολότητα των υδάτων.	Καμία προβλεπόμενη βασική αλληλεπίδραση	Μπορεί να επηρεαστούν τα προστατευόμενα μεταναστευτικά είδη ψαριών και τα προστατευόμενα αρπακτικά είδη πουλιών.	Καμία προβλεπόμενη βασική αλληλεπίδραση
Προκαταρκτικές εργασίες	Υποδομή κατασκευής και εγκατάστασης	Φυσική παρουσία σκαφών και σχετικών εξοπλισμών/ δομών	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Πιθανή όχληση για τα θαλάσσια θηλαστικά	Πιθανός αυξημένος κίνδυνος πλοήγησης για άλλους χρήστες της θάλασσας
		Διατάραξη του πιθμένα και ηχορύπανση μέσω της συσσώρευσης	Εντοπισμένη επίδραση στην μορφολογία του πιθμένα – θα δημιουργηθούν εκπτώσεις στον πιθμένα. Αυτές μπορεί στη συνέχεια να επεκταθούν σε μια ευρύτερη περιοχή.	Άμεση εντοπισμένη επίπτωση στους βιοτόπους και στα είδη του πιθμένα	Ο υποβρύχιος θόρυβος μπορεί να επηρεάσει τα είδη των θαλάσσιων θηλαστικών για σημαντικές αποστάσεις	Τα άγνωστα σκάφη και οι υπέρ κατασκευές που συνδέονται με την επίταξη κατασκευή και εγκατάσταση θα είναι ορατά εντός της τοπικής θαλασσογραφίας για εκτεταμένες χρονικές περιόδους
Κατασκευή και εγκατάσταση	Υποδομή κατασκευής και εγκατάστασης	Διατάραξη του πιθμένα λόγω της εγκατάστασης των θεμελιών	Τροποποίηση του ύψους των κυμάτων	Οι εγκαταστάσεις μπορεί να λειτουργήσουν ως τεχνητοί σκάτελοι και διατάξεις συνάντησης ψαριών	Πιθανή όχληση για τα θαλάσσια θηλαστικά	Πιθανός αυξημένος κίνδυνος πλοήγησης για άλλους χρήστες της θάλασσας
		Διατάραξη του πιθμένα και άλλων χρησιών του θαλάσσιου χώρου λόγω της εγκατάστασης υποθαλάσσιων καλωδίων	Αλλαγές στην παρουσία συμπεριφορά και στο χαρακτήρα της παλίρροιας κατόπιν της εγκατάστασης	Παρέμβαση στα πρότυπα μετανάστευσης	Άμεση εντοπισμένη επίπτωση στους βιοτόπους και στα είδη του πιθμένα	Πιθανός αυξημένος κίνδυνος πλοήγησης για άλλους χρήστες της θάλασσας

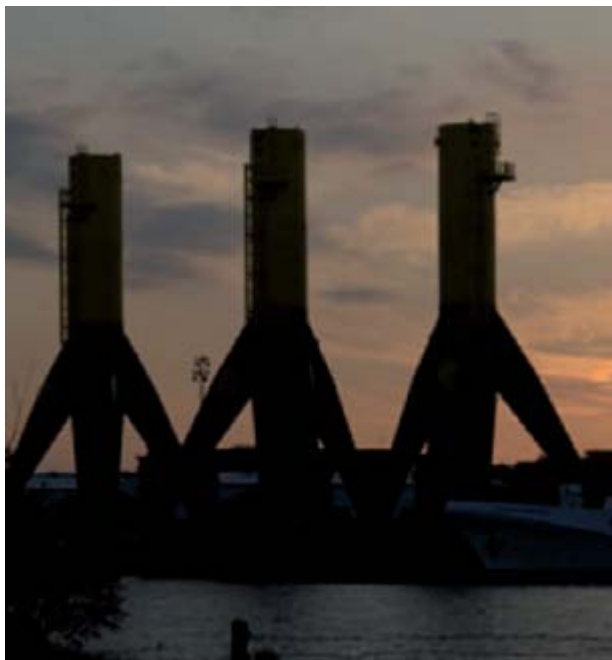
Φάση ανάπτυξης	Δραστηριότητα	Μηχανισμός επίδρασης	Αλληλεπιδράσεις με το φυσικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με το βιολογικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με την οικολογία (οικολογικοί χαρακτήρισμοί, φυσική κληρονομιά, ανθρωπογενής κληρονομιά, κλπ.)	Αλληλεπιδράσεις με το κοινωνικό-οικονομικό περιβάλλον	
Εκκίνηση λειτουργίας του έργου, λειτουργία και συντήρηση	Εγκατάσταση των ανεμογεννητριών	Φυσική παρουσία δομών επάνω από την επιφάνεια	Δημιουργία 'ομίχρου' κατά την εγκατάστασή τους	Συγκρούση μεταξύ πτηνών (τόσο αποδημητικών όσο και ενδημητικών) και πτερυγίων των ανεμογεννητριών	Μπορούν να επηρεαστούν τα προστατευόμενα είδη πτηνών	Αλλαγές στον χαρακτήρα της τοπογραφίας και της θαλάσσογραφίας Οπτική παρεμβάση Παρέμβαση στην πρόσβαση σε ψυχολογικές σχετικές με την ναυσιπλοία δραστηριότητες Πιθανός αυξημένος κίνδυνος πλοήγησης για άλλους χρήστες της θάλασσας Δημιουργία ζωνών αποκλεισμού σε λοιπούς χρήστες της θάλασσας συμπεριλαμβανομένων και των ψαράδων	
		Κίνηση των πτερυγίων της ανεμογεννητριας	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Κίνδυνος σύγκρουσης με πτηνά	Μπορούν να επηρεαστούν τα προστατευόμενα είδη πτηνών	Παρέμβαση με εγκαταστάσεις ραντάρ, τηλεοπτικών και τηλεράσεων	
		Παραγωγή θορύβου από τις ανεμογεννητρίες	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Εντοπισμένη αποφυγή από μερικά είδη ψαριών	Πιθανή όχληση των θαλάσσιων θηλαστικών για σημαντικές αποστάσεις - μπορεί να παρατηρηθεί εντοπισμένη αποφυγή	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση (που να εξαρτάται από την απόσταση από την ακτή)	
		Μείωση των αερίων του θερμοκηπίου και των καυσαερίων από την καύση ορυκτών καυσίμων	Μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και των αερίων του θερμοκηπίου που εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα λόγω ανθρώπινων δραστηριοτήτων	Εσα μειωθούν οι επιπτώσεις οικολογικού χαρακτήρα που προκύπτουν από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και την ατμοσφαιρική ρύπανση	Εσα μειωθούν οι επιπτώσεις οικολογικού χαρακτήρα που προκύπτουν από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και την ατμοσφαιρική ρύπανση	Παραγωγή καθαρής ενέργειας που θα βοηθήσει να εκπληρωθούν εθνικοί/διεθνείς στόχοι	
		Μετάδοση ηλεκτρικής ενέργειας μέσω υποθαλάσσιες καλωδίων	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία (ΗΜΠ) μπορεί να επηρεάσουν τα θαλάσσια θηλαστικά που περνούν κοντά από την εγκατάσταση	Ηλεκτρική, μαγνητική παρεμβολή και επιπτώσεις από την θερμότητα, ως αποτέλεσμα των λειτουργικών γραμμών μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας	
		Αυξημένη δραστηριότητα σκαφών για συντήρηση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Πιθανή όχληση για τα θαλάσσια θηλαστικά	Κανονική πρόσθετη δραστηριότητα σκαφών εντός της τοπικής θαλάσσογραφία
		Τοπικές επιχειρήσεις και ευκαιρίες απασχόλησης	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Πιθανές ευκαιρίες απασχόλησης για τους ντόπιους κατοίκους και οφέλη για την τοπική οικονομία
		Χημική ρύπανση	Τοπικές/έκτεταμένες αλλαγές στην χημεία των υδάτων και των ιζημάτων	Τοπικές/έκτεταμένες αλλαγές στην χημεία των υδάτων και των ιζημάτων	Τα είδη και οι βιότοποι μπορεί να καταστραφούν και να βλαφτούν από την χημική ρύπανση	Τα είδη και οι βιότοποι μπορεί να καταστραφούν και να βλαφτούν από την χημική ρύπανση	Η χημική ρύπανση μπορεί επηρεάσει άλλους χρήστες των εκβολών παραδείγματος χάριν γλυκοκαρμελιτές, τουρίστες και ναυτικούς κλπ.
		Πετρελαϊκή ρύπανση	Παροδικές κηλίδες πετρελαίου στα ύδατα επιφανείας και κίνδυνος για μακροπρόθεσμη ρύπανση του πυθμένα και των ακτογραμμών.	Παροδικές κηλίδες πετρελαίου στα ύδατα επιφανείας και κίνδυνος για μακροπρόθεσμη ρύπανση του πυθμένα και των ακτογραμμών.	Τα είδη και οι βιότοποι μπορεί να καταστραφούν και να βλαφτούν από την πετρελαϊκή ρύπανση	Η πετρελαϊκή ρύπανση μπορεί επηρεάσει άλλους χρήστες των εκβολών παραδείγματος χάριν γλυκοκαρμελιτές, τουρίστες και ναυτικούς κλπ.	Η πετρελαϊκή ρύπανση μπορεί επηρεάσει άλλους χρήστες των εκβολών παραδείγματος χάριν γλυκοκαρμελιτές, τουρίστες και ναυτικούς κλπ.
		Απίωλα εξοπλισμού /	Διαταραχή του πυθμένα από βυθίζομενα συντρίμια	Αλλαγές στην κατανομή του πυθμένα και τη σύνθεση των ιζημάτων	Εντοπισμένη διάσπαση στα είδη της κοίτης του ποταμού και τους βιότοπους.	Προσβάσιμος κίνδυνος για την ναυσιπλοία, διατάραξη των ιχθυοσπιτιών	Προσβάσιμος κίνδυνος για την ναυσιπλοία, διατάραξη των ιχθυοσπιτιών

Φάση ανάπτυξης	Δραστηριότητα	Μηχανισμός επίδρασης	Αλληλεπιδράσεις με το φυσικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με το βιολογικό περιβάλλον	Αλληλεπιδράσεις με την οικολογία (οικολογικοί χαρακτηρισμοί, φυσική κληρονομιά, ανθρωπογενής κληρονομιά, κλπ.)	Αλληλεπιδράσεις με το κοινωνικό-οικονομικό περιβάλλον
Παροπλισμός	δομικών συστατικών	Ρύπανση των επιφανειακών υδάτων και των ακτογραμμών από επιπλέοντα συντρίμια	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Διάσπαση στους βιότοπους των ακτογραμμών λόγω πνιγμονής και καταστροφή των ειδών μέσω της λήψης τροφή/εμπλοκής	Κίνδυνος απειλευθέρωσης πετρελαίου, καυσίμων και άλλων ρύπων Κίνδυνος απειλευθέρωσης ουσιών (π.χ. υδραυλικά ρευστά)
	Συνολική απομάκρυνση της εγκατάστασης	Επιναφορά στις βασικές συνθήκες	Διασπορά συσσωρευμένων ζημιών γύρω από την εγκατάσταση Απώλεια και περιοχές 'ομόρφου' γύρω από την εγκατάσταση Απώλεια οποιωνδήποτε καταπραυντικών επιδράσεων γύρω από την εγκατάσταση (τρέχουσα κίνηση και κυματική δράση)	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Πιθανή διατάραξη των οικοσυστημάτων που έχουν καθιερωθεί και προσαρμόσει στις τύρο της εγκατάστασης υδρογραφικές συνθήκες Οι επιδράσεις ΗΜΠ στα είδη των ψαριών θα εξαλειφθούν Τα προστατευόμενα είδη πτηνών δεν επηρεάζονται πλέον από την παρουσία των κινήτων μερών της ανεμογεννήτριας	Απομάκρυνση των κινδύνων πλοήγησης Απομάκρυνση των 'ζωνών αποκλεισμού'
	Αντικατάσταση των ανεμογεννητριών	Αυξημένη δραστηριότητα σκαφών Τοπικές επιχειρήσεις και ευκαιρίες απασχόλησης	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Πιθανή προσωρινή όχληση των θαλάσσιων θηλαστικών	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση
			Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση	Καμία βασική προβλεπόμενη αλληλεπίδραση		Πιθανά οικονομικά οφέλη από την αξιοποίηση των τοπικών πόρων, των εταιριών υποστρώσεως και των υπηρεσιών



## 9. Συμπεράσματα

- Μεγάλες τεχνολογικές αλλαγές είναι απαραίτητες για τη πλήρη εξέλιξη του τομέα της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας.
- Η επίτευξη των 40 GW υπεράκτιας αιολικής ενέργειας μέχρι το 2020 στην Ευρώπη δεν θα είναι εφικτή χωρίς δραματικές αλλαγές στη τεχνολογία και τις προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται σήμερα, σύμφωνα με τη νέα αναφορά της EWEA.
- Το συνέδριο της Στοκχόλμης που πραγματοποιήθηκε μες στο 2009, προειδοποίησε ότι θα είναι μια πρόκληση για την βιομηχανία της υπεράκτιας αιολικής ενέργειας να καταφέρει αυτό το στόχο, καθώς οι ικανότητες κατασκευής και η σημερινή πρόοδος δεν επαρκούν για κάτι τόσο μεγάλο.
- Με μόλις 1.6 GW εγκατεστημένο σήμερα θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο τομέας είναι ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Η υπεράκτια ενέργεια πρέπει να ληφθεί υπόψη σαν ένας ξεχωριστός και ευδιάκριτος τομέας από τη καθιερωμένη χερσαία βιομηχανία.
- Ο κύριος σκοπός στα επόμενα χρόνια θα πρέπει να είναι η τυποποίηση των διαδικασιών εγκατάστασης και η ανάπτυξη αποκλειστικών υπεράκτιων ανεμογεννητριών.
- Οι έξι κύριοι κατασκευαστές εφοδιάζουν την υπεράκτια αγορά σήμερα, κυρίως με προσαρμογές των χερσαίων σχεδιασμών. Αφού το υπεράκτιο περιβάλλον μπορεί να επιτρέψει πιο χαλαρούς περιορισμούς στο σχεδιασμό των μηχανών, όπως σε επίπεδο αισθητικό και θορύβου, οι θαλάσσιες συνθήκες, η διάβρωση και η αξιοπιστία είναι τα ζητήματα που δημιουργούν τις νέες προκλήσεις στο τομέα.
- Αυτό μακροπρόθεσμα θα οδηγήσει σε μια σημαντική τροποποίηση των χερσαίων μηχανιών και ουσιαστικά σε ανεμογεννήτριες ειδικά σχεδιασμένες για το υπεράκτιο περιβάλλον.
- Αυτή η τάση απεικονίζεται στη νέα γενιά υπεράκτιων ανεμοκινητήρων που έρχονται στην αγορά να αντικαταστήσουν τις τυπικές μηχανές των 2-3 MW. Αυτοί οι μεγαλύτεροι σχεδιασμοί (της τάξης περίπου των 5 MW) προορίζονται μόνο για το υπεράκτιο περιβάλλον.
- Με τη συνεχή ωρίμανση της υπεράκτιας βιομηχανίας θα μετακινούμαστε όλο και σε μεγαλύτερα βάθη. Σήμερα το μέγιστο βάθος είναι περίπου στα 20 m και η έδραση της ανεμογεννήτριας βασίζεται κατά κανόνα στη τεχνολογία του χαλύβδινου μονού πυλώνα και στις κατασκευές βαρύτητας. Ωστόσο όσο το μέγεθος των ανεμοκινητήρων αυξάνει όσο και μεταναστεύουμε πιο υπεράκτια, θα απαιτηθούν πρόσθετοι κατασκευαστικοί σχεδιασμοί.



*Εικόνα 9-1. Το τρίποδο είναι μια από τις εναλλακτικές επιλογές της θεμελίωση μονού πλώνα.*

- Επίσης ένα κρίσιμο σημείο στην υπεράκτια αλυσίδα εφοδιασμού είναι η διαθεσιμότητα αποτελεσματικότερων σκαφών για την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών, των καλωδίων και των διαφόρων υποδομών. Τα σκάφη που χρησιμοποιούνται σήμερα δεν είναι ιδανικά για τη γρήγορη επέκταση της υπεράκτιας βιομηχανίας. Ο υπεράκτιος τομέας χρειάζεται αποκλειστικά σκάφη για την εγκατάσταση ανεμογεννητριών στα μεσαία βάθη (03-40 m και παραπάνω) και για λειτουργία κάτω από σκληρές συνθήκες προκειμένου να αυξηθεί ο αριθμός των ημερών λειτουργίας στις 260-290 μέρες το χρόνο έναντι των 180 που εκτιμούνται σήμερα.
- Παραδείγματος χάριν, για τη μεταφορά και την εγκατάσταση 10 ανεμοκινητήρων (10 σετ πτερυγίων, 10 κομμάτια πύργων, 10 θάλαμοι μηχανισμών/νασέλες) θα χρειαστούν 12 σκάφοι. Το κόστος αυτών των σκαφών κυμαίνεται στη περιοχή των 200 εκατομμυρίων, με συνολική επένδυση των 2.4 δισεκατομμυρίων. Η πρόσβαση του κεφαλαίου για τη κατασκευή τέτοιων σκαφών απαιτεί δυνατές και σταθερές συνθήκες αγοράς για την εγγύηση της εξόφλησης των επενδύσεων.
- Ακόμη, οι εμπειρογνώμονες στη βιομηχανία του τομέα, δηλώνουν ότι χρειάζονται απαραίτητως λιμενικές εγκαταστάσεις για την επέκταση της τεχνολογίας. Αυτές οι εγκαταστάσεις πρέπει να διέπονται από βαθιά νερά και με ενισχυμένες αποβάθρες για να μπορούν να πάρουν το

μεγάλο βάρος των ανεμογεννητριών. Επίσης μεγάλες αποθηκευτικές περιοχές θα χρειαστούν με χαμηλές αμοιβές ασφάλιστρων, αλλά και κατάλληλοι χώροι για τη μετακίνηση των βάσεων και των γερανών. Η υπεράκτια περιοχή επιτρέπει την ανάπτυξη μεγαλύτερων και αποδοτικότερων μηχανών εξαιτίας του γεγονότος ότι τα μεγαλύτερα μηχανήματα είναι πολύ ευκολότερο να επεκταθούν υπεράκτια.



## 10. Βιβλιογραφία

1. **Sathyajith, Mathew.** *Wind Energy fundamentals, resource analysis & economics.* Berlin : Springer, 2006. 978-3-540-30905-5.
2. *Wd, Wind Directions.* **Rose, Chris, [επιμ.]**. 5, s.l. : Cristian Kjaer, September 2009, Opening up offshore, Τόμ. 28, σσ. 13-52.
3. **Harrison, Robert, Hau, Erich και Snel, Herman.** *Large wind turbines, Design and Economics.* s.l. : Wiley, 2000.
4. Υπεράκτια Αιολικά. *Aquaret.* [Ηλεκτρονικό]  
[http://www.aquaret.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=156&Itemid=299&lang=el](http://www.aquaret.com/index.php?option=com_content&view=article&id=156&Itemid=299&lang=el).
5. **Μπεργελές, Γιώργος.** *Ανεμοκινητήρες.* Αθήνα : εκδόσεις Συμεών, 2005. 960-7888-57-x.
6. **Bousel, Gerand Van.** *offshore wind energy.* The Netherlands : s.n., 2003.
7. *Offshore Wind Energy. CREST MSC Flexible & Distance Learning Series.* s.l. : CREST, 2004.
8. *TU Delft.* [Ηλεκτρονικό] <http://repository.tudelft.nl/>.
9. **Kuehn, M, και συν.** *Integrated design methodology for offshore wind energy conversion systems.* 1997.
10. **Kuhn, M J.** *Dynamics and design optimization for OWECS.* s.l. : the Netherlands, 2001.
11. **Van Der Tempel, Jan.** *Design of support structure for offshore wind turbines.* s.l. : the Netherlands, 2006.
12. **Ashuri, Turai και Zaajer, M B.** *Review of design concepts, methods and considerations of offshore wind turbines.*
13. **Zande, Elker.** *Designing a wind farm. Wind Directions.* [Ηλεκτρονικό]  
[http://www.ewea.org/fileadmin/ewea\\_documents/documents/publications/WD/2009\\_july/Wind\\_energy\\_basics\\_July\\_2009.pdf](http://www.ewea.org/fileadmin/ewea_documents/documents/publications/WD/2009_july/Wind_energy_basics_July_2009.pdf).
14. **Byrne, B. και Houlby, G.** *Foundations for offshore wind turbines.* [Ηλεκτρονικό] [Παραπομπή: ] <http://www.jstor.org/stable/2559281>.
15. *Wind Directions.* **Lord, Hund.** [επιμ.] Cris Rose. 5, s.l. : Christian Kjaer, september 2009, Wind Directios, Τόμ. 28.
16. **CADDET, IEA.** *Electricity from offshore wind.* London : s.n., 2000.

17. **Koeller, Julia; Koepfel, Johann; Peters, Wolfgang;** *Offshore wind energy- research on environmental impacts*. Berlin : Springer, 2006. 978-3-540-34676-0.

18. *Offshore technology*. [Ηλεκτρονικό]  
[http://www.offshorewindenergy.org/ca-owee/indexpages/Offshore\\_technology.php](http://www.offshorewindenergy.org/ca-owee/indexpages/Offshore_technology.php).

19. *Grid\_and\_Finance*. [Ηλεκτρονικό] [http://www.offshorewindenergy.org/ca-owee/indexpages/Grid\\_and\\_Finance.php](http://www.offshorewindenergy.org/ca-owee/indexpages/Grid_and_Finance.php).

20. Offshore Risk Quantification Analysis. *Squrr Energy*. [Ηλεκτρονικό]  
<http://www.sgurrenergy.com/Products/ORQA.php>.

21. *EWEA European Wind Energy Assosiation*. [Ηλεκτρονικό]  
<http://www.ewea.org>.