

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Κυματική Ενέργεια και Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης – Μετατροπής
Θαλασίων Κυμάτων**



ΜΟΥΤΣΑΤΣΟΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ

ΠΡΟΣΚΕΦΑΛΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΠΟΠΤΕΥΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΒΟΥΡΟΣ ΑΝΔΡΕΑΣ (ΑΚΑΔ. ΥΠΟΤΡΟΦΟΣ)

ΠΑΤΡΑ 2019



ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Στο πλαίσιο της παρούσας πτυχιακής εργασίας γίνεται αναφορά σε μια σχετικά νέα και άγνωστη, κυρίως στη χώρα μας, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας (ΑΠΕ) με σημαντικές προοπτικές εκμετάλλευσης στο άμεσο μέλλον σε ολόκληρο το κόσμο. Πρόκειται για την ενέργεια που περιέχεται στα θαλάσσια κύματα.

Αυτό το είδος ΑΠΕ θα μπορούσε στο άμεσο να συμβάλλει ως πηγή παραγωγής ενός μεγάλου ποσοστού της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται παγκοσμίως. Τα στάδια εξέλιξης των διάφορων τεχνολογιών ποικίλουν. Για παράδειγμα, μερικές από αυτές έχουν αναπτυχθεί επαρκώς ώστε να έχουν προχωρήσει στο στάδιο της εμπορευματοποίησης με εγκαταστάσεις πολλών διασυνδεδεμένων μετατροπών να έχουν προγραμματιστεί για το άμεσο μέλλον, ενώ άλλες βρίσκονται ακόμα σε πρώιμο στάδιο σχεδιασμού ή δοκιμής.

Ανάλογα με τις διαθέσιμες πληροφορίες για την κάθε τεχνολογία ξεχωριστά, η παρουσίαση περιλαμβάνει τεχνολογικά και οικονομικά χαρακτηριστικά σχετικά με τον σχεδιασμό, την ανάπτυξη, την κατασκευή, τη δοκιμή, τη διαδικασία και τοποθεσία εγκατάστασης, τη λειτουργία, τη συντήρηση, την απόδοση σύλληψης και μετατροπής της κυματικής ενέργειας, την ικανότητα επιβίωσης σε ακραία καιρικά φαινόμενα, την οικονομική βιωσιμότητα, τις περιβαλλοντικές συνέπειες, τις προοπτικές εμπορευματοποίησης και τη σύγκριση με άλλες ανανεώσιμες και συμβατικές πηγές ενέργειας. Αυτό βέβαια είναι και παγκόσμιος στόχος. Η σταδιακή γρήγορη αύξηση παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Στόχος της εργασίας είναι η διερεύνηση των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα θαλάσσια κύματα με στόχο την αναγνώριση της βέλτιστης λύσης που θα είναι σύμφωνη με όλες τις απαιτήσεις κάθε περιοχής εφαρμογής της συγκεκριμένης τεχνολογίας έτσι ώστε στο μέλλον η κυματική ενέργεια ως μορφή ΑΠΕ να συνεισφέρει σε σημαντικό ποσοστό στην ολοένα αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας.

Βασική πηγή για την εργασία αποτέλεσε η πύλη AQUAREΤ που στην πραγματικότητα αποτελεί μια από τις πλέον ενημερωμένες βάσεις δεδομένων αναφορικά με την ανάλυση και ανάπτυξη διατάξεων μετατροπής της κυματικής ενέργειας παγκοσμίως.

Ευχαριστούμε θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μας κ. Ανδρέα Βούρο, Ακαδ. Υπότροφο του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε., για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της εργασίας.

Μουτσάτσος Χαράλαμπος – Προσκεφαλός Δημήτρης

Σεπτέμβριος 2019

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές

(Ονοματεπώνυμο)

(Ονοματεπώνυμο)

.....

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία διαπραγματεύεται τις τεχνολογίες που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας και τη μετατροπή αυτής σε ηλεκτρική ώστε ως μια «καθαρή» μορφή ενέργειας (ΑΠΕ) να συνεισφέρει στην παγκόσμια ολοένα και αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας.

Η δομή της εργασίας έχει ως ακολούθως:

Στο πρώτο κεφάλαιο δίνεται συνοπτικά η εικόνα της κατανάλωσης καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, τα είδη των καυσίμων και γίνεται ο διαχωρισμός των ορυκτών καυσίμων από τις μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο δίνονται τα μεγέθη – παράμετροι μελέτης που χαρακτηρίζουν την κυματική ενέργεια ως πηγή ενέργειας. Δίνεται το βασικό υπόβαθρο της γέννησης των κυματισμών και της συμβολής των ανέμων στη δημιουργία των θαλασσίων κυμάτων. Περιγράφονται εν συντομία οι διάφορες θεωρίες που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα για την περιγραφή των κυμάτων με το συνακόλουθο μαθηματικό υπόβαθρο που τις περιβάλλει. Επίσης δίνονται στοιχεία για την στατιστική περιγραφή του φαινομένου των κυματισμών αφού το κύμα μπορεί να ειδωθεί ως στοχαστικό σήμα, το οποίο επιδέχεται στατιστική ανάλυση για την εξαγωγή πληροφοριών.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην εκμετάλλευση των κυμάτων, περιγράφονται μορφές κυματικής τεχνολογίας και δίνονται οι βασικοί τύποι μηχανισμών – μετατροπέων (WEC's – Wave Energy Converters) που έχουν αναπτυχθεί μέχρι τις μέρες μας για τη μετατροπή της ενέργειας των κυμάτων σε ηλεκτρική. Επίσης γίνεται ο διαχωρισμός των τεχνολογιών ως προς την απόσταση από την ακτή, οι οποίες αναλύονται αναλυτικότερα στα κεφάλαια που ακολουθούν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο δίνονται τα χαρακτηριστικά του κυματικού δυναμικού και πιο συγκεκριμένα αυτό που αφορά τις ελληνικές θάλασσες για μια μελλοντική εκμετάλλευση των πόρων που διαθέτει η χώρα μας. Αναπτύσσεται εν συντομία ο τρόπος συλλογής δεδομένων τόσο πειραματικών όσο και υπολογιστικών προκειμένου να χαρακτηριστεί το κυματικό δυναμικό. Δίνεται περιληπτική περιγραφή των διατάξεων συλλογής πειραματικών δεδομένων ενώ επισημαίνονται κάποια βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου υπολογισμού και επαλήθευσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύονται εφαρμοσμένες διατάξεις ακτογραμμής. Δίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας τους πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που εντοπίζονται κατά την εφαρμογή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι διατάξεις αυτές περιγράφονται ως ένας πιο εύκολος τρόπος εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας σε σχέση με υπεράκτιες τεχνολογίες, αφού η χώρα μας λόγω του γεωγραφικού ανάγλυφου και των πολλών νησιών θα μπορούσε να στραφεί προς αυτές τις τεχνολογίες αρχικά.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται παρόμοια η ανάλυση για διατάξεις σε μικρές αποστάσεις από την ακτή που ονομάζονται παράκτιες. Είναι η επόμενη κατηγορία διατάξεων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στον ελλαδικό χώρο για εκμετάλλευση.



Στο έβδομο κεφάλαιο δίνεται η τρέχουσα κατάσταση αναφορικά με την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας στην Ελλάδα και περιγράφεται πιο αναλυτικά η προσπάθεια που γίνεται τα τελευταία χρόνια στην Κρήτη σε συνεργασία του Λιμένα με το Πολυτεχνείο και το Μεσογειακό Πανεπιστήμιο και μια γερμανική εταιρία. Δίνονται τα χαρακτηριστικά του δομοστοιχείου που τέθηκε σε λειτουργία με τα πλεονεκτήματα που διαθέτει κατά τη δοκιμαστική λειτουργία προς συλλογή δεδομένων για την αξιολόγηση του εγχειρήματος.

Τέλος στο όγδοο κεφάλαιο γίνεται μια ανασκόπηση της εργασίας, περιγράφεται η σημερινή κατάσταση σε παγκόσμιο επίπεδο αναφορικά με την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας και δίνονται τρόποι και ιδέες για εφαρμογή της τεχνολογίας στον ελλαδικό χώρο. Η περίπτωση της Κρήτης είναι μια πρώτη και πολύ σπουδαία προσπάθεια που θα μπορούσε να προχωρήσει σε εφαρμογή και σε άλλες περιοχές της χώρας.



Περιεχόμενα

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iii
1. Εισαγωγή	1
1.1. Είδη Καυσίμων – Ορυκτά Καύσιμα.	3
1.2. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.	7
2. Κυματική Ενέργεια - Κύριες Παράμετροι Μελέτης.	11
2.1 Κυματική Ισχύς.	12
2.2 Η συμβολή των ανέμων στη δημιουργία θαλασσίων κυμάτων.	13
2.3 Γένεση των κυματισμών.	14
2.3.1 Θεωρία γραμμικών κυμάτων του Airy.	18
2.3.2 Θεωρία του Stokes.	20
2.3.3 Θεωρία των μεμονωμένων κυμάτων.	21
2.3.4 Στοχαστική θεώρηση των κυμάτων.	21
2.3.5 Τροποποίηση των κυμάτων.	23
2.4 Στατιστική Ανάλυση Κυματισμών.	24
2.5 Φασματική Ανάλυση Κυματισμών.	26
2.6 Βραχυπρόθεσμη Φασματική Πρόβλεψη Κυματισμών.	30
2.7 Μακροπρόθεσμη Φασματική Πρόβλεψη Κυματισμών.	32
3. Εκμετάλλευση Ενέργειας των Κυμάτων.	33
3.1 Μορφές Κυματικής Τεχνολογίας.	38
3.2 Τύποι Μετατροπών WEC's (Wave Energy Converters).	42
3.2.1 Εξασθενητής κυμάτων (Attenuator).	43
3.2.2 Αξονοσυμμετρικός Σημειακός Απορροφητής – (Point absorber).	44
3.2.3 Παλλόμενοι μετατροπείς των κυματικών κλυδωνισμών (Oscillating Wave Surge Converter).	45
3.2.4 Παλλόμενη υδάτινη στήλη (ΠΥΣ - OWC)	45
3.2.5 Συσκευή υπερακόντισης– υπερύψωσης (overtopping devices).	46
3.2.6 Βυθιζόμενη συσκευή διαφορικής πίεσης.	47
3.3 Τεχνολογίες Μετατροπής ενέργεια κυμάτων.	48
3.3.1 Τεχνολογίες Ακτογραμμής:	49
3.3.2 Παράκτιες Τεχνολογίες:	49
3.3.2 Υπεράκτιες Τεχνολογίες (Ανοιχτής Θαλάσσης):	49



4. Ελληνικό Κυματικό Δυναμικό.....	51
4.1 Δεδομένα του μοντέλου WAM.....	52
4.2 Δεδομένα μετρήσεων συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ.....	56
4.2.1 Πλωτοί Σταθμοί Μέτρησης.....	56
4.3 Παράδειγμα μελέτης κυματικού δυναμικού (Σκύρος).....	58
5. Εφαρμοσμένες Διατάξεις Ακτογραμμής.....	65
5.1 Σύστημα LIMPET.....	65
5.2 Σύστημα WECA (Ελλάδα).....	69
5.3 Σύστημα Υπέρβασης – Υπερύψωσης (Νορβηγία).....	70
5.4 Σύστημα LabBouoy (Ελλάδα).....	73
5.4.1 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις.....	76
5.5 Σύστημα SDE (Ισραήλ).....	77
6. Εφαρμοσμένες Παράκτιες Διατάξεις.....	79
6.1 Σύστημα MIGHTYWHALE (Ιαπωνία).....	79
6.2 Σύστημα WETEnGen (Καναδάς).....	81
6.3 Σύστημα CES (Ηνωμένες Πολιτείες).....	83
6.4 Σύστημα Waveberg (ΗΠΑ).....	85
6.5 Σύστημα Oyster (Τεχνολογία οριζόντιας κίνησης).....	89
6.6 Σύστημα WaveRoller.....	93
6.7 Σύστημα WaveStar (Δανία).....	96
6.8 Σύστημα BioWave.....	99
6.9 Σύστημα Power Buoy (ΗΠΑ).....	101
6.10 Σύστημα AquaBuoy (ΗΠΑ).....	103
7. Κυματική Ενέργεια στην Ελλάδα.....	107
7.1 Μετατροπέας της εταιρίας SinnPower.....	107
7.2 Χαρακτηριστικά - Πλεονεκτήματα του μετατροπέα SinnPower.....	109
7.3 Λιμένας Ηρακλείου – Τοποθέτηση μετατροπέα.....	110
8. Συμπεράσματα - Ανασκόπηση.....	119
Βιβλιογραφία.....	123
Ιστοσελίδες σχετικές.....	124



Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Παραγωγή ηλεκτρισμού στην Ελλάδα 2018 (kalippos.gr).....	4
Εικόνα 2: Μεταφορά γαιάνθρακα σε λιγνιτική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου.	5
Εικόνα 3: Παγκόσμια εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα από ορυκτά καύσιμα.	6
Εικόνα 4: Εργοστάσια παραγωγής Πυρηνικής Ενέργειας και φυσικού αερίου	6
Εικόνα 5: Πάρκο Φωτοβολταϊκών συστημάτων – Συγκεντρωτικό Ηλιακό Σύστημα....	9
Εικόνα 6: Αθροιστική εικόνα κυματικής ενέργειας [3].	11
Εικόνα 7: Μέσες τιμές κυματικής ισχύος σε παγκόσμια κλίμακα. [3].	12
Εικόνα 8: Κατανομή ανέμων στις γεωγραφικές ζώνες. [3]	13
Εικόνα 9: Ακτογραμμές υψηλού κυματικού δυναμικού.[3]	14
Εικόνα 10: Δημιουργία και διάδοση κυμάτων. [3]	14
Εικόνα 11: Χαρακτηρισμός κυμάτων ως προς την περίοδο. [3].	15
Εικόνα 12: Υπέρθυση (ενισχυτική και αποσβεστική) κυμάτων. [3]	16
Εικόνα 13: Υπολογισμός Feff στο σημείο A.	17
Εικόνα 14: Μορφή γραμμικών κυμάτων του Airy.[3]	19
Εικόνα 15: Εξέλιξη κυμάτων κατά τη θεωρία Stokes. [3].	20
Εικόνα 16: Χρονοσειρά σήματος περιγραφής ύψους κύματος. [3].	22
Εικόνα 17: Ακολουθία κυμάτων ποικίλου ύψους και περιόδων. [3]	22
Εικόνα 18: Κατάσταση "Τυχαίας" Θάλασσας.	22
Εικόνα 19: Περίπτωση Θραύσης Κύματος. [3].	23
Εικόνα 20: Εικόνα ανακλώμενου κύματος. [3]	23
Εικόνα 21: Εικόνα διαθλώμενου κύματος. [3]	24
Εικόνα 22: Εικόνα περιθλώμενου κύματος.[3]	24
Εικόνα 23: Υπόδεθγμα χρονοσειράς $\eta(t)$ καταγραφής κυματισμών. (Σουκισιάν 2007).	25
Εικόνα 24: Τυπικό φάσμα JONSWAP για $H_s=1m$, $T_p=6.0s$ (Σουκισιάν 2007)	28
Εικόνα 25: Φασματική Κατανομή Κυμάτων. [3]	29
Εικόνα 26: Εκμετάλλευση ενέργειας κυμάτων σε στροβίλους.....	33
Εικόνα 27: Σχηματική ερμηνεία δημιουργία και μεταφοράς ενέργειας των θαλασσίων ρευμάτων.	35
Εικόνα 28: Σχηματική περιγραφή των δομών που μεταφέρουν ενέργεια στη θάλασσα ως προς το βάθος από τον πυθμένα.	35
Εικόνα 29: Εικόνα των ετήσιων πόρων	36
Εικόνα 30: Κατανομές έντασης κυμάτων στον ευρωπαϊκό χώρο.	36
Εικόνα 31: Δυνατότητες Κινήσεων Πλωτών Διατάξεων. [3]	40
Εικόνα 32: Πλωτή συσκευή με τον άξονά της ευθυγραμμισμένο στο μέτωπο του κύματος.	43
Εικόνα 33: Πλωτή κατασκευή απορρόφησης κυματικής ενέργειας.	44
Εικόνα 34: Παλλόμενος συλλέκτης κυματικών κλυδωνισμών.	45
Εικόνα 35: Κίνηση παλλόμενης στήλης (ΠΥΣ).	46
Εικόνα 36: Διάταξη Υπερακόντισης (Νορβηγία).	47
Εικόνα 37: Βυθιζόμενη συσκευή διαφορικής πίεσης και σχηματική αναπαράσταση.	48
Εικόνα 38: Διαδικασία μοντέλου hindcast.	52



Εικόνα 39: Η περιοχή ανάλυσης – μελέτης του μοντέλου.....	53
Εικόνα 40:Χωρική Κατανομή της μέσης κυματικής ενέργειας στις 4 εποχές ξεκινώντας από Χειμώνα έως φθινόπωρο.....	54
Εικόνα 41:Μέση ετήσια κυματική ενέργεια στις ελληνικές θάλασσες (Ντάβαλης 2016).....	55
Εικόνα 42:Οι πλωτοί σταθμοί Wavescan,Seawatch και Seawatch Deep Sea Module (SDSM).....	57
Εικόνα 43:Οι σταθμοί μετρήσεων του προγράμματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ (Ντάβαλης 2016).....	57
Εικόνα 44: Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου (Ντάβαλης 2016).....	59
Εικόνα 45:Ροδόγραμμα ανέμου θαλασσίου χώρου Σκύρου (Ντάβαλης 2016).	59
Εικόνα 46: Ανεπτυγμένο ροδόγραμμα ανέμου Σκύρου (Ντάβαλης 2016).....	59
Εικόνα 47: Χρονοσειρά σημαντικού ύψους κύματος (Ντάβαλης 2016).....	60
Εικόνα 48: Ροδόγραμμα κύματος σταθμού Σκύρου (Ντάβαλης 2016).....	60
Εικόνα 49: Ανεπτυγμένο ροδόγραμμα κύματος (Ντάβαλης 2016).....	61
Εικόνα 50: Συσχέτιση σημαντικού ύψους κύματος - ταχύτητας ανέμου (Ντάβαλης 2016).....	61
Εικόνα 51: Ποσοστιαία κατανομή σημαντικού ύψους ως προς την ταχύτητα ανέμου.....	61
Εικόνα 52: Χρονοσειρά τιμών περιόδου κορυφής T_p	62
Εικόνα 53: Κατανομή πυκνότητας πιθανότητας T_p (Ντάβαλης 2016).....	62
Εικόνα 54: Κατανομή μέσης ετήσιας παραγωγής κυματικής ενέργειας (Ντάβαλης 2016).....	63
Εικόνα 55:Η εγκατάσταση LIMPET (Σκωτία).....	66
Εικόνα 56: Τμηματική περιγραφή της διάταξης LIMPET.....	66
Εικόνα 57:Διαδικασίες - στάδια κατασκευής της διάταξης LIMPET.....	68
Εικόνα 58: Προτεινόμενη εφαρμογή μετατροπής κυματικής ενέργειας σε κυματοθραύστη WECA.....	69
Εικόνα 59: Τμήματα της διάταξης WECA.....	70
Εικόνα 60: Τομή πολυτμηματικού μετατροπέα κυματικής ενέργειας.....	71
Εικόνα 61:Προτεινόμενη διάταξη SSG σε εφαρμογή κυματοθραύστη.....	72
Εικόνα 62:Εφαρμογή τεχνολογίας ακτογραμμής SSG σε κολπίσκο.....	72
Εικόνα 63:Προτεινόμενη εφαρμογή SSG σε υπεράκτια ζώνη.....	72
Εικόνα 64: Βασικά μέρη εγκατάστασης LabBouoy κοντά σε κυματοθραύστη.....	74
Εικόνα 65:Σχηματική απεικόνιση των κινούμενων τμημάτων LabBouoy.....	75
Εικόνα 66:Λειτουργία δοκιμαστικού μοντέλου κλίμακας 1:15 (ΕΜΠ).....	76
Εικόνα 67:Παράδειγμα μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και διάβρωσης.....	77
Εικόνα 68: Εγκατάσταση συστήματος SDE στο Ισραήλ.....	77
Εικόνα 69:Διαδοχή σταδίων παλινδρομικής κίνησης πτερυγίου.....	78
Εικόνα 70: Καθέλκυση του MightyWhale.....	79
Εικόνα 71: Πλάγια όψη και κάτοψη διάταξης MightyWhale.....	80
Εικόνα 72: Προτεινόμενη εφαρμογή παράταξης συσκευών MW.....	81
Εικόνα 73: Τμήματα που αποτελούν τη διάταξη WETEnGen.....	82
Εικόνα 74: Δοκιμή μοντέλου μικρής κλίμακας σε δεξαμενή κυματισμών και συναρμογή μοντέλου εγκατεστημένης ισχύος 20kW.....	82
Εικόνα 75: Σχηματική αναπαράσταση εφαρμογής συστήματος CES.....	83
Εικόνα 76: Σχηματικό διάγραμμα συνδυασμένου συστήματος CES.....	84



Εικόνα 77: Το μοντέλο Waveberg κατά τη ρυμούλκηση στις ακτές της Florida (1996).	86
Εικόνα 78: Πειραματικά μοντέλα μέσης και μικρής κλίμακας.	87
Εικόνα 79: Σειρά εγκατεστημένης μονάδας Oyster πολλαπλών μετατροπένων.....	89
Εικόνα 80: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης Oyster.	90
Εικόνα 81: Όψεις των ταλαντούμενων πτερυγίων με ενσωματωμένες αντλίες.	92
Εικόνα 82: Δοκιμή μοντέλου Oysterεργαστηριακής κλίμακας σε δεξαμενή κυματισμών.....	92
Εικόνα 83: Μονάδα WaveRoller τοποθετημένο στον πυθμένα.....	93
Εικόνα 84:Ο μηχανισμός μετάδοσης και ένα πάρκο πανομοιότυπων διατάξεων σε συστοιχίες.....	94
Εικόνα 85: Διαδικασία κατασκευής και δοκιμών στο εργαστήριο (LabofWaterResHelsinkiUniversityofTechnology).....	95
Εικόνα 86: Δοκιμές σε δεξαμενή και δοκιμές μετρήσεων Doppler (LabofWaterResHelsinkiUniversityofTechnology).....	95
Εικόνα 87: Δοκιμές πρωτότυπου κλίμακας 1:3 στον Ειρηνικό Ωκεανό (2004)	95
Εικόνα 88: Δοκιμή στον Ατλαντικό Ωκεανό (Okney 2005).	96
Εικόνα 89: Σχεδιασμός και κατασκευή διάταξης WaveRoller (2006).	96
Εικόνα 90: Εγκατάσταση διάταξης WaveStar.	97
Εικόνα 91: Τοποθετημένη σε λειτουργία μονάδας WaveStar	97
Εικόνα 92: Συστοιχία διάταξης WaveStar σε λειτουργία.....	98
Εικόνα 93: Σύστημα WaveStar σε θέση ασφαλείας.....	98
Εικόνα 94: Βασικά μέρη της συσκευής - θέσεις λειτουργίας ασφαλείας.....	100
Εικόνα 95: Διάταξη PowerBuoy σε λειτουργία - διάγραμμα.[05 ^A]	102
Εικόνα 96: Διαστασιολόγηση συσκευής PB150.....	102
Εικόνα 97: Μοντέλο AquaBuoy με ενσωματωμένες ΑΠΕ.	103
Εικόνα 98:Η λειτουργία του AquaBuoy και η προετοιμασία καθελκυσμού.	104
Εικόνα 99: Συστοιχία μετατροπένων για υψηλότερου βαθμού εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας.....	109
Εικόνα 100: Η διαδικασίας της τοποθέτησης δομοστοιχείων μετατροπής κυματικής ενέργειας.	110
Εικόνα 101: Εικονογράφηση της εγκατάστασης πέντε δομοστοιχείων στον κυματοθραύστη του λιμένα Ηρακλείου.....	111
Εικόνα 102: Φάρμα - Συστοιχίες μετατροπένων (WEC's).	112
Εικόνα 103:Δοκιμές σε κλίμακα Εργαστηρίου στη Φλωρεντία.....	113
Εικόνα 104: Το δομοστοιχείο εγκατεστημένο - Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός (on board).....	118



1. Εισαγωγή

Σήμερα στον ευρωπαϊκό χώρο περίπου το 20% (στοιχεία του 2015) της ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) λόγω των περιβαλλοντικών απαιτήσεων καταρχήν (μείωση ατμοσφαιρικής ρύπανσης – μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος σε παγκόσμια κλίμακα) και λόγω της μεγάλης τεχνολογικής ανάπτυξης των ΑΠΕ που έχει επέλθει τα τελευταία χρόνια. Προφανώς η απεριόριστη διαθεσιμότητα των πολλών μορφών ΑΠΕ αποτελεί σημαντικό παράγοντα εκμετάλλευσης αυτών σε όλο τον κόσμο.

Η ενέργεια ήταν είναι και θα είναι το ζητούμενο και το αναγκαίο όχημα για τη δραστηριότητα του ανθρώπου σε όλες τις εκφάνσεις της καθημερινότητας σε τέτοιο βαθμό που η έλλειψή της καθιστά πρόδηλη την αναγκαιότητά της. Στο σύνολο της καθημερινότητας ο άνθρωπος δεσμεύει, παράγει, καταναλώνει, μετατρέπει, αποθηκεύει και υποβαθμίζει τεράστια ποσά ενέργειας. Η ενέργεια εμφανίζεται με πολλές μορφές και στα πλαίσια της εξέλιξης και της τεχνολογικής προόδου, έχουν αναπτυχθεί πολλοί μηχανισμοί μετατροπής ώστε όλο και μεγαλύτερα ποσά ενέργειας να είναι διαθέσιμα και οικονομικότερα για τον άνθρωπο.

Σε αυτό το πλαίσιο επιζητείται στις μέρες μας η όλο και μεγαλύτερη ανάπτυξη των λεγόμενων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) όπως και τον ήπιων μορφών ενέργειας (ΗΜΕ) και η μετατροπή αυτών σε ηλεκτρική ενέργεια με στόχο πάντα τη μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα η χρήση των οποίων συμβάλλει αποφασιστικά και έντονα στο φαινόμενο του θερμοκηπίου στην υπερθέρμανση του πλανήτη και γενικότερα σε αυτό που ονομάζουμε σήμερα κλιματική αλλαγή.

Παραδοσιακά ο κύκλος παραγωγής - κατανάλωσης ενέργειας ξεκινά από τις αρχικές μορφές ενέργειας όπως ο άνθρακας, το αργό πετρέλαιο, ο άνεμος, το ηλιακό φως ή το φυσικό αέριο. Αυτές οι μορφές ενέργειας χαρακτηρίζονται ως πρωτογενείς. Σκοπός πάντα είναι σε επόμενο βήμα η μετατροπή των πρωτογενών μορφών σε ηλεκτρική συνήθως που αποτελεί κινητήρια δύναμη για ένα μεγάλο πλήθος δραστηριοτήτων. Η μετατροπή ενέργειας συγκεντρώνει πολλά ενδιάμεσα στάδια ανάλογα με τη μορφή της ενέργειας. Εξόρυξη άνθρακα ή πετρελαίου, μεταφορά με αγωγούς, χρήση δεξαμενόπλοιων, καύση σε μεγάλους θερμικούς σταθμούς, δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και πολλά άλλα. Όλη αυτή η πολυσύνθετη αλυσίδα είναι γνωστή ως ενεργειακό σύστημα.

Αντίστοιχα στις μέρες μας υλοποιούνται όλο και περισσότερο ενεργειακά συστήματα ΑΠΕ με στόχο πάντα την απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Στις μέρες μας η κυρίαρχη τάση είναι η ολοένα και αυξανόμενη εκμετάλλευση των ΑΠΕ προς το σκοπό της μειωμένης χρήσης ορυκτών καυσίμων. Είναι πλέον γνωστό ότι οι εκπομπές ρύπων των ορυκτών καυσίμων είναι υπεύθυνες για την επερχόμενη κλιματική αλλαγή και το φαινόμενο του θερμοκηπίου που πλέον βιώνουμε με τις αυξημένες θερμοκρασίες της ατμόσφαιρας σε όλο τον πλανήτη.

Μια σχετικά νέα μορφή ΑΠΕ και κατά βάση άγνωστη στην Ελλάδα αλλά με πολύ καλές προοπτικές αξιοποίησης στο άμεσο μέλλον είναι η ενέργεια που προέρχεται από τους θαλάσσιους κυματισμούς. Το πλεονέκτημα που διαθέτει η Ελλάδα είναι το πολύ μεγάλο μήκος ακτογραμμής που φθάνει περίπου τα 16000Km. Επίσης δεδομένης της σύνδεσης της αιολικής με την κυματική ενέργεια η



εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας συνδέεται με το υψηλό αιολικό δυναμικό στο Αιγαίο Πέλαγος και όχι μόνο, το οποίο είναι υπεύθυνο για την αρκετά έντονη κυματική δραστηριότητα στην περιοχή. Σύμφωνα με τις έως σήμερα λιγοστές μελέτες εκτιμάται ότι η μέση ετήσια κυματική ισχύς είναι της τάξης (4 – 11) kW/m (ClementAlainetal. 2002).

Η ιδέα για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας δεν είναι νέα, αντιθέτως η πρώτη προσπάθεια έγινε από το Γάλλο μηχανικό Pierre Girardto 1799. Στον ευρωπαϊκό χώρο τα πρώτα βήματα στην ανάπτυξη της εκμετάλλευσης της ενέργειας των κυμάτων έγιναν κατά την περίοδο της πετρελαϊκής κρίσης το 1973. Ιστορικά η κρίση ξεκίνησε τον Οκτώβριο του 1973 όταν τα μέλη του OPEC διακήρυξαν εμπάργκο πετρελαίου. Μέχρι το τέλος Μαρτίου του 1974, οπότε και έληξε το εμπάργκο η τιμή του πετρελαίου είχε τετραπλασιαστεί. Αυτή η στιγμή αποτέλεσε το εφαλτήριο για τη γενικότερη στροφή των ανεπτυγμένων χωρών στην εκμετάλλευση των ΑΠΕ. Εκείνη την εποχή δόθηκε και ο ορισμός των ΑΠΕ ως μορφές ενέργειας οι οποίες μπορούν να είναι διαθέσιμες μακροπρόθεσμα χωρίς η χρήση τους να μειώνει τα ενεργειακά αποθέματα του πλανήτη και χωρίς την πρόκληση περιβαλλοντικής βλάβης τέτοιας που η φύση να αδυνατεί να επιδιορθώσει χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση.

Η εκμετάλλευση της ενέργειας των κυμάτων συγκεντρώνει πλεονεκτήματα, όπως ότι

- Ως μορφή ΑΠΕ είναι ανεξάντλητη, προσφέρει ανεξαρτησία από εισαγωγές καυσίμων και συμβάλλει στην δημιουργία θέσεων εργασίας.
- Η εκμετάλλευση της προκαλεί μηδαμινή επιβάρυνση (μόλυνση) του περιβάλλοντος. Μάλιστα, σύμφωνα με μελέτες για κάθε MWh ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται από μετατροπή της κυματικής ενέργειας εξοικονομούνται κατά μέσο όρο 136 megatons CO₂.
- Οι επιπτώσεις από την εγκατάσταση κατασκευών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας στην χλωρίδα και την πανίδα θεωρούνται ήπιες, ενώ μικρές θεωρούνται η οπτική και ακουστική ενόχληση.
- Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα όμως της κυματικής ενέργειας είναι η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα που παρουσιάζει η οποία είναι η υψηλότερη μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών.

Από το 1990 όλο και περισσότερες εταιρίες δραστηριοποιούνται στην ανάπτυξη μηχανισμών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας ενώ τα τελευταία χρόνια προχωρά και η εμπορευματοποίηση. Οι κυματικές συσκευές χαρακτηρίζονται ως προς την τοποθεσία εγκατάστασης και διαχωρίζονται σε επάκτιες (ακτογραμμής), παράκτιες ή υπεράκτιες.

Επίσης οι διατάξεις κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργίας τους, υπάρχουν αρκετοί τύποι άλλοι βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο, άλλοι στο στάδιο των δοκιμών ενώ τέλος υπάρχουν και κάποιες που βρίσκονται στο στάδιο της εμπορικής χρήσης πλέον προσφέροντας μεγάλες δυνατότητες στο κοινωνικό σύνολο, δεδομένου ότι προκύπτουν και αρκετές θέσεις εργασίας.

Η θεωρητική εκτίμηση του κυματικού δυναμικού αφορά δύο περιπτώσεις. Καταρχήν ο απλός αρμονικός κυματισμός αποτελεί την πιο απλή μαθηματική προσέγγιση για τη μελέτη των δισδιάστατων επιφανειακών κυματισμών (γραμμική θεωρία κυματισμών του Airy). Πέρα όμως από τη θεωρητική ανάλυση υπάρχουν οι



ρεαλιστικές καταστάσεις θάλασσας, για τη μελέτη των οποίων εισάγεται η έννοια του μοντέλου τυχαίας φάσης.

Στην παρούσα εργασία δίνονται στοιχεία εκτίμησης του κυματικού δυναμικού των ελληνικών θαλασσών η οποία γίνεται είτε με τη χρήση hindcast δεδομένων από κυματικά μοντέλα αλλά και από δεδομένα επιτόπιων μετρήσεων που πραγματοποιούνται σταθερά από συγκεκριμένους σταθμούς στη θάλασσα (Σύστημα ΠΟΣΕΙΔΩΝ).

1.1. Είδη Καυσίμων – Ορυκτά Καύσιμα.

Η πρόοδος και η ανάπτυξη της τεχνολογίας του ανθρώπινου πολιτισμού ξεκινά πάντα από την αξιοποίηση της ενέργειας. Η ενέργεια αποτελεί την κινητήρια δύναμη για την εξέλιξη του πολιτισμού μας διαχρονικά. Η θερμική η ηλεκτρική αλλά πριν από αυτές τις μορφές η κινητική χρησιμοποιούνται καθημερινά από τον άνθρωπο. Είναι πλέον κοινά αποδεκτό ότι το επίπεδο αξιοποίησης της ενέργειας κάθε χώρας παγκοσμίως καθορίζει και το βιοτικό επίπεδο του λαού της. Για παράδειγμα στις μέρες μας είναι αποδεκτό ότι οι λαοί των Σκανδιναβικών χωρών απολαμβάνουν ένα βιοτικό επίπεδο από τα υψηλότερα παγκοσμίως. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι σήμερα η Σουηδία αγοράζει σκουπίδια από άλλες χώρες προκειμένου να τα χρησιμοποιήσει ως πρώτη ύλη για την παραγωγή ενέργειας σε θερμικούς σταθμούς που διαθέτει, ενώ εδώ και πολλά χρόνια η Κοπεγχάγη πρωτεύουσα της Δανίας «ζεσταίνεται» από τα σκουπίδια της!

Τα ορυκτά καύσιμα βρίσκονται στο ανώτερο στρώμα του φλοιού της γης. Σχηματίστηκαν από απολιθωμένα υπολείμματα οργανικών ενώσεων και την έκθεσή τους σε θερμότητα και πίεση στο φλοιό της γης επί εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια. Από την άλλη πλευρά η εξάντληση των ορυκτών καυσίμων γίνεται με πολύ γρήγορο ρυθμό. Για το λόγο αυτό τα ορυκτά καύσιμα θεωρούνται μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Είναι προφανές στις μέρες μας ότι απαιτείται η μείωση της χρήσης τέτοιων μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αφού οι εκπομπές των παραγόμενων ρύπων οδηγούν σε ένταση τα αποτελέσματα του φαινομένου του θερμοκηπίου και την κλιματική αλλαγή.

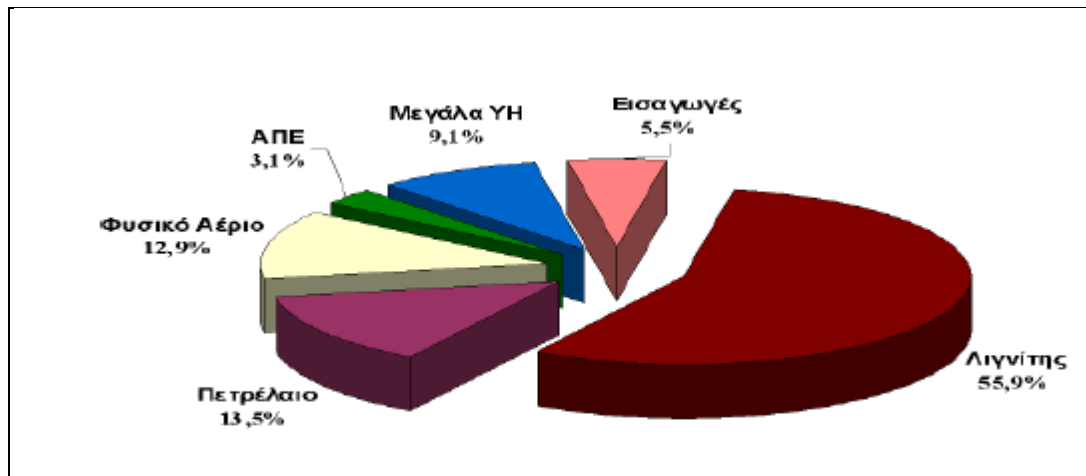
Παραδοσιακά καύσιμα όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι τα λεγόμενα συμβατικά (conventional) ή ορυκτά καύσιμα (fossil fuels). Είναι ένας γενικός ορισμός που αποδίδεται σε καύσιμα που σχηματίζονται στην γη από υπολείμματα φυτικών ή ζωικών οργανισμών και περιέχουν οργανικές ουσίες (άνθρακα). Οι υδρογονάνθρακες είναι τα κυριότερα ορυκτά καύσιμα που ακόμα διατηρούν σημαντικό κομμάτι στην παραγωγή ενέργειας.

Γενικότερα μέχρι και σήμερα ο μεγαλύτερος ενεργειακός πόρος είναι τα ορυκτά καύσιμα, που περιλαμβάνουν το πετρέλαιο, τον άνθρακα, το φυσικό αέριο, το λιγνίτη και την τύρφη. Αυτά τα είδη καυσίμων αποτελούν πάντα μια καλή ενεργειακή ύλη αφού η καύση τους οδηγεί στην παραγωγή μεγάλων ποσών ενέργειας. Μια αξιοσημείωτη εγχώρια πηγή ενέργειας προερχόμενη από ορυκτά καύσιμα είναι ο λιγνίτης. Παρά το φτωχό ενεργειακό περιεχόμενο (θερμογόνος ισχύς) αποτελεί ακόμα σήμερα την κύρια ενεργειακή πηγή για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Ο λιγνίτης είναι πέτρωμα οργανικής προέλευσης που κύριο στοιχείο του είναι ο άνθρακας. Περιέχει ακόμα μικρές ποσότητες υδρογόνου, αζώτου και οξυγόνου όπως και τύρφη. Στην



Ελλάδα ορυχεία λιγνίτη βρίσκονται στη Μεγαλόπολη, στην Πτολεμαΐδα, στο Αμύνταιο, στο Αλιβέρι.

Τα βιομηχανικά αξιοποιήσιμα κοιτάσματα υπολογίζονται σε περίπου 3 δις τόνους ορυκτού ή σε 450εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου. Συνολικότερα τα γεωλογικά αποθέματα λιγνίτη στη χώρα μας εκτιμώνται σε 5 δις τόνους ορυκτού και υπολογίζεται ότι επαρκούν για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μας για περισσότερο από 40 χρόνια ακόμα (www.dei.gr)



Εικόνα 1: Παραγωγή ηλεκτρισμού στην Ελλάδα 2018 (kalippos.gr)

Τα συμβατικά ή ορυκτά καύσιμα περιλαμβάνουν καταρχήν τους γαιάνθρακες. Υπάρχουν πολλές μορφές γαιανθράκων και κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες. Η περισσότερο γνωστή μορφή είναι ο λιγνίτης. Όσον αφορά την ηλεκτροπαραγωγή οι γαιάνθρακες χαρακτηρίζονται από την χαμηλή απόδοση μετατροπής σε ηλεκτρική ενέργεια που φτάνει στην καλύτερη περίπτωση το 35%. Το πετρέλαιο λόγω της μεγάλης ενεργειακής πυκνότητας, της εύκολης σχετικά μεταφοράς και των δεκάδων χρήσεων του είναι η πιο σημαντική ενεργειακή πηγή από την δεκαετία του 1950 και μετά με τις σημαντικότερες χρήσεις του σαν υγρό καύσιμο να βρίσκεται στις μεταφορές και στη θέρμανση.

Το φυσικό αέριο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και είναι το καθαρότερο από τα ορυκτά καύσιμα αναφορικά με τις επιπτώσεις στην εκπομπή αερίων θερμοκηπίου. Οι μεγαλύτερες υπόγειες δεξαμενές φυσικού αερίου βρίσκονται στο Ιράν και την Ρωσία. Εκτιμάται ότι τα αποθέματα του φυσικού αερίου θα εξαντληθούν το 2085.

Η αύξηση του πληθυσμού της γης αλλά και η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, οδήγησαν τα τελευταία χρόνια στη ραγδαία αύξηση κατανάλωση ενέργειας κυρίως στις επανομαζόμενες αναπτυσσόμενες αφρικανικές χώρες όσο και σε χώρες πληθυσμιακούς γίγαντες όπως η Ινδία και η Κίνα. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η καύση των ορυκτών καυσίμων που κατά βάση χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για θέρμανση αλλά και στις μεταφορές συμβάλλει πολύ σημαντικά στην αύξηση των συγκεντρώσεων των λεγόμενων αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα. Εκφράζεται από τους επιστήμονες ότι στο μέλλον είναι δυνατό ο ρυθμός κατανάλωσης ενέργειας να αυξηθεί τόσο που οι εξορύξεις να μην αρκούν για την κάλυψη της ζήτησης σε χώρες όπως η Κίνα και η Ινδία.

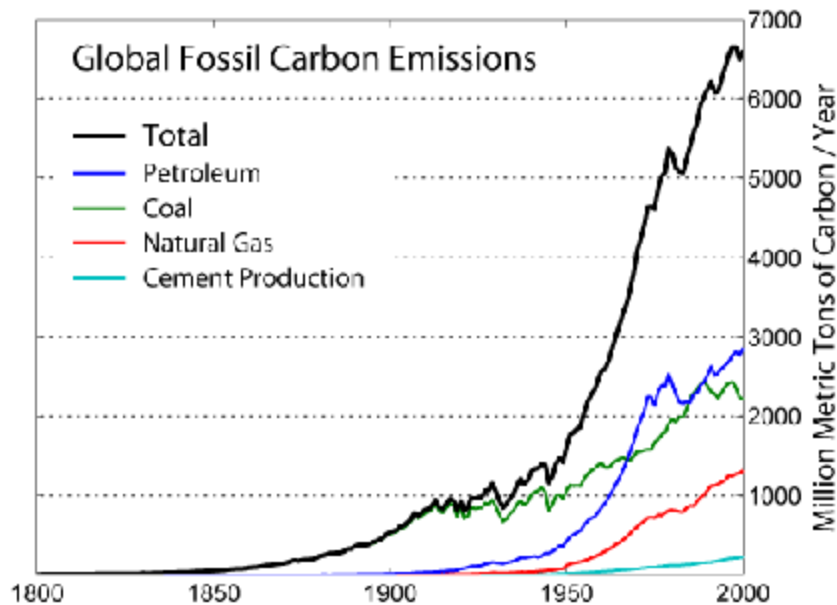


Εικόνα 2: Μεταφορά γαιάνθρακα σε λιγνιτική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου.

Πηγή	Τοις εκατό
Πετρέλαιο	33,5%
Ανθρακα	26,8%
Φυσικό αέριο	20,9%
Πυρηνική	5,8%
Υδροηλεκτρική	2,2%
Άλλες Α.Π.Ε.	10,6%
Άλλο	0,2%

Πίνακας 1: Παγκόσμια πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας για το 2008
Πηγή: Energy in Sweden, 2010

Όλες οι παγκόσμιες οικονομίες εξαρτώνται άμεσα ή έμμεσα ενεργειακά από τα ορυκτά καύσιμα μέχρι και σήμερα. Εντούτοις κυβερνήσεις και οργανισμοί σε παγκόσμια κλίμακα, αναλογιζόμενοι τις αρνητικές επιπτώσεις των παραγόμενων ρύπων από την καύση των ορυκτών καυσίμων συνιστούν τη μείωση της χρήσης αυτών και την παράλληλη αύξηση της παραγωγής άλλων μορφών ενέργειας (ΑΠΕ – ΗΜΕ) με σκοπό την μείωση της επιβάρυνσης των αποτελεσμάτων του φαινομένου του θερμοκηπίου, την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη και την αντιστροφή της κλιματικής αλλαγής που προκύπτει ως αποτέλεσμα της χρήσης των ορυκτών καυσίμων που αποτελούν την πρωταρχική πηγή του προβλήματος με τις υψηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.



Εικόνα 3: Παγκόσμια εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα από ορυκτά καύσιμα.

Μια πολύ προηγμένη μορφή και σημαντική πηγή ενέργειας είναι η πυρηνική που αναφέρεται ως ορυκτό καύσιμο αφού το ουράνιο είναι ορυκτό. Η μετατροπή της πυρηνικής ενέργειας σε ηλεκτρική είναι πλέον στις μέρες μας πολύ ανεπτυγμένη, σημαντικά ποσοστά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε Γαλλία και Γερμανία προκύπτουν από πυρηνικούς σταθμούς. Ειδικότερα τη μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρισμού από πυρηνική ενέργεια παγκοσμίως έχει η Γαλλία με 59 αντιδραστήρες και ποσοστό ενεργειακής κάλυψης 78%. Πλέον όμως το πιθανά χαμηλό κόστος παραγωγής αντισταθμίζεται πάντα από τις δραματικές επιπτώσεις που θα προκύψουν από την πρόκληση ενός ατυχήματος. Ένα ακόμα σημαντικό πρόβλημα είναι ότι τα απόβλητα μιας τέτοιας παραγωγικής διαδικασίας είναι ιδιαίτερα ραδιενεργά με αποτέλεσμα να απαιτούνται ειδικές εγκαταστάσεις για την επ' αόριστων αποθήκευση των αποβλήτων.



Εικόνα 4: Εργοστάσια παραγωγής Πυρηνικής Ενέργειας και φυσικού αερίου .



1.2. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.

Στις μέρες μας ολοένα και αυξανόμενη είναι η χρήση των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, οι οποίες ως διαθέτουν ένα ισχυρό πλεονέκτημα: θα διαρκούν για όσο χρόνο θα υπάρχει και ο πλανήτης σε μορφή που να μπορεί να ζει άνθρωπος. Οι ΑΠΕ ως καθαρή μορφή ενέργειας εκπέμπουν περιορισμένα ή καθόλου αέρια που ευθύνονται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η τεχνολογία των ΑΠΕ αποτελεί σήμερα μια βιώσιμη και τεχνολογικά εφικτή λύση αφού ενέργεια μπορεί να παράγεται από τη μετατροπή φυσικών πόρων σε άλλου είδους χρήσιμες μορφές ενέργειας.

Σημαντικό επίσης πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα καταναμημένων δικτύων διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Για τις περισσότερες ΑΠΕ δεν υπάρχει κόστος πρώτης ύλης ενώ και το κόστος συντήρησης θα πρέπει να περιορίζεται όσο το δυνατόν ώστε να αποτελούν συμφέρουσα λύση ως προς τα ορυκτά καύσιμα.

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο συμφωνήθηκε το 2008 ότι μέχρι το 2020 θα πρέπει να μειωθεί η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, οι συναρτώμενες εκπομπές ρύπων θα πρέπει επίσης να μειωθούν τουλάχιστον κατά 20%, ενώ το 20% της ενέργειας σε όλα τα κράτη μέλη θα πρέπει να παράγεται από ΑΠΕ (www.ypeka.gr). Λίγο αργότερα το 2011 η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έδωσε στη δημοσιότητα έναν οδικό χάρτη για το 2050, με σενάρια για τη μείωση κατά 85% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου προκειμένου να αποτραπούν οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής που πλέον αντιλαμβάνεται ο άνθρωπος με πληθώρα φαινομένων – καταστροφών σε όλο τον πλανήτη (www.energypress.gr , <http://ec.europa.eu>).

Ειδικά για την Ελλάδα ο στόχος για τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου τέθηκαν στο 4% στον ενεργειακό τομέα για το 2008 με παράλληλη διείσδυση των ΑΠΕ κατά 18% (www.ypeka.gr). Η Ελλάδα το 2010 προχώρησε στην αύξηση του εθνικού στόχου συμμετοχής των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας στο 20%, ο οποίος εξειδικεύτηκε σε 40% στην ηλεκτροπαραγωγή, 20% στη θέρμανση – ψύξη και 10% στις μεταφορές. Στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα ποσοστά χρήσης των ΑΠΕ για το 2005 και το απαιτούμενο ποσοστό για το 2020 στις ευρωπαϊκές χώρες.

Οι ενεργειακές ανάγκες παγκοσμίως εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τα ορυκτά καύσιμα και θα συνεχίσουν να εξαρτώνται από αυτά για αρκετές δεκαετίες ακόμα. Η ανάγκη όμως της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει γίνει αντιληπτή σε όλο τον κόσμο και οι περισσότερες χώρες έχουν υπογράψει αντίστοιχες δεσμεύσεις – συνθήκες για χρήση των ΑΠΕ (Συνθήκη του Κιότο). Επιπρόσθετα σε κάποιες χώρες ήδη υπάρχουν ιδιαίτερα θετικά αποτελέσματα από την χρήση τεχνολογιών ΑΠΕ. Αυτές οι χώρες (Γερμανία Ιαπωνία, Καναδάς) εφάρμοσαν καινοτόμες μεθόδους και οδηγήθηκαν σε ερευνητικά προγράμματα εκμετάλλευσης εναλλακτικών πηγών ενέργειας αρχικά και στην συνέχεια σε εντατικοποιημένη βιομηχανική παραγωγή μηχανισμών παραγωγής ανανεώσιμης, ηλεκτρικής κυρίως, ενέργειας. Για παράδειγμα, η Γερμανία και η Ιαπωνία πρωτοπορούν στην εκμετάλλευση φωτοβολταϊκών συστημάτων ενέργειας είτε με τις εγκατεστημένες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είτε με την υψηλή τεχνογνωσία τους στον κλάδο των εξαρτημάτων και μηχανών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



Χώρα	Ποσοστό χρήσης ανανεώσιμων πηγών το 2005	Απαιτούμενο ποσοστό χρήσης ανανεώσιμων πηγών το 2020
Σουηδία	39.8%	49%
Λετονία	32.6%	40%
Φινλανδία	28.5%	38%
Αυστρία	23.3%	34%
Πορτογαλία	20.5%	31%
Εσθονία	18%	25%
Ρουμανία	17.8%	24%
Δανία	17%	30%
Σλοβενία	16%	25%
Λιθουανία	15%	23%
Γαλλία	13%	23%
Βουλγαρία	9.4%	16%
Ισπανία	8.7%	20%
Πολωνία	7.2%	15%
Ελλάδα	6.9%	18%
Σλοβακία	6.7%	14%
Τσεχία	6.1%	13%
Γερμανία	5.8%	18%
Ιταλία	5.2%	17%
Ουγγαρία	4.3%	13%
Ιρλανδία	3.1%	16%
Κύπρος	2.9%	13%
Ολλανδία	2.4%	14%
Βέλγιο	2.2%	13%
Ην. Βασίλειο	1.3%	15%
Λουξεμβούργο	0.9%	11%
Μάλτα	0%	10%

Πίνακας 2: Παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά χώρα
 Πηγή: Renewables Global Status Report, 2010

Υπενθυμίζεται ότι με τον όρο ΑΠΕ νοούνται οι μορφές ενέργειας που προέρχονται από φυσικούς πόρους που βρίσκονται διαθέσιμοι σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον, δεν εξαντλούνται και συνεχώς μπορούν να ανανεώνονται. Επίσης για την εκμετάλλευση των ΑΠΕ δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση (π.χ εξόρυξη, άντληση ή καύση) και μπορούν να μετατρέπονται σε ηλεκτρική ή θερμική ενέργεια. Οι μορφές των ΑΠΕ είναι:

- Ηλιακή Ενέργεια (θερμικά Ηλιακά, Φωτοβολταϊκά),
- Αιολική Ενέργεια,
- Υδροηλεκτρική Ενέργεια,
- Στοιχεία καυσίμου (υδρογόνο),
- Γεωθερμική Ενέργεια,
- Βιομάζα,
- Κυματική Ενέργεια.

Με τον όρο κυματική ενέργεια νοείται η μετατροπή και εκμετάλλευση της ενέργειας των κυμάτων, της παλίρροιας, των θερμοκρασιακών διαφορών του νερού των ωκεανών καθώς και των θαλασσίων ρευμάτων. Συνοπτικά λίγα λόγια για τις περισσότερο γνωστές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δίνονται στη συνέχεια.



➤ **Ηλιακή Ενέργεια**

Είναι η ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο και αξιοποιείται μέσω τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται τη θερμική και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του ήλιου με χρήση μηχανικών μέσων για τη συλλογή, αποθήκευση και διανομή της. Η χρήση της ηλιακής ενέργειας διακρίνεται σε πολλές υποκατηγορίες

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα (photovoltaic) παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που είναι μια τεχνολογία ημιαγωγών με τεράστια πλεονεκτήματα αλλά μεγάλο κόστος. Είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία που αναπτύσσεται με ραγδαίο ρυθμό τα τελευταία χρόνια με μεγάλη αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος. Επίσης μια πολύ σπουδαία εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας είναι τα συστήματα συλλεκτών για θέρμανση ζεστού νερού καθώς και ο ηλιακός θερμοσίφωνας (solar water heating SWH). Τέλος τα συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα (solar concentrators) παραγωγής ενέργειας διακρίνονται σε αρκετές υποκατηγορίες και εκμεταλλεύονται την ανάκλαση του φωτός σε συνδυασμό με διάφορες τεχνικές για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

➤ **Αιολική Ενέργεια**

Ως Αιολική Ενέργεια χαρακτηρίζεται η ενέργεια που παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου. Η ενέργεια αυτή δεν εκπέμπει ή δεν προκαλεί ρύπους. Η μετατροπή της αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρισμό και η ισχύ της, μέσω των αιολικών εγκαταστάσεων, αυξάνεται τα τελευταία χρόνια με μεγάλο ρυθμό. Οι χώρες με την μεγαλύτερη χρήση αιολικής ενέργειας είναι η Γερμανία, η Ισπανία και οι ΗΠΑ. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η Δανία αποτέλεσε την πρωτοπόρο στην εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας με τη μετατροπή της σε ηλεκτρική από πολύ νωρίς από τις αρχές της δεκαετίας του 1980, διατηρώντας ανεμογεννήτριες στη Βόρεια θάλασσα, μια σπουδαία καινοτομία για την εποχή που αποτελεί πρόκληση ακόμα και σήμερα.



Εικόνα 5: Πάρκο Φωτοβολταϊκών συστημάτων – Συγκεντρωτικό Ηλιακό Σύστημα.



➤ **Βιομάζα**

Με τον όρο βιομάζα αποκαλείται οποιοδήποτε υλικό παράγεται από ζωντανούς οργανισμούς (όπως είναι το ξύλο και άλλα προϊόντα του δάσους, υπολείμματα καλλιεργειών, κτηνοτροφικά απόβλητα, απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων κ.λπ.) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας. Η ενέργεια που είναι δεσμευμένη στις φυτικές ουσίες προέρχεται από τον ήλιο. Με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, τα φυτά μετασχηματίζουν την ηλιακή ενέργεια σε βιομάζα. Έτσι οι ζωικοί οργανισμοί προσλαμβάνουν αυτή την ενέργεια από την τροφή τους και αποθηκεύουν ένα μέρος της. Η βιομάζα είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας γιατί στην πραγματικότητα είναι αποθηκευμένη ηλιακή ενέργεια που δεσμεύτηκε από τα φυτά κατά τη φωτοσύνθεση. Όλα τα παραπάνω υλικά, που άμεσα ή έμμεσα προέρχονται από το φυτικό κόσμο, αλλά και τα υγρά απόβλητα και το μεγαλύτερο μέρος από τα αστικά απορρίμματα (υπολείμματα τροφών, χαρτί κ.ά.) των πόλεων συνιστούν τη βιομάζα.

➤ **Γεωθερμική ενέργεια**

Είναι μια ανανεώσιμη μορφή ενέργειας που πηγάζει από το εσωτερικό της γης, μεταφέρεται στην επιφάνεια με θερμική επαγωγή και με την είσοδο στον φλοιό της γης λειωμένου μάγματος από τα βαθύτερα στρώματά της. Το ζεστό νερό που αντλείται χρησιμοποιείται για την θέρμανση κτηρίων, θερμοκηπίων κ.α. Υπάρχουν δύο κύριες εφαρμογές της Γεωθερμικής ενέργειας.

Η πρώτη βασίζεται στη χρήση της θερμότητας της γης για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και άλλες χρήσεις (θέρμανση κτηρίων, θερμοκηπίων). Αυτή η θερμότητα μπορεί να προέρχεται από γεωθερμικά γκαίγκερ που φθάνουν με φυσικό τρόπο ως την επιφάνεια της γης ή γεώτρηση στον φλοιό της γης σε περιοχές που η θερμότητα βρίσκεται αρκετά κοντά στην επιφάνεια. Αυτές οι πηγές είναι συνήθως από μερικές εκατοντάδες μέχρι 3000 m κάτω από την επιφάνεια της γης.

Η δεύτερη εφαρμογή της γεωθερμικής ενέργειας εκμεταλλεύεται τις θερμές μάζες εδάφους ή υπογείων υδάτων για να κινήσουν θερμικές αντλίες και έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε εφαρμογές θέρμανση και ψύξης.

➤ **Υδροδυναμική ενέργεια**

Ονομάζεται η ενέργεια που παρέχεται στον άνθρωπο από τη δύναμη του νερού στη φύση. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος χρήσης της, είναι μέσω των υδατοπτώσεων αλλά και των φραγμάτων. Αρκετά σημαντικά ποσοστά παραγόμενης ενέργειας μπορούν να προκύψουν από την εκμετάλλευση της υδροδυναμικής ενέργειας και της μετατροπής σε ηλεκτρική ειδικότερα τους χειμερινούς μήνες μεγάλες ποσότητες νερού μπορούν να συσσωρευτούν σε φράγματα και επομένως στη συνέχεια μπορούν να θέτουν σε κίνηση υδροδυναμικές μηχανές. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι και η υδροδυναμική ενέργεια είναι μια καθαρή ανεξάντλητη και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, που δεν μολύνει το περιβάλλον και παρέχεται από τη φύση.

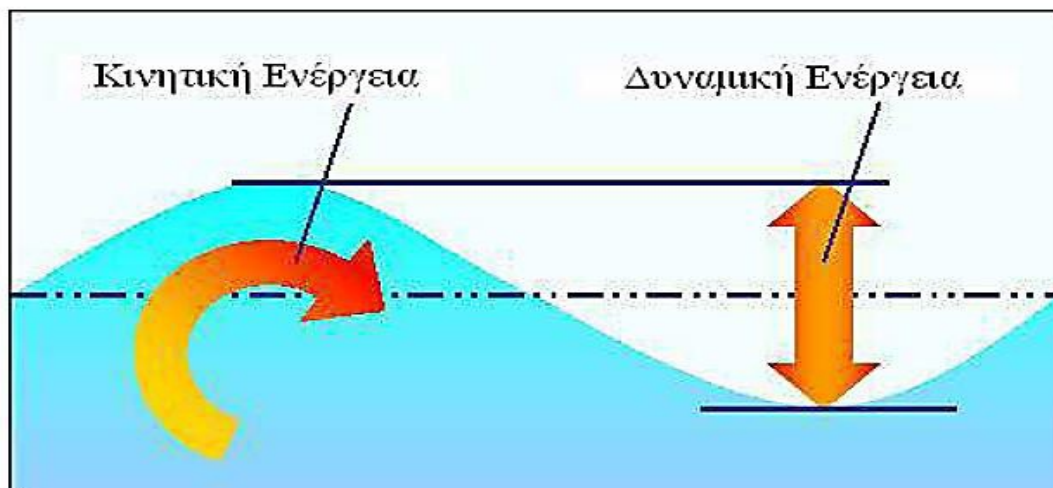


2. Κυματική Ενέργεια - Κύριες Παράμετροι Μελέτης.

Οι κυματισμοί, που αποτελούν τον κύριο παράγοντα σχεδιασμού τόσο παράκτιων όσο και υπεράκτιων τεχνικών έργων, έχουν ανεμογενή προέλευση. Έχουν τυχαία (στοχαστική) μορφή και ακολουθούν συγκεκριμένους πιθανολογικούς νόμους κατανομής. Το επιχειρησιακό πρόβλημα είναι η διάγνωση της συσχέτισης του ύψους κύματος και της περιόδου τους με βάση τη μετεωρολογική πρόγνωση και τη θέση της ακτής. Η μέση κυματική ενέργεια είναι το άθροισμα της δυναμικής ενέργειας των μορίων του νερού που οφείλεται στην κατακόρυφη ταλάντωσή τους και της κινητικής ενέργειας που οφείλεται στην περιστροφική κίνηση των μορίων του νερού.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της κυματικής ενέργειας είναι η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα που παρουσιάζει η οποία είναι η υψηλότερη μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών. Ειδικότερα, στην επιφάνεια της θάλασσας η πυκνότητα της κυματικής ενέργειας είναι 5 φορές μεγαλύτερη από την αιολική ενέργεια που εμφανίζεται στα 20 μετρά υψηλότερα και 20-30 φορές μεγαλύτερη από την ηλιακή ενέργεια στην ίδια περιοχή. Αυτές οι μεγάλες διαφορές οφείλονται στο ότι η κυματική ενέργεια μεταφέρεται από το νερό η πυκνότητα του οποίου είναι 800 φορές μεγαλύτερη από την πυκνότητα του αέρα.

Οι παγκόσμιοι πόροι κυματικής ενέργειας εκφρασμένοι ως ισοδύναμο ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχονται σε 2TW και είναι τάξης μεγέθους της παγκόσμιας κατανάλωσης ηλεκτρισμού. Σύμφωνα με μετριοπαθείς εκτιμήσεις θεωρείται εφικτή η εξαγωγή και αξιοποίηση του 10-25% της ισχύος αυτής και συνεπώς στο μέλλον η κυματική ενέργεια με τη βοήθεια κατάλληλων πολιτικών θα μπορεί να έχει μεγάλη συμβολή στο παγκόσμιο ενεργειακό μίγμα εκμετάλλευσης των ΑΠΕ.



Εικόνα 6: Αθροιστική εικόνα κυματικής ενέργειας [3].

Η συνολική ενέργεια των κυμάτων υπολογίζεται από την σχέση:

$$E_{\Delta} + E_{\kappa} = \frac{1}{4} \rho g A^2 + \frac{1}{4} \rho g A^2 = \frac{1}{8} \rho g H^2 [\text{J/m}^2] \quad (2.1)$$



όπου:

ρ : η πυκνότητα του νερού (kg/m^3),

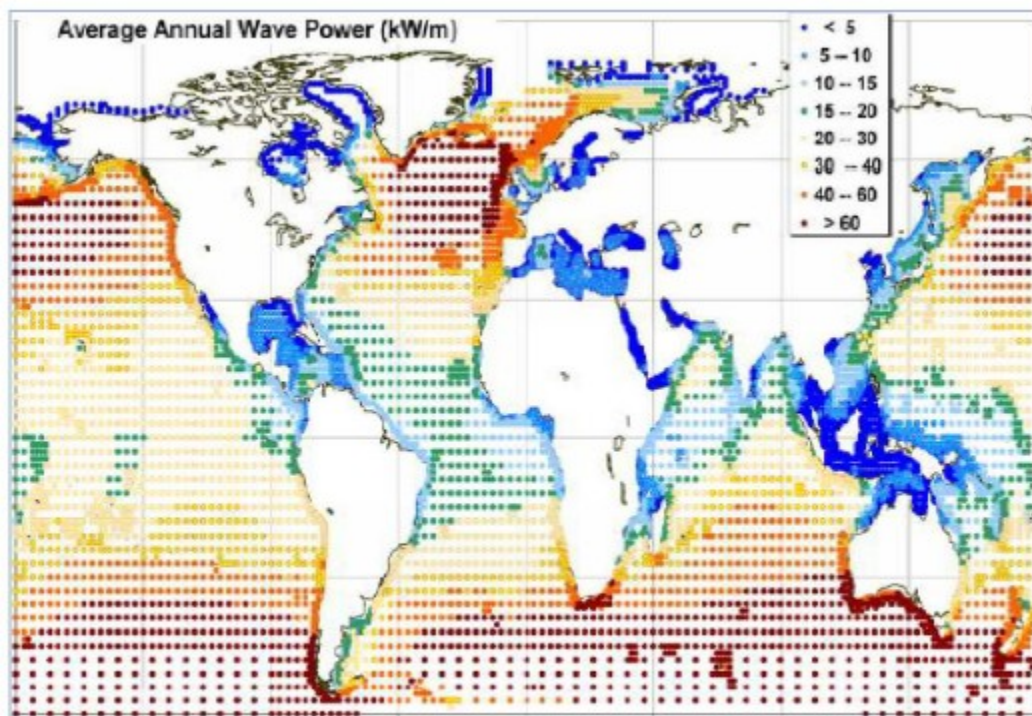
g : η επιτάχυνση της βαρύτητας (m/s^2)

H : το ύψος του κύματος (m),

A : το πλάτος του κύματος $A = H/2$ (m).

2.1 Κυματική Ισχύς.

Η κυματική ισχύς είναι ο ρυθμός με τον οποίο η κυματική ενέργεια μεταδίδεται κατά την κατεύθυνση της διάδοσης του κύματος. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος έκφρασης της ισχύος των κυμάτων είναι σε kW ανά μετρό μετώπου του κύματος, δηλαδή kW/m.



Εικόνα 7: Μέσες τιμές κυματικής ισχύος σε παγκόσμια κλίμακα. [3]

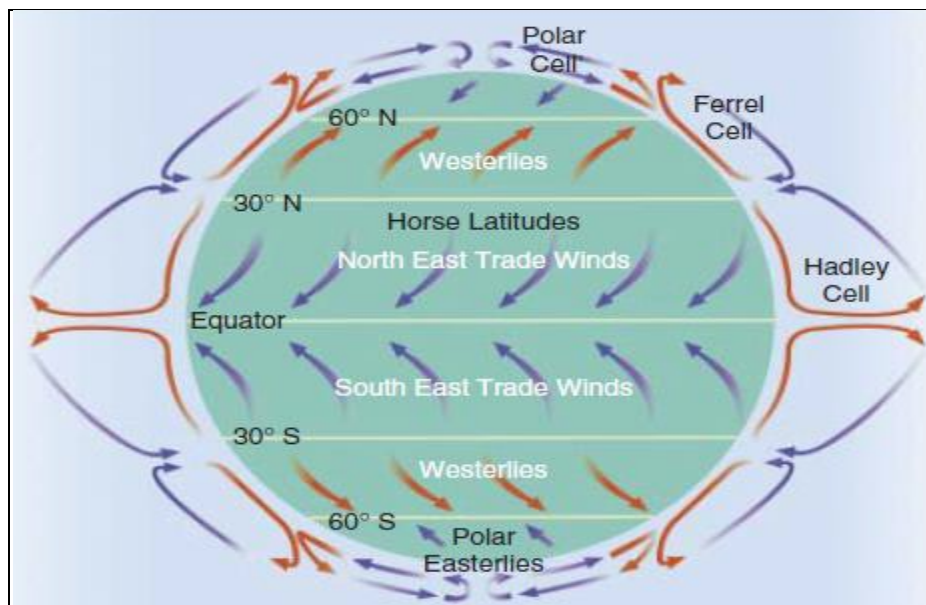
Τα υψηλότερα επίπεδα κυματικής ενέργειας στον πλανήτη μας εμφανίζονται στην περιοχή του Αν. Ατλαντικού και του Ν. Ειρηνικού. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες το υπεράκτιο κυματικό δυναμικό για τις χώρες της Ε.Ε., συμπεριλαμβανομένης της Νορβηγίας, εκτιμάται σε 320 GW, από τα οποία περίπου 30 GW αφορούν την Μεσόγειο Θάλασσα. Σε ετήσια βάση, ο μέσος όρος κυματικής ισχύος κυμαίνεται στον Αν. Ατλαντικό σε 2570 kW/m, στη Β. Θάλασσα 10-25 kW/m και στο Αιγαίο όπου σημειωτέον παρουσιάζονται οι υψηλότερες τιμές κυματικής ισχύος στην Μεσόγειο- 4-11 kW/m. Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό για τα κράτη μέλη της Ε.Ε. υπολογίζεται συνολικά σε 150-230 TWh/έτος, από τα οποία 5-9 TWh/έτος αντιστοιχούν στις ελληνικές θάλασσες.



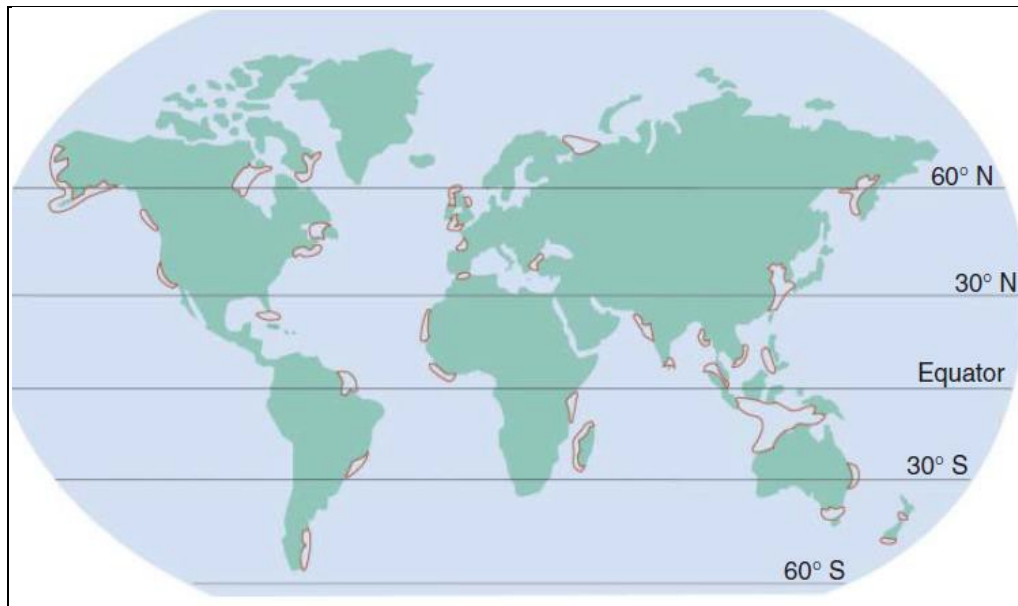
2.2 Η συμβολή των ανέμων στη δημιουργία θαλασσίων κυμάτων.

Με αναφορά την κυματική ισχύ του πλανήτη που παρουσιάστηκε παραπάνω προκύπτει ότι οι κυματικοί πόροι δεν διανέμονται ισομερώς μεταξύ των χωρών που βρέχονται από θάλασσες και ωκεανούς. Αυτή η ανισοκατανομή οφείλεται κυρίως στο μοτίβο των ανέμων που εμφανίζονται. Σημαντική για την κατανόηση της συμβολής των ανέμων στην δημιουργία κυμάτων υπήρξε η συμβολή των G.Hadley (1685-1768) και W.Ferrell (1817-1981). Παρουσιάζεται στη συνέχεια συνοπτικά η σημασία της ζώνης γεωγραφικού πλάτους και της κατεύθυνσης των ανέμων.

- Οι **δυτικοί άνεμοι** (*westerlies*) δυνατοί αλλά ευμετάβλητοι με γεωγραφικό πλάτος μεταξύ 40° - 60° (βόρειοι και νότιοι) παράγουν το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας εκμεταλλεύσιμης κυματικής ενέργειας. Κατά αυτή την έννοια τόποι με δυτικές όχθες ευνοούνται.
- Οι **αληγείς άνεμοι** (*tradewinds*) που πνέουν σε γεωγραφικό πλάτος μεταξύ 10° και 30° (βόρειοι και νότιοι) είναι επίσης πολύ σημαντικοί για την μετατροπή κυματικής ενέργειας. Παρά το ότι παράγουν κύματα με μικρότερη κατά μέσο όρο ενέργεια από τους δυτικούς ανέμους, είναι πιο σταθεροί.
- Οι **πολικό ανατολικό άνεμοι** (*Polareasterlies*) έχουν μικρή επίδραση στο παγκόσμιο κυματικό δυναμικό καθώς παράγουν μικρά κύματα τα οποία συχνά συγκρούονται με πάγους χάνοντας μεγάλο μέρος της ενέργειάς τους.



Εικόνα 8: Κατανομή ανέμων στις γεωγραφικές ζώνες. [3]



Εικόνα 9: Ακτογραμμές υψηλού κυματικού δυναμικού. [3]

2.3 Γένεση των κυματισμών.

Ο ρόλος του ανέμου στο σχηματισμό των κυμάτων είναι κυρίαρχος όπως άλλωστε και του ήλιου στην δημιουργία των ανέμων. Η κίνηση των ατμοσφαιρικών μαζών προκαλείται κυρίως από την ηλιακή θερμότητα και την περιστροφή της γης. Η ατμόσφαιρα της γης εκτίνεται σε ύψος μεγαλύτερο από 100km. Τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας κυρίως, απορροφούν διαφορετικά ποσά ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτή η διαφορική θέρμανση της ατμόσφαιρας αποτελεί την γενεσιουργό αιτία της αιολικής ενέργειας. Μέρος της αιολικής ενέργειας και πιο συγκεκριμένα της ενέργειας των ανέμων της τροπόςφαιρας, μεταφέρεται στην υδάτινη επιφάνεια σχηματίζοντας έτσι τα κύματα. Η μεταφορά αυτή παρέχει μια φυσική αποθήκευση την αιολικής ενέργειας στο νερό της επιφάνειας της θάλασσας.



Εικόνα 10: Δημιουργία και διάδοση κυμάτων. [3]

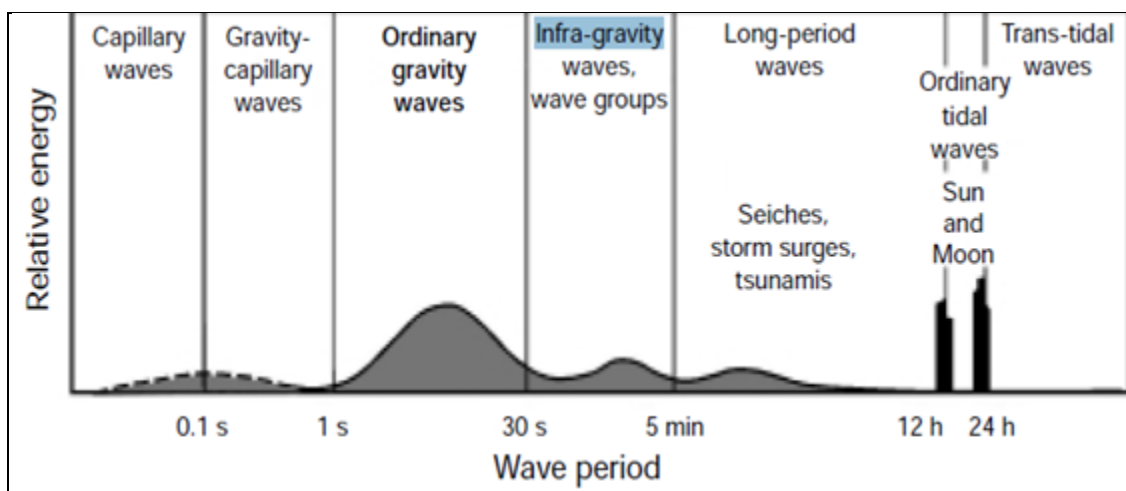


Το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται στα κύματα και επομένως το μέγεθος αυτών των κυμάτων εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου, την διάρκεια πνοής του ανέμου και από την απόσταση πάνω από την οποία πνέει ο άνεμος. Ισχύς συγκεντρώνεται σε κάθε στάδιο σχηματισμού των κυμάτων με αποτέλεσμα ηλιακή ισχύς της τάξης των 100 W/m^2 να σχηματίζει κύματα ισχύος $10\text{-}50 \text{ kW/m}$ μετώπου κύματος. Συνεπώς, η κυματική ενέργεια θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μια συμπυκνωμένη μορφή της ηλιακής ενέργειας.

Κάθε κύμα χαρακτηρίζεται από τέσσερις κύριες παραμέτρους.

- Το ύψος H , που είναι η κατακόρυφη απόσταση από την κορυφή ως το βαθύτερο σημείο κοιλιάς.
- Το μήκος κύματος λ , που είναι η οριζόντια απόσταση μεταξύ των κορυφών δύο διαδοχικών κυμάτων.
- Την περίοδο T , που είναι ο χρόνος σε δευτερόλεπτα που χρειάζεται για να διέλθουν από τον ακίνητο παρατηρητή δύο διαδοχικές κορυφές.
- Την ταχύτητα C , η οποία χωρίζεται σε ταχύτητα ομάδας και σε ταχύτητα φάσης.

Τα κύματα μπορούν να χαρακτηρισθούν με βάση την περίοδό τους. Κύματα με περίοδο έως $0,1\text{sec}$ λέγονται «τριχοειδή», με περίοδο μεταξύ $0,1\text{-}1\text{sec}$ «τριχοειδή-βαρύτητας» και με περίοδο $(1\text{-}30) \text{ sec}$ «βαρύτητας». Κύματα με περίοδο $30\text{sec}\text{-}5\text{min}$ «υπό-βαρύτητας». Κύματα με περίοδο μεγαλύτερη των 5min προέρχονται είτε από τσουνάμι είτε από παλίρροιας.



Εικόνα 11: Χαρακτηρισμός κυμάτων ως προς την περίοδο. [3]

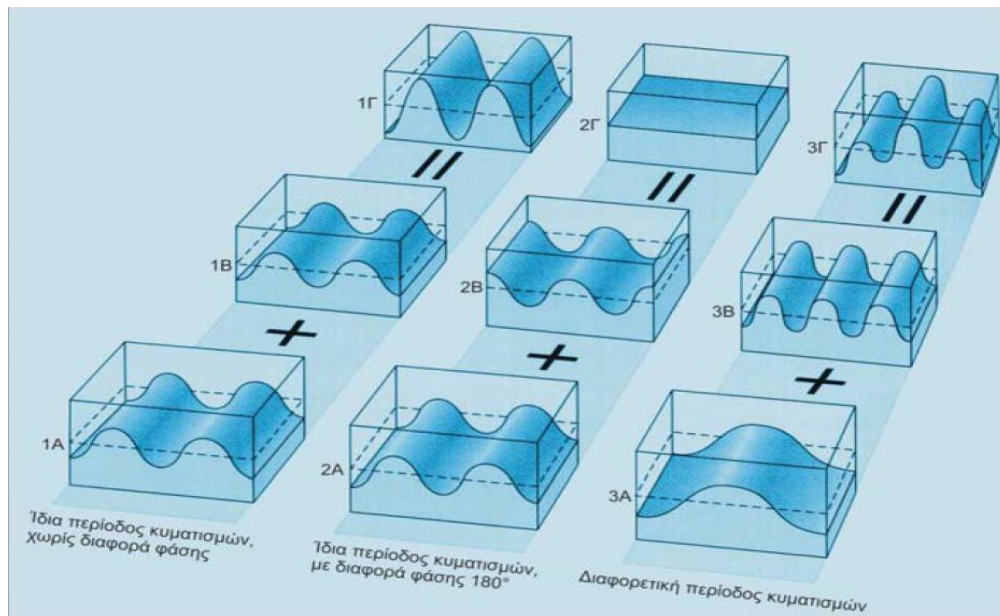
Για όλες της μορφές των κυμάτων ισχύει η σχέση μεταξύ της ταχύτητας του μήκους κύματος και της περιόδου: $c = \lambda/T$.

Τα κύματα βαρύτητας που στην βιβλιογραφία αναφέρονται και ως ανεμογενή κύματα παρουσιάζουν την υψηλότερη ενεργειακή συγκέντρωση και είναι τα πιο σημαντικά από την άποψη των επιπτώσεων τους στον άνθρωπο.

Η παρουσία δυτικών ανέμων για μεγάλο χρονικό διάστημα είναι απαραίτητη για τη δημιουργία πλήρως ανεπτυγμένων κυμάτων. Μάλιστα απαιτείται η εμφάνιση των δυτικών ανέμων σε τακτά χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια του έτους, προκειμένου να δημιουργείται μια ικανοποιητική και χρήσιμη πηγή ενέργειας.



Στην πραγματικότητα δεν υπάρχει ομοιογένεια στις μορφές των κυμάτων. Αντίθετα δημιουργούνται διάφοροι κυματισμοί που συμβάλλουν μεταξύ τους με διάφορους συνδυασμούς διαφοράς φάσης και έτσι η μορφή της θαλάσσιας επιφάνειας είναι αποτέλεσμα μιας υπέρθεσης κυμάτων.



Εικόνα 12: Υπέρθεση (ενισχυτική και αποσβεστική) κυμάτων. [3]

Ο κύριος παράγοντας ανεμοκυματογένεσης είναι το πέρασμα ενέργειας από τα κινούμενα κατώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα στις επιφανειακές θαλάσσιες μάζες. Τα τριχοειδή αρχικά κύματα (capillary waves) εξελίσσονται σε διαταραχές της επιφάνειας μήκους πολλών μέτρων, που δέχονται τις διακυμαινόμενες λόγω τύρβης διατμητικές και εγκάρσιες (πίεσεις) δυνάμεις του αέρα. Η τροφοδοσία σε μηχανική ενέργεια από την ατμόσφαιρα αρχικά αυξάνει εκθετικά και στη συνέχεια βαίνει φθίνουσα καθώς οι κυματισμοί αυξάνονται σε περίοδο και μήκος, ώστε η φασική τους ταχύτητα να προσεγγίζει την ταχύτητα του ανέμου.

Αρκετές θεωρίες, με υπερέχουσα τη θεωρία των Phillips (1957) και Miles (1960), προσπάθησαν να ερμηνεύσουν τη γένεση των ανεμογενών κυματισμών. Σύμφωνα με την επικρατούσα θεωρία, η κυματογένεση ξεκινά με γραμμική αύξηση του κύματος λόγω συντονισμού με τις τυρβώδεις διαταραχές πίεσης και τριβής στην επιφάνεια, και συνεχίζει με εκθετικό ρυθμό ανάπτυξης λόγω υδροδυναμικής αστάθειας. Η επίδραση του ανέμου μιας συγκεκριμένης κατεύθυνσης διαπιστώθηκε ότι προκαλεί κυματογένεση σε έναν τομέα $\pm 45^\circ$ εκατέρωθεν της διεύθυνσης του ανέμου, με αποτέλεσμα να διαμορφώνεται ένα πεδίο τρισδιάστατων κυματισμών.

Τα στατιστικά χαρακτηριστικά μεγέθη των ανεμογενών κυματισμών είναι συναρτήσεις των εξής ανεξάρτητων μεταβλητών όπως:

- F = μήκος αναπτύγματος. Είναι η χαρακτηριστική γραμμική διάσταση του θαλάσσιου πεδίου από ακτή σε ακτή κατά μήκος της οποίας δρα ο κυματισμός. Με βάση την αναφερθείσα επίδραση του ανέμου σε τομέα $\pm 45^\circ$ στην περίπτωση πολύπλοκης τοπογραφίας ακτών και πλευρικού περιορισμού του



πεδίου ανάπτυξης κυματισμών, το ισοδύναμο (effective) μήκος ανάπτυξης ορίζεται σύμφωνα με τους συμβολισμούς (Εικ.5) ως εξής:

$$F_{\text{eff}} = \frac{\sum_{i=-N}^N F_i (\cos a_i)^2}{\sum_{i=-N}^N \cos a_i} \quad (2.1)$$

Όπου

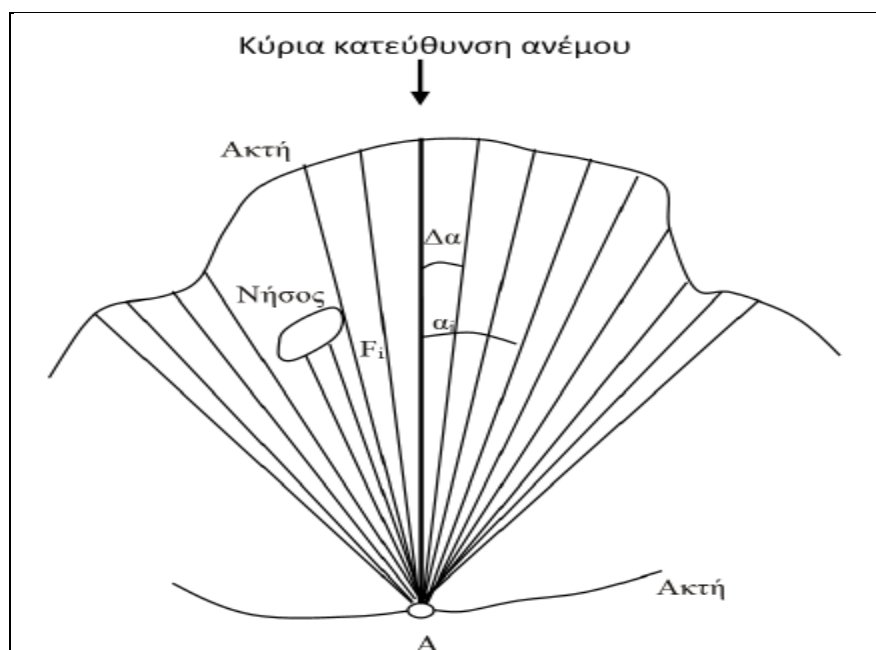
i ακέραιος που περιγράφει την κατεύθυνση ακτίνων ανά $\Delta\alpha=5$ ή 10 μοίρες, εκατέρωθεν της κύριας κατεύθυνσης του ανέμου, a_i η γωνία που σχηματίζεται από την κύρια κατεύθυνση πνοής και την εκάστοτε ακτίνα ($a_i=i \Delta\alpha$), $2N+1$ ο αριθμός των ακτίνων (συνήθως $\Delta\alpha=5$ ο, $N=9$)

t_D η διάρκεια πνοής του ανέμου

U_{10} η χαρακτηριστική ταχύτητα του ανέμου αναφερόμενη σε ύψος 10 m πάνω από την επιφάνεια.

Η ταχύτητα αυτή είτε μετρείται αυτούσια είτε μεταφέρεται από άλλο ύψος, με βάση τη λογαριθμική κατανομή στην οριακή στιβάδα της ατμόσφαιρας

$$U_{10} = U(z) \left(\frac{10}{z} \right)^{1/7} \quad (2.2)$$



Εικόνα 13: Υπολογισμός F_{eff} στο σημείο A.



Η ταχύτητα αυτή ως παράγοντας κυματογένεσης επηρεάζεται από τη θερμική ευστάθεια της κατώτερης ατμόσφαιρας που περιγράφεται από τη διαφορά θερμοκρασίας αέρα/νερού.

Λόγω της μη γραμμικής μορφής της σχέσης ταχύτητας ανέμου και διατμητικής τάσης που ασκείται στην επιφάνεια, χρησιμοποιείται συνήθως η ταχύτητα τριβής u_w^* που ορίζεται:

$$u_w^2 = C_D U_{10}^2 \quad (2.3)$$

όπου ο συντελεστής τριβής στη διεπιφάνεια αέρα-θάλασσας: . προκύπτει με την εφαρμογή της σχέσης:

$$C_D = 0.001(1.1 + 0.035 U_{10}) \quad (2.4)$$

Οι οπτικές παρατηρήσεις των κυματισμών από τα εμπορικά και πολεμικά πλοία που συγκεντρώνονται, εδώ και χρόνια, αποτελούν μια σημαντική βάση εμπειρικών δεδομένων (Αθανασούλης και Σκασουρλής, 1992). Σήμερα διατίθενται και συσκευές για την καταγραφή και ανάλυση των κυματισμών. Οι μετρήσεις των κυματισμών γίνονται με διάφορες μεθόδους. Σε σημεία κοντά στην ακτή σταθεροποιούνται κατακόρυφα μεταλλικές ράβδοι (κυματομετρητές) που συνδέονται με ηλεκτρικό κύκλωμα. Η μεταβλητή διαβροχή τους από τη μετακινούμενη στάθμη επιφάνειας συνεπάγεται μεταβολή αντίστασης, που καταγράφεται σαν αναλογικό σήμα. Πιο σύγχρονη διάταξη είναι ο κυματογράφος πίεσεως, ο οποίος εγκαθιστάμενος σε βάθος d , «αισθάνεται» και καταγράφει, μέσω αισθητήρα πίεσεων, τους κυματισμούς με μήκος $L > 2d$ συνεπαγόμενος όμως και μείωση του καταγραφόμενου ύψους κύματος, ανάλογα με τη συχνότητα του κύματος.

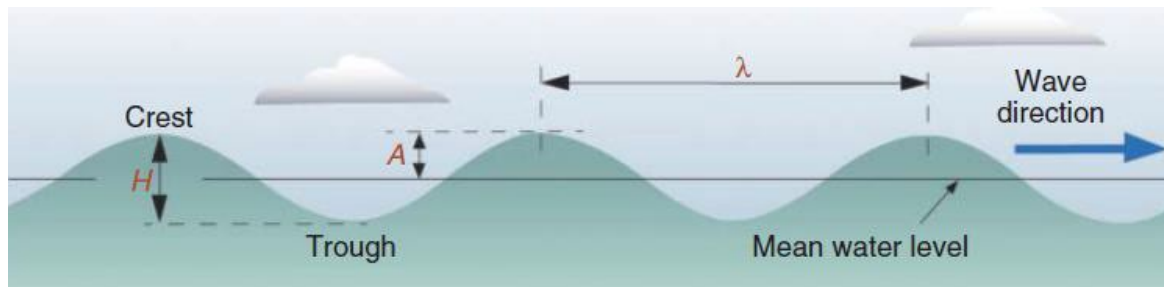
Οι πιο σύγχρονες διατάξεις, γνωστές και σαν «πλωτήρες ιππείς κυμάτων» (wave riding buoys), διασπείρονται ή αγκυροβολούνται στην ανοιχτή θάλασσα, επιπλέουν, καταγράφουν τις τρισδιάστατες, επιταχύνσεις λόγω των κυματισμών και τηλεμεταδίδουν ή αποθηκεύουν στη μνήμη τους, τις ψηφιοποιημένες πληροφορίες τους. Τα τελευταία χρόνια οι μετρήσεις πεδίου συνδυάζονται με μαθηματικές προσομοιώσεις και αποτελούν επίσης σημαντική πηγή δεδομένων (Σουκισιάν και συν., 2007).

2.3.1 Θεωρία γραμμικών κυμάτων του Airy.

Η θεωρία του *Airy* ή θεωρία των γραμμικών κυμάτων επινοήθηκε από τον Άγγλο μαθηματικό και αστρονόμο *G.Airy* (1801-1892). Η θεωρία αυτή ισχύει για ανεμογενή κύματα με την παραδοχή ότι το ύψος του κύματος είναι πολύ μικρό σε σχέση με το βάθος του νερού και το μήκος κύματος. Πρέπει δηλαδή να ισχύουν: $H \ll D$ και $H \ll \lambda$, ενώ δεν υπάρχουν περιορισμοί για την σχέση μεταξύ του βάθους και του μήκους κύματος. Στην θεωρία αυτή το κύμα έχει ημιτονοειδή μορφή με πλάτος A , ύψος H και μήκος κύματος λ όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.

Η εξίσωση που περιγράφει τα γραμμικά κύματα είναι:

$$h = \frac{H}{2} \sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right) \quad (2.5)$$



Εικόνα 14: Μορφή γραμμικών κυμάτων του Airy.[3]

όπου h το ύψος του κύματος τη χρονική στιγμή t σε οριζόντια απόσταση x .
 Οι γενικές εξισώσεις της ταχύτητας και του μήκους κύματος είναι:

$$C = \frac{g\lambda}{2\pi} \tanh\left(2\pi\frac{D}{\lambda}\right) \quad (2.6)$$

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(2\pi\frac{D}{\lambda}\right) \quad (2.7)$$

Οι εξισώσεις αυτές επιδέχονται απλοποιήσεως που εξαρτώνται από την τιμή του λόγου D/L όπου D το βάθος του νερού από τον πυθμένα.

Ρηχά κύματα	Ενδιάμεσα κύματα	Βαθιά κύματα
$D < L/20$	$L/20 < D < L/2$	$L/2 < D$
$L = T\sqrt{gD}$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi D}{L}\right)$	$L = \frac{gT^2}{2\pi} = 1.56T^2$
$C = \sqrt{gD}$	$C^2 = \frac{gL}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi D}{L}\right)$	$C^2 = \frac{gL}{2\pi} = 1.56T$

Η κίνηση των μορίων του νερού κατά τη θεωρία του Airy είναι κυκλική με διάμετρο που μειώνεται εκθετικά με το βάθος.

$$R = He^{-\frac{2\pi D}{L}} \quad (2.8)$$

όπου: R : η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς σε βάθος D ,
 L : το μήκος του κύματος,
 H : το ύψος του κύματος.

Το ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται από τα κύματα είναι

$$J = \rho g^2 T \frac{H^2}{32\pi} = 0.986T H^2 [\text{kW/m}] \quad (2.9)$$

Προκύπτει δηλ. ότι η ενέργεια των κυμάτων είναι ανάλογη της περιόδου και ανάλογη του τετραγώνου του ύψους τους.

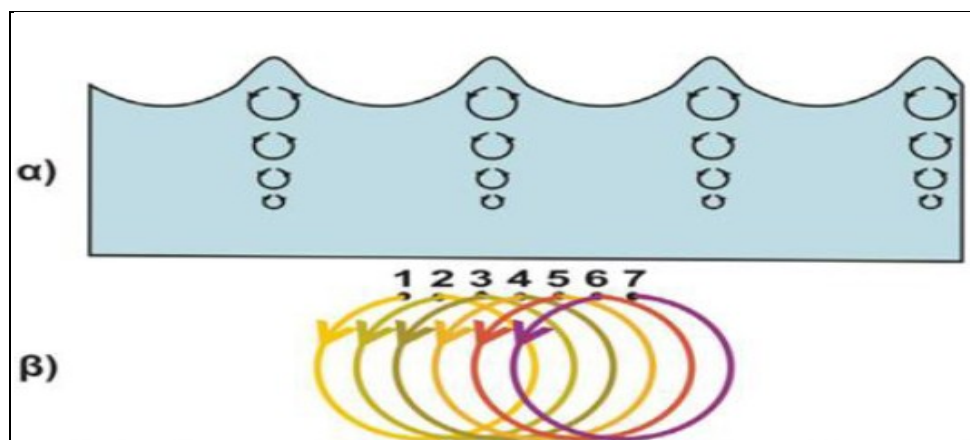


2.3.2 Θεωρία του Stokes.

Ο Stokes παρατήρησε ότι η θεωρία του *Airy* δεν είναι αρκετή για να εξηγήσει τις περιπτώσεις κατά τις οποίες μεταφέρεται μάζα νερού κατά την διεύθυνση της διάδοσης του κύματος. Η αδυναμία της θεωρίας του *Airy* προκύπτει από την υπόθεση ότι το ύψος του κύματος πρέπει να είναι πολύ μικρότερο από το μήκος του. Αυτό όμως δεν συμβαίνει πάντα στην πραγματικότητα. Έτσι ο Stokes έλαβε υπόψη του στους υπολογισμούς του και το ύψος του κύματος H . Η συνθήκη που οφείλει να πληρείται για να ισχύει η θεωρία του Stokes είναι ότι το βάθος πρέπει να είναι μεγάλο σε σχέση με το μήκος κύματος λ και συγκεκριμένα: $D/\lambda > 0,1$. Τότε η ταχύτητα του κύματος δίνεται από την σχέση:

$$C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} \left(1 + \frac{\pi^2 H^2}{2\lambda^2}\right) \quad (2.10)$$

Κατά την θεωρία του Stokes τα μόρια του νερού κινούνται γράφοντας κυκλικά τόξα και όχι πλήρεις κύκλους. Ως αποτέλεσμα τα μόρια του νερού κινούνται στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Δηλ. επιπρόσθετα υπάρχει διάδοση μάζας σε αντίθεση με την θεωρία του *Airy* κατά την οποία δικαιολογείται μόνο διάδοση ενέργειας.



Εικόνα 15: Εξέλιξη κυμάτων κατά τη θεωρία Stokes. [3]

Κατά τη θεωρία του Stokes η ταχύτητα διάδοσης της μάζας δίνεται από τη σχέση:

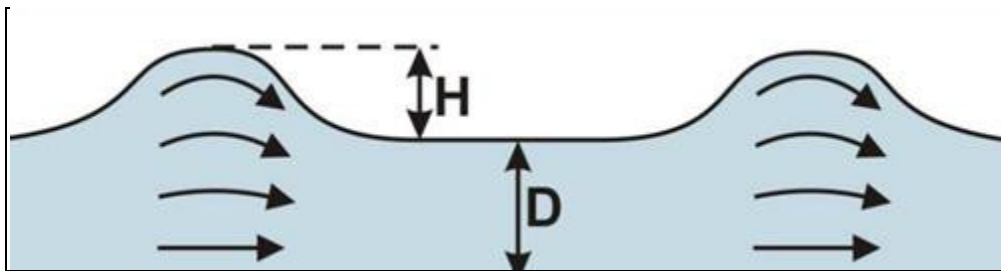
$$C_m = \frac{\pi H^2}{\lambda^2} C \quad (2.11)$$

Προκύπτει έτσι ότι για πολύ μικρό ύψος κύματος σε σχέση με το μήκος κύματος η ταχύτητα μάζας τείνει στο μηδέν επιβεβαιώνοντας δηλαδή την θεωρία του *Airy*. Η μορφή του κύματος κατά Stokes μοιάζει με ημιτονοειδή καμπύλη αλλά έχει πεπλατυσμένες κοιλιές και οξύτερες κορυφές.



2.3.3 Θεωρία των μεμονωμένων κυμάτων.

Κατά τη θεωρία όπως υποδεικνύει και το όνομά της κάθε κύμα εξετάζεται χωριστά. Το κύμα διαδίδεται πάνω στην ελεύθερη υδάτινη επιφάνεια ως μια έξαρση χωρίς αυτή να ακολουθείται από κοιλιά. Τα μόρια του νερού είναι ακίνητα και μόλις περάσει από πάνω τους το κύμα κινούνται προς τα μπροστά γράφοντας είτε τροχιά τόξου εφόσον βρίσκονται στην επιφάνεια, είτε ευθύγραμμου τμήματος αν βρίσκονται στον πυθμένα.



Η απόσταση των κυμάτων που κινούνται προς τα εμπρός είναι:

$$x = 4 \sqrt{\frac{DH}{3}} \quad (2.12)$$

Η ταχύτητα του μεμονωμένου κύματος είναι:

$$C = \sqrt{g(D + H)} \quad (2.13)$$

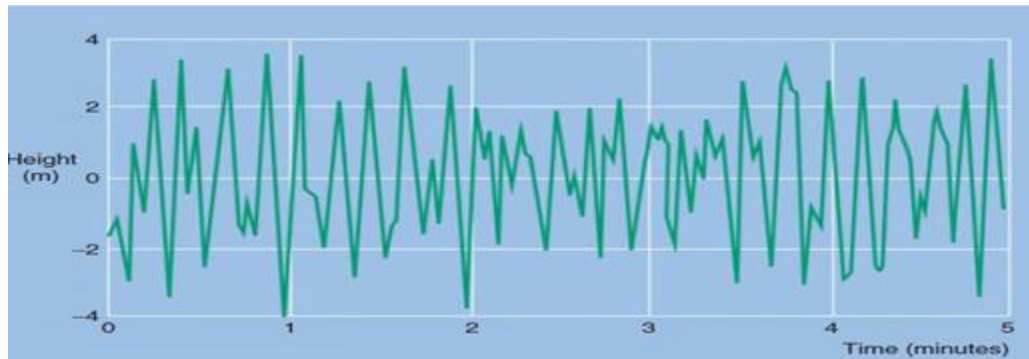
Τα μεμονωμένα κύματα δεν συναντώνται συχνά στην φύση όμως μπορούν να θεωρηθούν σαν μεμονωμένα κύματα που βρίσκονται σε πολύ ρηχά νερά και οικορυφές τους απέχουν περισσότερο από απόσταση s . όπου:

$$s \geq 2\pi D \sqrt{\frac{D}{3H}} \quad (2.14)$$

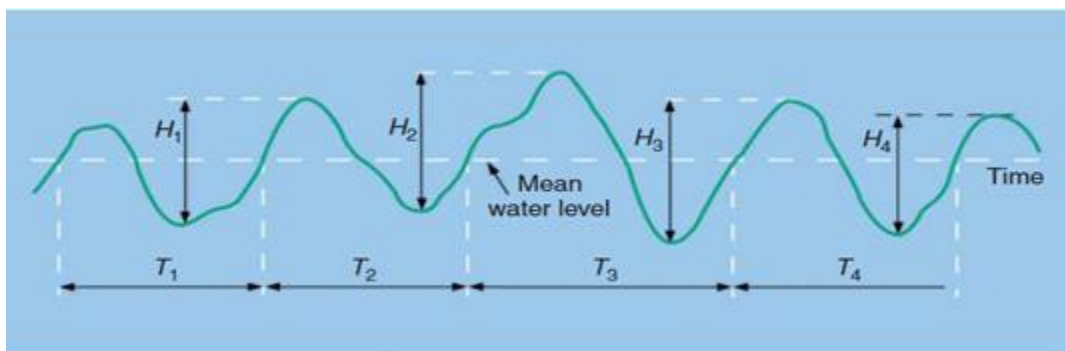
2.3.4 Στοχαστική θεώρηση των κυμάτων.

Αν και οι παραπάνω θεωρίες είναι πολύ χρήσιμες για την κατανόηση των κυμάτων, στην πράξη τα κύματα με τα οποία καλούνται να αλληλεπιδράσουν οι μετατροπείς κυματικής ενέργειας δεν εμπίπτουν σε κάποια από αυτές. Στην παρακάτω χρονοσειρά δίνεται η εξέλιξη του ύψους ενός κύματος για χρονική διάρκεια 5min σε συνθήκες έντονης θαλασσοταραχής.

Σε μια τυχαία θάλασσα τα κύματα δεν έχουν την ημιτονοειδή μορφή των γραμμικών κυμάτων που επιτρέπει τον εύκολο καθορισμό του ύψους και της περιόδου τους. Για το λόγο αυτό οι ερευνητές καταφεύγουν στην περιγραφή των φαινομένων με τη βοήθεια της στατιστικής περιγραφής αυτού. Δηλ. η κίνηση του κύματος αντιμετωπίζεται ως στοχαστικό (τυχαίο) σήμα το οποίο μπορεί να μελετηθεί με όρους στατιστικής και των εργαλείων αυτής.

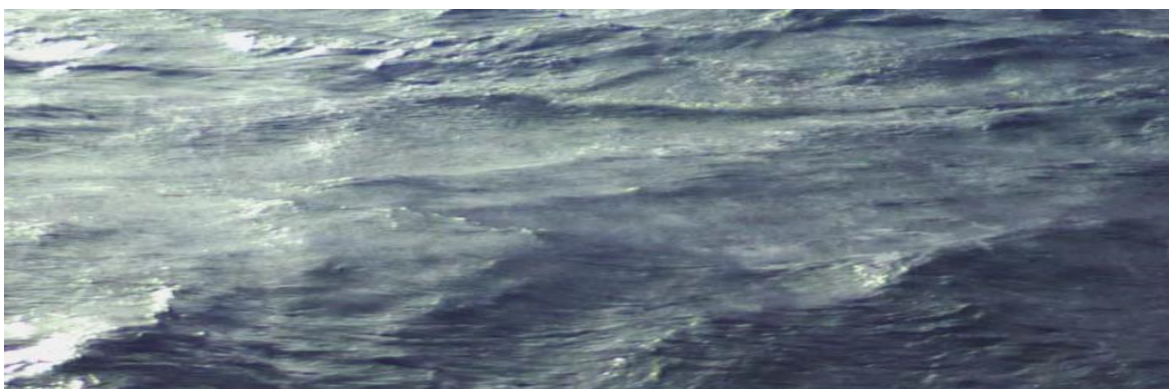


Εικόνα 16: Χρονοσειρά σήματος περιγραφής ύψους κύματος. [3]



Εικόνα 17: Ακολουθία κυμάτων ποικίλου ύψους και περιόδων. [3]

Το πιο σημαντικό στατιστικό στοιχείο είναι το «σημαντικό ύψος κύματος» (*significant wave height*, *SWH*) που ορίζεται ως ο μέσος όρος του ενός τρίτου των υψηλότερων κυμάτων που καταγράφονται. Για παράδειγμα αν μετρηθούν 30 κύματα τότε ο μέσος όρος των 10 υψηλότερων κυμάτων δίνει το σημαντικό ύψος κύματος. Αυτός ο ορισμός για το SWH δημιουργήθηκε κατά τον 2ο ΠΠ ως ένας εύκολος τρόπος υπολογισμού της αγριότητας της θάλασσας. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό των τυχαίων κυμάτων είναι η περίοδός τους (T) που όπως το ύψος είναι στατιστικό μέγεθος. Αντίστοιχα ορίζεται ως «σημαντική περίοδος του κύματος» (*significant wave period*, *SWP*) η περίοδος του ενός τρίτου των υψηλότερων κυμάτων.



Εικόνα 18: Κατάσταση "Τυχαίας" Θάλασσας.

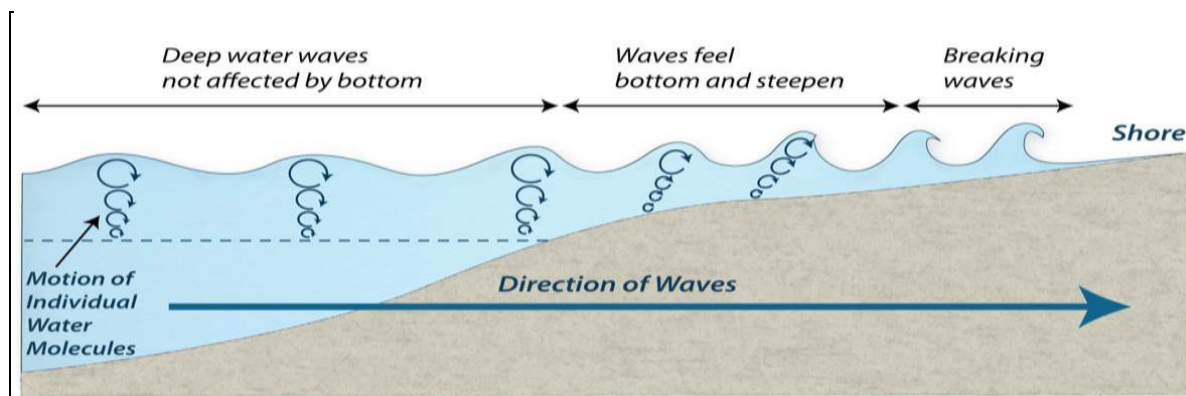


2.3.5 Τροποποίηση των κυμάτων.

Ένα συχνά εμφανιζόμενο φαινόμενο που παρατηρείται στα χιλιόμετρα ακτογραμμών της χώρας μας είναι η θραύση των κυμάτων.

Το φαινόμενο αυτό μπορεί να συμβεί στις 3 ακόλουθες περιπτώσεις:

- Σε ρηχά νερά όπου το βάθος d είναι πολύ μικρότερο από το μήκος του κύματος λ , όταν το ύψος του κύματος ξεπεράσει τα $0.8d$.

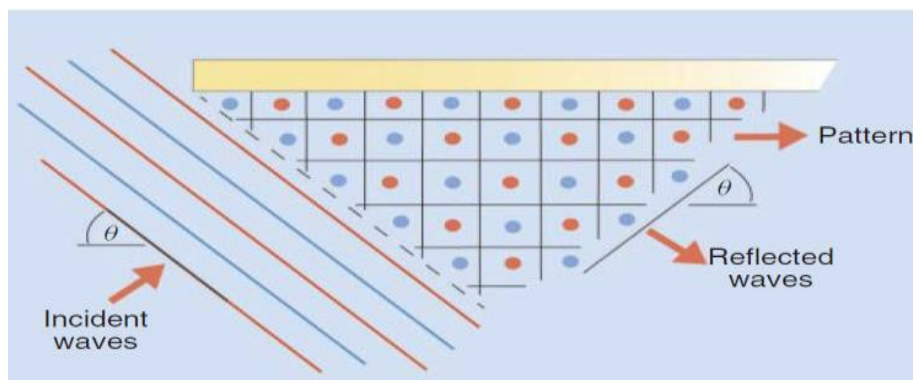


Εικόνα 19: Περίπτωση Θραύσης Κύματος. [3]

- Σε βαθιά νερά όταν η κλίση του κύματος, η οποία ορίζεται ως το λόγος του ύψους h και του μήκους του κύματος λ , υπερβεί την τιμή 0.17 .
- Σε συνθήκες ισχυρών ανέμων είναι πιθανό ο αέρας να ρίξει την κορυφή του κύματος από την βάση της. Κατά την θραύση τους τα κύματα χάνουν σημαντικό μέρος της ενέργειάς τους.

Επίσης τροποποιήσεις των κυμάτων εμφανίζονται κατά την αλληλεπίδραση αυτών με φυσικά εμπόδια. Τα 3 βασικά φαινόμενα που προκύπτουν από την σύγκρουση των κυμάτων με αντικείμενα είναι:

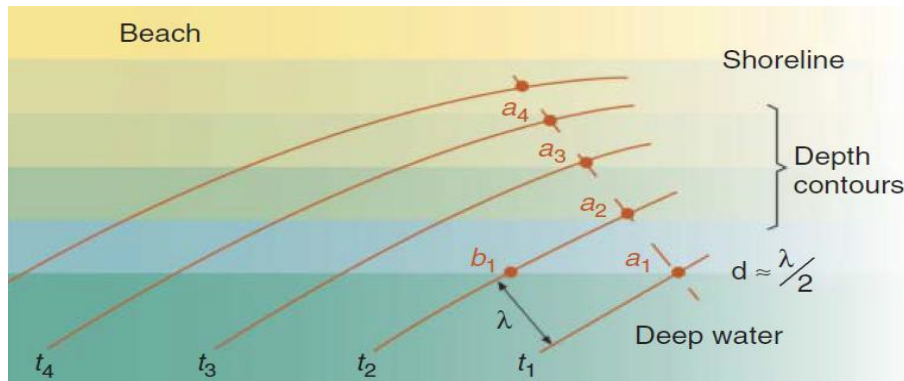
- Η ανάκλαση του κύματος: όπου το κύμα αλλάζει πορεία και στρέφεται πίσω στην πηγή του.



Εικόνα 20: Εικόνα ανακλώμενου κύματος. [3]

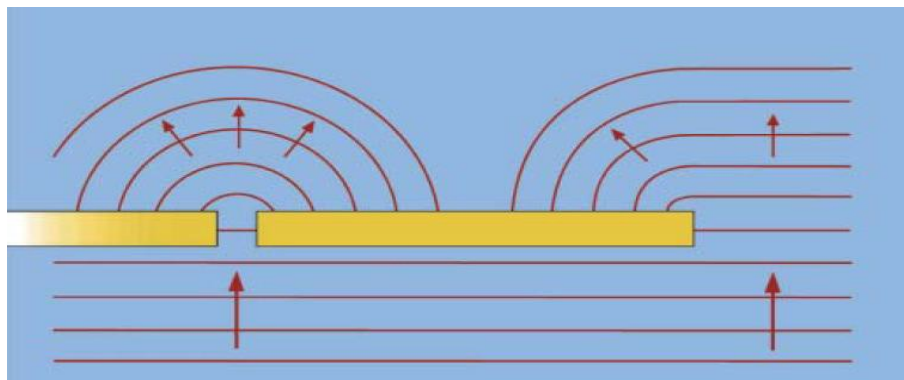


- Η διάθλαση του κύματος: όπου προκαλεί αλλαγή στην κατεύθυνση των κυμάτων εξαιτίας αλλαγής στην ταχύτητα τους.



Εικόνα 21: Εικόνα διαθλώμενου κύματος. [3]

- Η περίθλαση του κύματος: όπου προκαλεί την εξάπλωση των κυμάτων όταν αυτά συναντούν στενωπούς με μήκος ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος τους.



Εικόνα 22: Εικόνα περιθλώμενου κύματος.[3]

2.4 Στατιστική Ανάλυση Κυματισμών.

Σε ένα τμήμα χρονοσειράς $\eta(t)$ καταγραμμένων κυματισμών όπως στην Εικ.5, η εφαρμογή των μεθόδων της στατιστικής κατέδειξε τα εξής:

- α. Οι ανά χρονικές αποστάσεις Δt τιμές του η αποτελούν ένα στοχαστικό μέγεθος που ακολουθεί κατανομή Gauss.
- β. Η εφαρμογή της τεχνικής «μηδενικής προς τα άνω διάβασης» (zero up crossing), δηλαδή της αποτίμησης ύψους κύματος σαν διαφοράς διαδοχικών ελάχιστων και μέγιστων τιμών της στιγμιαίας ανύψωσης $\eta(t)$, δίνει μια σειρά υψών κύματος H , που επίσης είναι στοχαστικά μεγέθη. Καθώς η χρονοσειρά της ανύψωσης $\eta(t)$ είναι μια διαδικασία μικρού εύρους διακύμανσης περιόδων, δηλαδή οι χρονικές αποστάσεις μεταξύ σημείων μηδενισμού (περίοδοι) δεν διαφέρουν πολύ, η κατανομή που ακολουθούν τα H είναι κατανομή

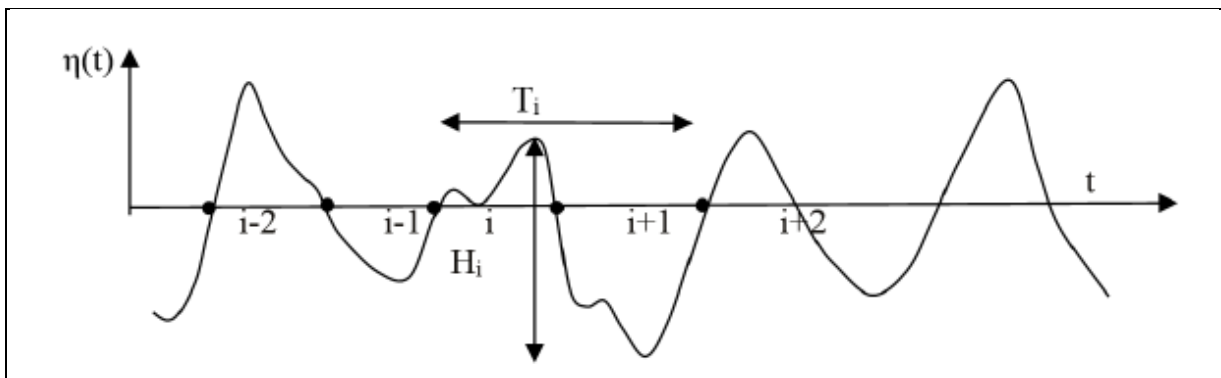


Rayleighτου καθορίζεται από μία μόνο παράμετρο. Η πιθανότητα υπέρβασης μιας τιμής H_i σύμφωνα με την κατανομή Rayleigh είναι:

$$P(H_i) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{H_i}{H_{rms}}\right)^2\right] \quad (2.15)$$

όπου η μέση τετραγωνική τιμή εύρους H_{rms} υπολογίζεται από την

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N H_i^2}{N}} \quad (2.16)$$



Εικόνα 23: Υπόδεθμαχρονοσειράς $\eta(t)$ καταγραφής κυματισμών. (Σουκισιάν 2007).

Η μέση τιμή εύρους ή H_{100} δηλαδή η μέση τιμή του ανώτερου 100% των H_i σχετίζεται με το H_{rms}

$$\bar{H} = H_{100} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} H_{rms} \quad (2.17)$$

Ως σημαντικό ύψος κύματος H_s , ή $H_{1/3}$ ορίζεται η μέση τιμή του ανώτερου 33% των υψών κύματος, τιμή που κατέχει σημαντική θέση στην ανάλυση και καταγραφή των κυματισμών, καθώς αποτελεί και την τιμή του ύψους κύματος την οποία εκτιμά ένας πεπειραμένος παρατηρητής. Σχετίζεται με το H_{rms} :

$$H_{1/3} = H_s = \sqrt{2} H_{rms} \quad (2.18)$$

Από την κατανομή Rayleigh βρίσκεται $P(>H_{1/3}) = 0,135$. Από την καταγραμμένη διακριτοποιημένη με βήμα Δt χρονοσειρά της στιγμιαίας ανύψωσης $\eta(t)$, η τυπική απόκλιση μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση



$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N'} \eta^2}{N'}} \quad \sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N'} \eta^2}{N'} \quad (2.19)$$

όπου N' το πλήθος των τιμών της στιγμιαίας ανύψωσης η . N'
 Η δυναμική ενέργεια του κύματος ορίζεται από τη σχέση

$$\bar{E}_p = \frac{1}{T'} \int_0^{T'} \rho g \eta \left(\frac{\eta}{2} \right) dt = \frac{\rho g}{2} \sigma^2 \quad (2.20)$$

όπου η διάρκεια της καταγραφής. T'
 Καθώς η δυναμική ενέργεια είναι το μισό της συνολικής κυματικής ενέργειας ισχύει

$$\bar{E} = \rho g \sigma^2 \quad (2.21)$$

Η ενέργεια αυτή υπολογίζεται συναρτήσει των υψών H , ως εξής:

$$\bar{E} = \frac{\rho g}{8} \sum_{i=1}^N H_i^2 / N = \frac{\rho g}{8} H_{rms}^2 = \frac{\rho g}{16} H_s^2 \quad (2.22)$$

Από τον συνδυασμό των (2.21), (2.22) προκύπτει: $H_s = 4\sigma$. (2.23)

Σε μια καταγραφή κυματικού επεισοδίου που περιέχει N ύψη κύματος το μέγιστο πιθανό ύψος της καταγραφής δίνεται από την εξίσωση

$$H_{max} = H_{rms} \sqrt{\ln N} \quad (2.24)$$

Είναι φανερό ότι η αύξηση του μήκους του δείγματος (αύξηση του N) οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές H_{max} υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι κατά τη διάρκεια της καταγραφής δεν αλλάζουν οι μετεωρολογικές συνθήκες και παραμένει σταθερό το H_{rms} . Στην πραγματικότητα για τον υπολογισμό του H_{max} το N οριοθετείται προς τα κάτω από την τιμή $N > 100$.

2.5 Φασματική Ανάλυση Κυματισμών.

Υπό την παραδοχή της γραμμικότητας, η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας με την παρουσία ανεμογενών κυματισμών, είναι δυνατόν να προσεγγιστεί με επαλληλία ημιτονοειδών κυμάτων διαφόρων περιόδων T_i , (που δεν διαφέρουν πολύ, narrowband process), διαφόρων πλατών a_i , ($a_i = H_i/2$) και διαφόρων φάσεων ϕ_i :



$$\eta = \sum a_i \cos(k_i x - \sigma_i t + \phi_i) \quad (2.25)$$

όπου $\sigma_i = T/2\pi$ η κυκλική συχνότητα (η οποία στους ημιτονοειδείς κυματισμούς ταυτίζεται με τη σ ($\sigma = T/2\pi$)). Η σχέση μεταξύ k_i , σ_i , στα βαθιά νερά είναι η γνωστή σχέση διασποράς $\sigma_i^2 = g k_i$. Η πυκνότητα ενέργειας της κάθε αρμονικής συνιστώσας δίνεται από τη σχέση

$$\bar{E}_i = \frac{\rho g}{2} a_i^2 \quad (2.26)$$

Κατ' επέκταση, μπορεί να οριστεί η συνάρτηση $E(\omega)$ της πυκνότητας ενέργειας των αρμονικών συχνότητας μεταξύ σ και $(\sigma + d\sigma)$:

$$E(\sigma) d\sigma = \frac{\rho g}{2} \sum_{\sigma}^{\sigma+d\sigma} a_i^2 \quad (2.27)$$

Η κατανομή της $E(\sigma)$ για όλες τις τιμές του σ ορίζεται σαν κατανομή της φασματικής πυκνότητας $E(\sigma)$ για την οποία ισχύει:

$$\bar{E} = \int_0^{+\infty} E(\sigma) d\sigma = \frac{\rho g}{2} \sum_{\sigma}^{\sigma+d\sigma} a_i^2 \quad (2.28)$$

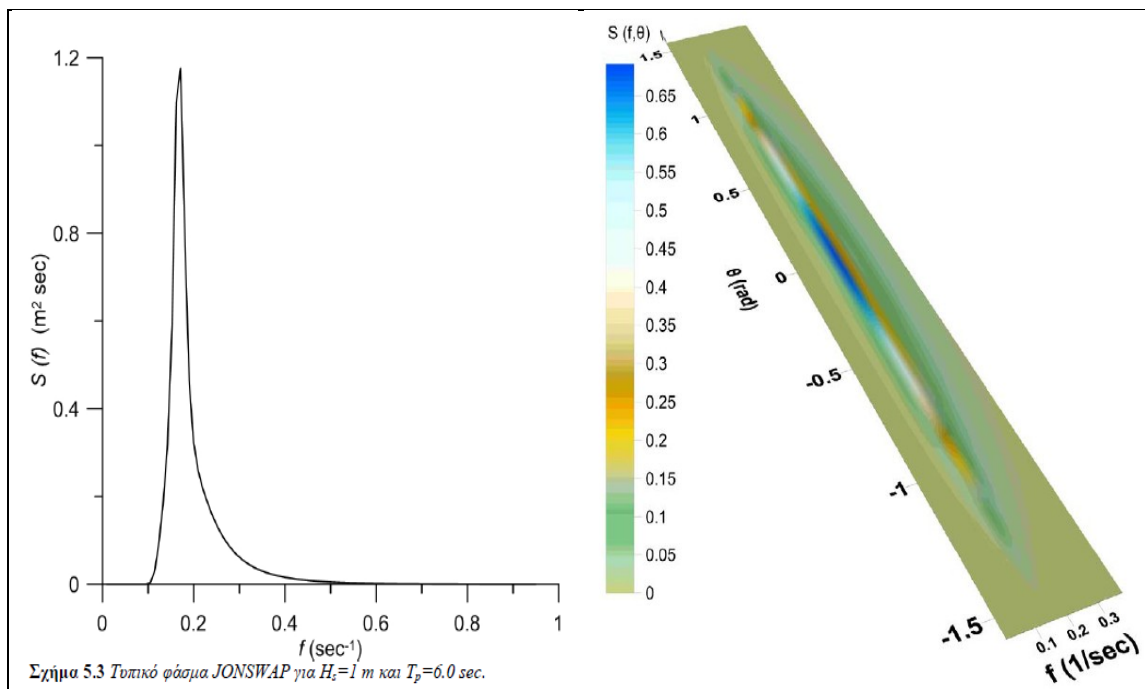
Η πυκνότητα της ενέργειας πολλές φορές εμφανίζεται σαν συνάρτηση της κυκλικής συχνότητας f ($f=1/T$) ή της περιόδου T και στην ανηγμένη της μορφή $S(f) = E(f) / \rho g$ (2.29)

έχει διαστάσεις $m^2 \cdot sec$.

Το ενεργειακό φάσμα, η κατανομή δηλαδή της φασματικής πυκνότητας, μπορεί να υπολογιστεί από μια ψηφιακή (ή ψηφιοποιημένη) καταγραφή $\eta(t)$ με τη μέθοδο ανάλυσης Fourier.

Εκτεταμένες μετρήσεις και αναλύσεις κατά τη διάρκεια της δεκαετίας 1970-80 στη Βόρεια Θάλασσα έδειξαν ότι για ανάπτυξη κυματισμών με περιορισμό μήκους (πιο συνηθισμένη κατάσταση για παράκτιες λεκάνες), το ενεργειακό φάσμα είναι δυνατό να παραμετροποιηθεί σε μία ενιαία μορφή, γνωστή ως φάσμα JONSWAP (Εικ.6):

$$S(f) = \frac{a_{ph} g^2}{2\pi f^5} \exp \left[-1.25 \left(\frac{f}{f_p} \right)^{-4} \right] \gamma_j \exp \left(-\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma_j^2 f_p^2} \right) \quad (2.30)$$



Εικόνα 24: Τυπικό φάσμα JONSWAP για $H_s=1\text{ m}$, $T_p=6.0\text{ s}$ (Σουκισιάν 2007)

Όπου:

γ_J είναι ο παράγοντας εξέλιξης της κορυφής με μέση τιμή 3.3 και

σ_J είναι η παράμετρος εύρους φάσματος με $\sigma_J = 0.07$ για $f < f_p$ και $\sigma_J = 0.09$ για $f > f_p$

a_{ph} είναι ο συντελεστής Phillips

$$a_{ph} = \frac{0.076}{\left(g \frac{F}{U_{10}^2} \right)^{0.22}} \quad (2.31)$$

είναι η κυκλική συχνότητα της μέγιστης φασματικής πυκνότητας που δίνεται

$$f_p = \frac{3.5 g}{U_{10} \left(g \frac{F}{U_{10}^2} \right)^{0.33}} \quad (2.32)$$

Το ενεργειακό φάσμα, ή το διάγραμμα κατανομής της φασματικής πυκνότητας $E(\omega)$, περιγράφει την κατανομή της ενεργειακής πυκνότητας στις διάφορες συχνότητες f , αλλά δεν περιγράφει την κατανομή στις διάφορες κατευθύνσεις γύρω από την κύρια κατεύθυνση των κυματισμών. Αυτό γίνεται με τη συνάρτηση του κατευθυντικού φάσματος $S(f, \theta)$ (directional spectrum). Μετά την παραδοχή ότι η $S(f, \theta)$ είναι το γινόμενο του μονοδιάστατου φάσματος και μιας συνάρτησης $G(f, \theta)$ έχουμε τη μορφή

$$S(f, \theta) = S(f) G(f, \theta) \quad (2.33)$$



όπου $G(f, \theta)$ μία συνάρτηση κατανομής της ενεργειακής πυκνότητας γύρω από την κύρια κατεύθυνση θ . Συνήθως γίνεται περαιτέρω απλοποίηση και λαμβάνεται

$$G(f, \theta) = G(\theta) = \frac{2}{\pi} \cos^2(\theta - \bar{\theta}) \quad (2.34)$$

Όπου η γωνία θ μεταβάλλεται στο εύρος $(-\pi/2, \pi/2)$.

Επίσης είναι προφανές ότι θα ισχύει:

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} G(\theta) d\theta = 1 \quad (2.35)$$

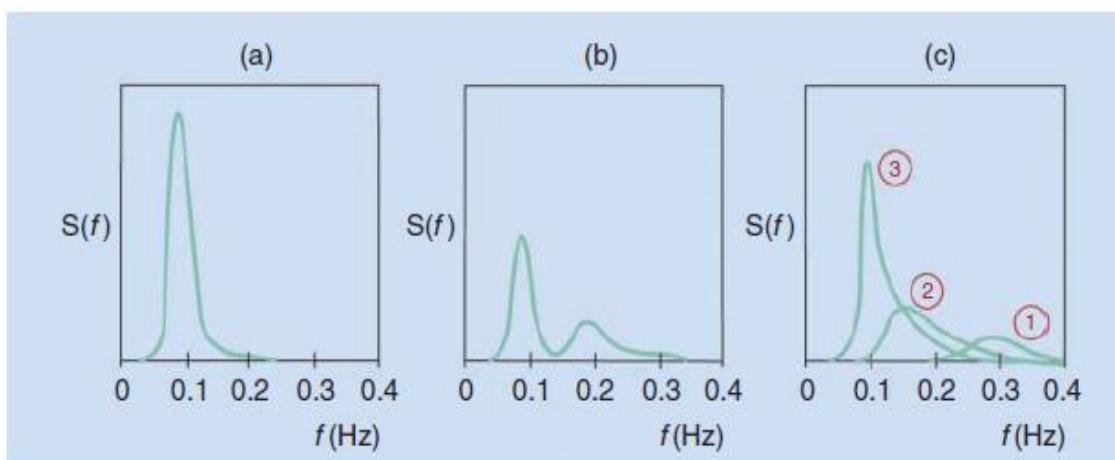
Στην Εικ. 19 δίνεται ένα τυπικό κατευθυντικό φάσμα JONSWAP με $H_s = 1\text{m}$,

$T_p = 6.0\text{s}$ και μέση γωνία κατευθυντικότητας $\theta = 0^\circ$ όπου $G(\theta) = (2/\pi) \cos^2(\theta)$

Εκτελώντας ανάλυση Fourier διαπιστώνουμε ότι μια τυχαία θάλασσα μπορεί να θεωρηθεί ότι προκύπτει από την υπέρθεση ενός μεγάλου αριθμού κυμάτων με διαφορετικά ύψη και συχνότητες, τα οποία διαδίδονται σε διάφορες κατευθύνσεις. Έτσι μια περίπλοκη κυματομορφή μπορεί να θεωρηθεί ως άθροισμα ημιτονοειδών κυμάτων κατάλληλου πλάτους, συχνότητας και φάσης, το οποίο λέγεται φάσμα της κυματομορφής.

Το φάσμα δίνει πληροφορίες για το πόση ενέργεια μεταφέρεται από τις διάφορες συχνότητες σε μια τυχαία θάλασσα. Συχνά το κυματικό φάσμα συμβολίζεται ως $S(f, \theta)$ ώστε να δοθεί έμφαση ότι είναι συνάρτηση τόσο της συχνότητας όσο και της κατεύθυνσης. Όταν όμως θεωρώ μια μόνο κατεύθυνση γράφεται $S(f)$. Το φάσμα του κύματος συμβολίζεται με $S(f)$ και με ολοκλήρωση αυτής της συνάρτησης σε όλες τις συχνότητες του φάσματος προκύπτει το συνολικό ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται

$$\int S(f, \theta) df = \frac{H_s^2}{16} \quad (2.36)$$



Εικόνα 25: Φασματική Κατανομή Κυμάτων. [3]



όπου H_s είναι το σημαντικό ύψος κύματος ορισμένο στο πεδίο της συχνότητας. Το φάσμα μιας τυχαίας θάλασσας είναι ευμετάβλητο αλλά υπό κανονικές συνθήκες είναι αρκετά σταθερό για τον χρόνο που χρειάζεται ώστε να μετρηθεί.

2.6 Βραχυπρόθεσμη Φασματική Πρόβλεψη Κυματισμών.

Η πρόγνωση των κυματισμών (wave forecasting) αποτελεί σημαντικό επιχειρησιακό πρόβλημα της σύγχρονης ναυτιλίας, που προσπαθεί να εξασφαλίσει τις καλύτερες συνθήκες ασφάλειας, εργασίας ή αναψυχής στους ναυτιλλόμενους, αλλά επίσης σημαντικό πρόβλημα της θαλάσσιας τεχνικής, διότι σπάνια διατίθενται μακροχρόνιες καταγραφές κυματισμών στις θέσεις της ακτής ή της ανοιχτής θάλασσας όπου πρόκειται να κατασκευαστούν τεχνικά έργα. Έτσι, η διάγνωση της κυματικής κατάστασης από ανεμολογικά δεδομένα του παρελθόντος, που εύκολα βρίσκονται (wave hindcasting), είναι ο μόνος τρόπος ποσοτικοποίησης των υδροδυναμικών φορτίσεων τις οποίες θα υποστεί το έργο.

Οι βασικές παράμετροι που προσδιορίζουν την ανάπτυξη του κυματισμού U_{10} , F , t_D και διακρίνονται, ανάλογα με τις τιμές τους, τρεις καταστάσεις:

- Ανάπτυξη με περιορισμένο F . Στην περίπτωση αυτή η διάρκεια t_D πνοής είναι πολύ μεγάλη και τα στοιχεία του κύματος εξαρτώνται από τα F , U_{10} .
- Ανάπτυξη με περιορισμένο t_D . Στην περίπτωση αυτή το μήκος ανάπτυξης F είναι πολύ μεγάλο και τα στοιχεία του κύματος εξαρτώνται από τα t_D και U_{10} .
- Πλήρως αναπτυγμένη κατάσταση κυματισμών. Στην περίπτωση αυτή η διάβαση ενέργειας από την ατμόσφαιρα στη θάλασσα δεν περιορίζεται ούτε από το F ούτε από το t_D και εξαρτάται μόνο από το U_{10} .

Για τη συσχέτιση του ύψους κύματος ή της ενεργειακής πυκνότητας των κυματισμών με τα στοιχεία U_{10} , t_D , F αναπτύχθηκαν εμπειρικά και δυναμικά (υπολογιστικά) μοντέλα. Από τα εμπειρικά μοντέλα, τα συχνότερα αναφερόμενα και εφαρμοζόμενα είναι τα μοντέλα SMB (Sverdrup-Munk-Bretschneider) και JONSWAP. Η εφαρμογή του ενεργειακού φάσματος JONSWAP οδηγεί στις εξής σχέσεις υπολογισμού του σημαντικού ύψους H_{s0} στα βαθιά νερά και της περιόδου κορυφής του φάσματος T_p :

$$\frac{g H_{s0}}{u_{w*}^2} = 0.0413 \left(\frac{g X}{u_{w*}^2} \right)^{1/2} \quad \frac{g T_p}{u_{w*}} = 0.651 \left(\frac{g X}{u_{w*}^2} \right)^{1/3} \quad (2.37)$$

Όπου $u_{w*}^2 = C_D U_{10}^2$, X είναι ένα ισοδύναμο μήκος αναπτύγματος που υπολογίζεται ως ακολούθως αν $F (=F_{eff})$ είναι το γραμμικό μήκος αναπτύγματος, τότε ελέγχεται η ισχύς της ανισότητας

$$\frac{g F}{u_{w*}^2} < 0.0053 \left(\frac{g t_D}{u_{w*}} \right)^{3/2} \quad (2.38)$$



Εφόσον ισχύει (περιορισμός μήκους) τότε στη θέση του X εφαρμόζεται το F . Αν δεν ισχύει (περιορισμός διάρκειας), τότε από την (2.27) σαν ισότητα υπολογίζεται ένα νέο F και εφαρμόζεται στις (2.26), στη θέση του X . Πριν την παραπάνω διαδικασία προηγείται ο έλεγχος εάν οι κυματισμοί έχουν πλήρη ανάπτυξη, δηλ. εάν ισχύει η ανισότητα:

$$\frac{gF}{U_{10}^2} > \frac{34.528}{C_D} \quad (2.39)$$

τότε εφαρμόζονται οι σχέσεις:

$$\frac{gH_{so}}{u_*^2} = 211.5 \quad \frac{gT_p}{u_*} = 239.8 \quad (2.40)$$

Οι σύγχρονες δυναμικές μέθοδοι βασίζονται στο μαθηματικό μοντέλο διατήρησης της κατευθυντικής φασματικής πυκνότητας ενέργειας

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial c_x S}{\partial x} + \frac{\partial c_y S}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta S}{\partial \theta} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} \quad (2.41)$$

όπου

- $S(\theta, x, y, t)$ είναι η πυκνότητα της κυματικής ενέργειας κατεύθυνσης θ , σε μια χωρική θέση συντεταγμένων (x,y) κατά τη χρονική στιγμή t ,
- c_x, c_y , και c_θ είναι οι συνιστώσες της ταχύτητας ομάδας κυματισμών κατά (x,y) και θ αντίστοιχα.

Οι όροι του δεξιού μέλους περιγράφουν πηγές και απώλειες ενέργειας:

- $S_{in} = \alpha + \beta S$ ο όρος γραμμικής και εκθετικής αναπτύξεως του κυματισμού,
- S_{nl} = ο όρος που περιγράφει την ανακατανομή ενέργειας μέσα στο φάσμα, λόγω των μη γραμμικών αλληλεπιδράσεων,
- S_{ds} = ο όρος απωλειών ενεργείας, κυρίως λόγω θραύσης των κυματισμών μεγάλης καμπυλότητας.

Η εξίσωση αυτή, λυμένη αριθμητικά σε πεδία φυσικής γεωμετρίας (π.χ. Αιγαίο), δίνει τη συνάρτηση του φάσματος S σε διάφορα σημεία της ανοιχτής θάλασσας. Το σημαντικό ύψος κύματος υπολογίζεται από:

$$H_s = 4 \left(\int_0^{+\infty} S(f) df \right)^{1/2} \quad (2.42)$$

Από την περιοχή γένεσης, μέσα στην οποία η συσχέτιση κυματικών και ανεμολογικών στοιχείων περιγράφηκε πιο πάνω, οι κυματισμοί έχουν τη δυνατότητα να διαδοθούν σε μεγάλες αποστάσεις, εφόσον υπάρχει θαλάσσια έκταση (π.χ. στους ωκεανούς). Οι απώλειες ενέργειας οφείλονται σε εσωτερικές τριβές (κυρίως δράση



του μοριακού ιξώδους, καθώς σε βαθιά νερά η ροή παραμένει ουσιαστικά αστρόβιλη και σε ρηχά νερά διαμορφώνεται μικρού πάχους οριακή στιβάδα πυθμένα).

Οι κυματισμοί αποκτούν ομαλότερη μορφή, διότι οι υψίσυχνες αρμονικές που ενυπάρχουν καθυστερούν και υφίστανται μεγαλύτερες απώλειες ενέργειας. Διαμορφώνεται έτσι το κυματικό πεδίο, λόγω μακρινής θύελλας, γνωστό ως βουβό κύμα (swell). Η προώθηση κυματισμών σε μεγάλες αποστάσεις (εκατοντάδων μιλίων) συνεπάγεται διαφοροποίηση και του ύψους κύματος και της περιόδου (ελάττωση ύψους και αύξηση περιόδου).

2.7 Μακροπρόθεσμη Φασματική Πρόβλεψη Κυματισμών.

Για το σχεδιασμό των τεχνικών έργων συνήθως απαιτείται η εκτίμηση του ακραίου (extreme) χαρακτηριστικού ύψους H_s με μεγάλη περίοδο επαναφοράς (π.χ. 1, 10, 50, 100 έτη). Αυτό επιτυγχάνεται μέσω κατάλληλης παρεμβολής δεδομένων, με βάση τη στατιστική μελέτη των σημαντικών υψών κύματος H_s που καλύπτουν χρονική περίοδο σχετικά βραχυπρόθεσμη ως προς την περίοδο επαναφοράς. Συνήθως αναλύονται καταγραφές διάρκειας > 10 min που χαρακτηρίζουν περιόδους 3, 6, ή 12 ωρών. Έτσι, κατά τη διάρκεια του έτους για ανά δωρο καταγραφές μπορεί να προκύψουν $(365 \times 24)/6 = 1460$ τιμές $H_s \geq 0$.

Οι τιμές αυτές, H_s , που προέρχονται από την ανάλυση μεγάλου αριθμού δειγμάτων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας καταγραφικού οργάνου, είναι επίσης στοχαστικά μεγέθη που αποδείχτηκε ότι ακολουθούν κατανομή Weinbull με γενική μορφή

$$P(> H_s) = \exp\left(-\frac{H_s - c}{a}\right)^b \quad (2.43)$$

Πειραματικά διαπιστώθηκε ότι $c=0$ και $b=1$. Έτσι, η κατανομή αποκτά μονοπαραμετρική μορφή:

$$P(> H_s) = \exp\left(-\frac{H_s}{a}\right) \quad \ln(P(> H_s)) = -\frac{1}{a} H_s \quad (2.44)$$

Σε ημιλογαριθμική κλίμακα οι διαταγμένες κατά φθίνουσα τάξη τιμές του H_s και οι λογάριθμοι των αντίστοιχων πειραματικών συχνοτήτων υπέρβασης δίνουν ευθεία γραμμή κλίσης $1/a$. Κατ' αυτόν τον τρόπο, μπορεί να υπολογιστεί από σειρά καταγραφών δωρης περιοδικότητας η τιμή H_s με μέση περίοδο επανάληψης περισσότερων ετών (π.χ. τιμή H_s με μέση περίοδο υπέρβασης εκατό ετών έχει πιθανότητα υπέρβασης $1/(1460 \times 100)$).



3. Εκμετάλλευση Ενέργειας των Κυμάτων.

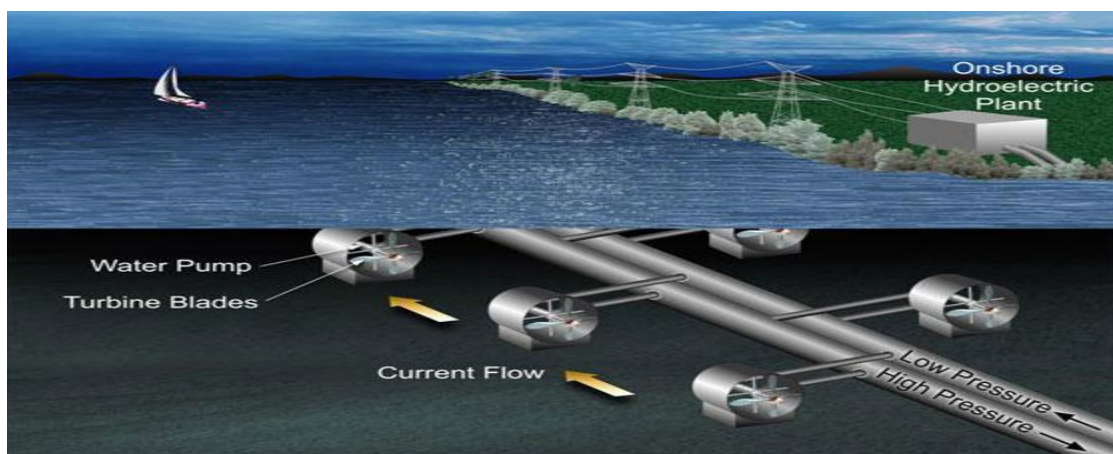
Κυματική Ενέργεια είναι η μορφή ενέργειας που προκύπτει από την κινητική ενέργεια των κυμάτων. Το φαινόμενο της πνοής των ανέμων έχει ως συνέπεια το σχηματισμό κυμάτων τα οποία είναι εκμεταλλεύσιμα σε περιοχές με υψηλό δείκτη ανέμων και σε ακτές ωκεανών.

Η εντατική έρευνα για την κυματική ενέργεια άρχισε τη δεκαετία του 1970 όταν η πετρελαϊκή κρίση κίνησε το ενδιαφέρον προς τις ΑΠΕ. Εκείνη την περίοδο, έγιναν προτάσεις για διάφορες διατάξεις κυματικής ενέργειας, αλλά η επιτυχία, σε γενικές γραμμές, υπολειπόταν των προσδοκιών. Σε πολλές περιπτώσεις, υποτιμήθηκε κατά ένα μεγάλο μέρος η καταστρεπτική δύναμη των ωκεάνιων κυμάτων, ενώ οι πρώιμες συσκευές μετατροπής ενέργειας των κυμάτων δεν είχαν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Ως συνέπεια, όταν παρήλθε η ενεργειακή κρίση, το ενδιαφέρον για την κυματική ενέργεια χάθηκε και στις αρχές της δεκαετίας του 1980 πολλές από τις δοκιμές διεκόπησαν. Οι εκ νέου προσπάθειες οδήγησαν από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 στην εγκατάσταση παράκτιων πρωτότυπων συσκευών. Επίσης η εξέλιξη των τεχνολογιών εξακολούθησε να είναι αργή έως τις αρχές του τρέχοντος αιώνα, με τη νέα ώθηση που δόθηκε στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η έρευνα και ανάπτυξη της κυματικής ενέργειας αναβαθμίστηκε από το 2000 ως αποτέλεσμα της ευρωπαϊκής αναζήτησης για σημαντική αύξηση της παραγωγής των ΑΠΕ. Βέβαια, η επιτυχία του τομέα αιολικής ενέργειας συνέβαλε στην νέα προσπάθεια μετατροπής της ενέργειας που περικλείεται στα ωκεάνια κύματα.

Παρόλα αυτά έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές τεχνολογίες για τις επάκτιες, παράκτιες και υπεράκτιες εφαρμογές. Ειδικότερα οι υπεράκτιες εφαρμογές αποτελούν σημαντικό πόλο ενδιαφέροντος για τις υπό δοκιμή νέες συσκευές, λόγω των υψηλότερων επιπέδων αποδιδόμενης ενέργειας σε μεγάλα βάθη.

Σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά των θέσεων εφαρμογής τους, οι τεχνολογίες κυματικής ενέργειας διακρίνονται συνήθως σε επάκτιες, παράκτιες και υπεράκτιες συσκευές. Οι φυσικές συνθήκες (π.χ. βάθος νερού, επίπεδο ισχύος, φορά του νερού και υδροδυναμικά χαρακτηριστικά) που σχετίζονται με τη μετατροπή της κυματικής ενέργειας διαφέρουν ανάλογα με το βάθος νερού και την απόσταση από την ακτή.



Εικόνα 26: Εκμετάλλευση ενέργειας κυμάτων σε στροβίλους.



Τα κύματα ταξιδεύουν στα βαθιά ύδατα των ωκεανών σχεδόν χωρίς καμιά απώλεια ενέργειας, και αυτός είναι άλλωστε ο λόγος που οι πλωτές τεχνολογίες που αγκυστρώνονται στα βαθιά ύδατα αναμένεται να έχουν το μεγαλύτερο δυναμικό για εφαρμογή σε μεγάλη κλίμακα. Τα τυπικά βάθη υδάτων για τις υπεράκτιες τεχνολογίες είναι γύρω στα 50m. Στα πιο ρηχά ύδατα, η ισχύς των κυμάτων εξασθενεί όλο και περισσότερο λόγω της τριβής στο βυθό, πράγμα που καθιστά τις θέσεις αυτές λιγότερο ενδιαφέρουσες από ενεργειακής απόψεως. Ωστόσο, όσο πιο κοντά προς την ακτή ('παράκτια') βρίσκονται οι διατάξεις αυτές, τα κόστη αγκύστρωσης και σύνδεσης με το δίκτυο μειώνονται και, σε ορισμένες περιπτώσεις, οι συσκευές που θεμελιώνονται στον πυθμένα μπορεί να αποτελούν βιώσιμη λύση. Τελικά, οι επάκτιες συσκευές, οι οποίες τυπικά ενσωματώνονται στην ακτογραμμή ή σε κάποια τεχνητή επάκτια κατασκευή ανάσχεσης, συνεπάγονται χαμηλότερα επίπεδα διαθέσιμης προσπίπτουσας ισχύος αλλά εύκολη πρόσβαση και κατασκευαστικές λύσεις.

Τα κύματα δημιουργούνται από τους ανέμους που πνέουν πάνω από το νερό και απαντώνται μόνο στα επιφανειακά ύδατα της θάλασσας. Το μέγεθος των κυμάτων που δημιουργούνται εξαρτάται λοιπόν από την ταχύτητα του ανέμου, τη διάρκειά του καθώς και την έκταση την οποία καλύπτει ο άνεμος (ανεμπόδιστη διαδρομή). Έπειτα η προκύπτουσα κίνηση του νερού μεταφέρει κινητική ενέργεια η οποία μπορεί να αποσπασθεί με τη βοήθεια των κυματικών διατάξεων. Οι φυσικές παράμετροι που περιγράφουν τα κύματα είναι το ύψος και η περίοδος (ή/και το μήκος). Το μήκος του κύματος σχετίζεται άμεσα με την μετάδοση της ταχύτητας. Για παράδειγμα σε μια τεράστια λεκάνη, όπως είναι ο Ατλαντικός Ωκεανός, συναθροίζονται κύματα από διαφορετικές κατευθύνσεις και σχηματίζουν ομάδες οι οποίες διασχίζουν τον ωκεανό με σχεδόν καθόλου ενεργειακές απώλειες.

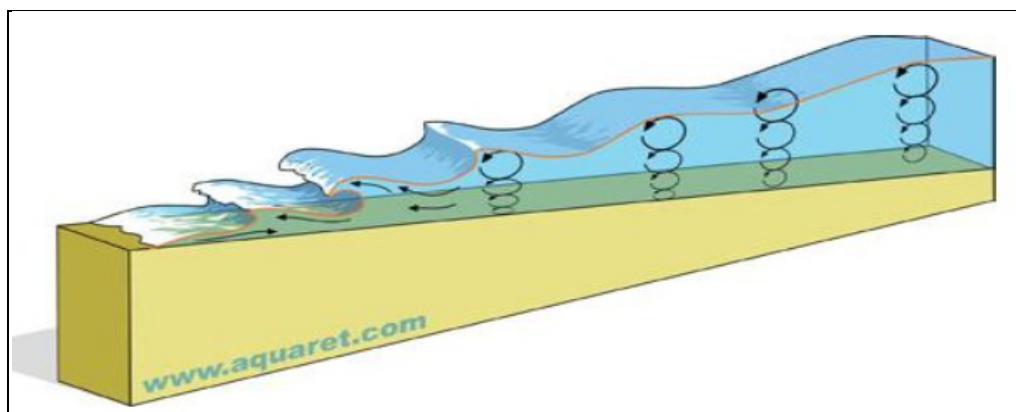
Οι καλύτεροι κυματικοί πόροι εμφανίζονται σε περιοχές όπου υπάρχουν ισχυροί άνεμοι οι οποίοι διασχίζουν μεγάλες αποστάσεις. Στον ευρωπαϊκό χάρτη για παράδειγμα οι καλύτεροι κυματικοί πόροι εντοπίζονται κατά μήκος των δυτικών ακτών της, που βρίσκονται στο τέλος μιας μεγάλης ανεμπόδιστης διαδρομής (δηλ., τον Ατλαντικό Ωκεανό). Κοντά στην ακτή, η ενέργεια των κυμάτων εξασθενεί λόγω τις τριβής στον πυθμένα της θάλασσας. Κατά αυτή την έννοια τα κύματα στα βαθύτερα και εκτεθειμένα ύδατα, στα ανοιχτά της θάλασσας, μεταφέρουν περισσότερη ενέργεια.

Οι κυματικές διατάξεις λειτουργούν αποτελεσματικά σε συντονισμό με το μήκος κύματος. Επομένως μια επαναλαμβανόμενη ακολουθία κυμάτων για μεγάλους χρόνους μπορεί να αποδειχθεί ως θετική εξέλιξη για τη μετατροπή της κυματικής ενέργειας σε ηλεκτρική σε αντιδιαστολή με μη κανονικές συνθήκες της θάλασσας.

Η πυκνότητα ενέργειας του κύματος ορίζεται ως ο διαθέσιμος πόρος ανά μονάδα επιφάνειας, (π.χ. 40 kW/m²) είναι δεκαπλάσια από αυτήν της αιολικής ενέργειας και εκατονταπλάσια της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτά τα δεδομένα ενισχύουν το αναμφισβήτητο ενεργειακό δυναμικό των ωκεάνιων κυμάτων. Έτσι προκύπτει ότι ο πόρος για την παραγωγή κυματικής ενέργειας είναι η πυκνότητα ενέργειας που σχετίζεται με τον προσανατολισμό της ακτής προς την ανοιχτή θάλασσα καθώς και με το γεωγραφικό πλάτος της θέσης. Η εκμετάλλευση της ενέργειας μπορεί να γίνει σε οικονομικά συμφέρουσα βάση όταν τα επίπεδα αυτής είναι μεγαλύτερα από 15~20 kW/m (η συνήθης μονάδα μέτρησης των επιπέδων κυματικής ισχύος είναι η μέση ετήσια ισχύς ανά μέτρο πλάτους της κορυφής του κύματος που είναι παράλληλη στην ακτή).



Εικόνα 27: Σχηματική ερμηνεία δημιουργία και μεταφοράς ενέργειας των θαλασσίων ρευμάτων.



Εικόνα 28: Σχηματική περιγραφή των δομών που μεταφέρουν ενέργεια στη θάλασσα ως προς το βάθος από τον πυθμένα.

Η ενέργεια της πραγματικής κατάστασης της θάλασσας μετράται χρησιμοποιώντας στατικά χαρακτηριστικά των κυμάτων, δηλ. το ύψος και το μήκος του κύματος. Η κοινή παράμετρος που εκφράζει το αντιπροσωπευτικό ύψος κύματος μιας πραγματικής, ακανόνιστης κατάστασης της θάλασσας είναι το αντιπροσωπευτικό ύψος κύματος H_s . Η τιμή αυτή είναι το μέσο ύψος του ανώτερου ενός τρίτου των κυμάτων σε μια συγκεκριμένη περίοδο, συνήθως 30 λεπτά της ώρας και αντιστοιχεί κατά προσέγγιση με τις εκτιμήσεις έμπειρων ναυτικών.

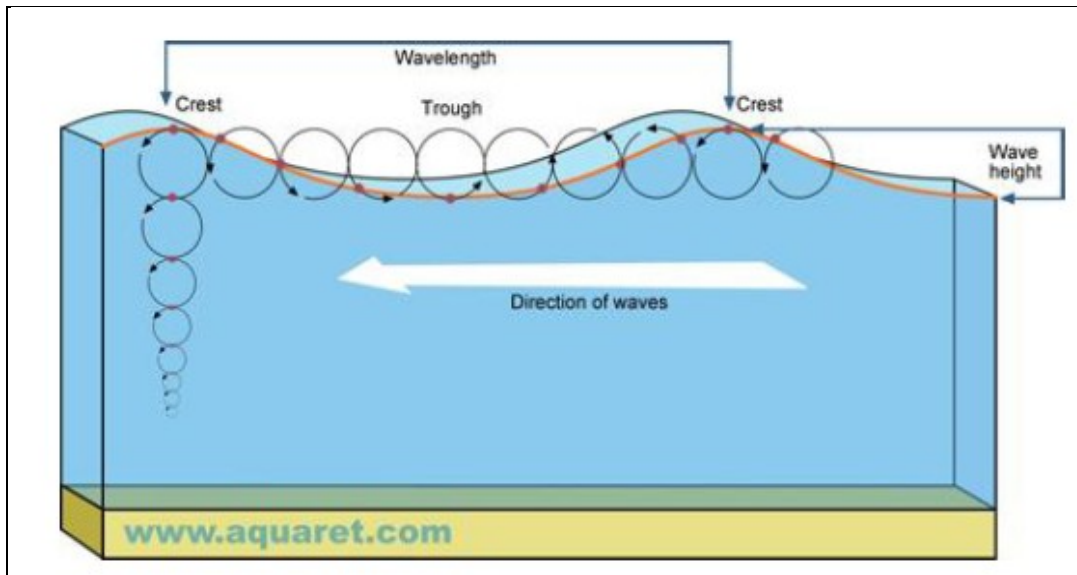
Παράλληλα με την περίοδο αιχμής T_p ή την ενεργειακή περίοδο T_e , η μέση ενέργεια μιας συγκεκριμένης κατάστασης της θάλασσας που χαρακτηρίζεται από τις H_s και T_p ή T_e , υπολογίζεται συνήθως από τη σχέση: $E = 1/8 \rho g H_s^3$.

όπου: E είναι ο μέσος όρος της ενέργειας σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα,

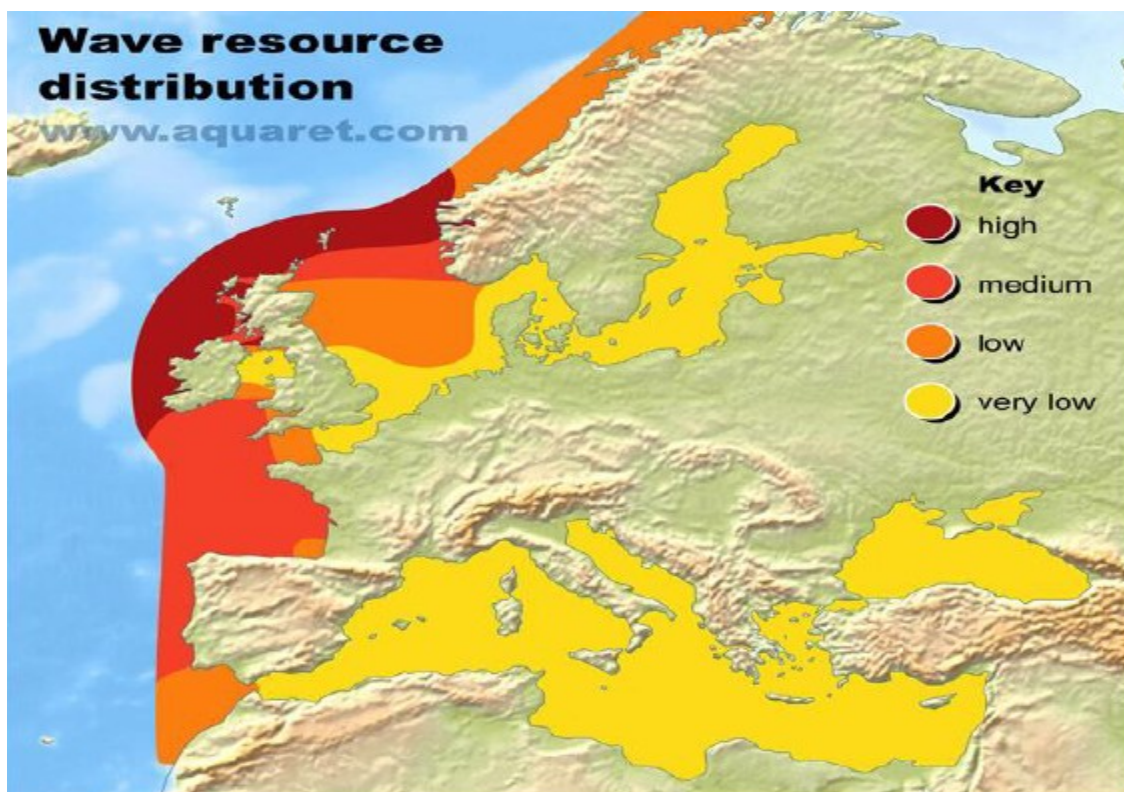
ρ η πυκνότητα του θαλάσσιου νερού,

g η σταθερά της επιτάχυνσης της βαρύτητας και,

H_s το σημαντικό ύψος κύματος.



Εικόνα 29: Εικόνα των ετήσιων πύρων



Εικόνα 30: Κατανομές έντασης κυμάτων στον ευρωπαϊκό χώρο.

Για τον υπολογισμό του επιπέδου της κυματικής ενέργειας μιας ορισμένης περιοχής, λαμβάνεται η ετήσια μέση τιμή όλων των καταστάσεων της θάλασσας (P_{---}). Ο παράγοντας αυτός είναι σημαντικός γιατί οι εποχιακές μεταβολές μπορεί να είναι μεγάλες.



Υπάρχουν δύο γεωγραφικά πλάτη όπου ο πρωταρχικός πόρος κυματικής ενέργειας εμφανίζει μέγιστες τιμές. Ανάλογα με τον προσανατολισμό της ακτογραμμής ως προς την ανοικτή θάλασσα και το γεωγραφικό πλάτος, ορισμένες χώρες βρίσκονται σε καλή θέση για μετατροπή της ωκεάνιας κυματικής ενέργειας, ενώ άλλες δεν έχουν σχεδόν καθόλου δυναμικό κατά το αρχικό στάδιο. Οι χώρες που βρίσκονται σε καλύτερη θέση όσον αφορά τη μετατροπή ωκεάνιας κυματικής ενέργειας είναι η Μεγάλη Βρετανία, η Ιρλανδία και η Νορβηγία, η Νέα Ζηλανδία και η νότια Αυστραλία, καθώς και η Χιλή ακολουθούμενες από την Ισπανία και την Πορτογαλία, τις ακτές της Βορείου και Νοτίου Αμερικής και τη Νότια Αφρική.

Ανάλογα με τον προσανατολισμό της ακτογραμμής, ιδίως στα νησιά, αλλά και των καταστάσεων της θάλασσας (π.χ. καιρικές συνθήκες στο σημείο δημιουργίας των κυμάτων), τα κύματα μπορεί να φτάσουν στην περιοχή προορισμού υπό διαφορετικές συνθήκες. Στις ακτές της δυτικής Ευρώπης, ιδιαίτερα της Πορτογαλίας, Ισπανίας και Γαλλίας, οι θερινοί μήνες (Ιούνιος – Σεπτέμβριος και ιδίως Ιούλιος – Αύγουστος) μπορεί να είναι εξαιρετικά φτωχοί σε κυματικούς πόρους.

Εκτός από τη σημασία της όσον αφορά τη συμβατότητα των γενικών επιπέδων κυματικής ενέργειας μεταξύ διαφορετικών περιοχών, η ετήσια μέση ενέργεια μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικά αποτελέσματα εάν δεν ερμηνευθεί σε συνδυασμό με την εποχιακή της διαφοροποίηση. Οι ετήσιες μέσες τιμές μπορεί να βασίζονται σε υψηλά επίπεδα ενέργειας, τα οποία δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν, αλλά ενδέχεται να έχουν καταστροφικές εντάσεις σε σύντομα χρονικά διαστήματα, καθώς και μεγάλα χρονικά διαστήματα με σχεδόν καθόλου εκμεταλλεύσιμους πόρους. Σημαντική παράμετρος είναι επίσης η περιοδικότητα που θα πρέπει να μην είναι δυσανάλογη με την τοπική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, εάν ζητούμενο αποτελεί η κάλυψη μια περιοχής σε ηλεκτρική ενέργεια που θα προκύπτει από μετατροπή της κυματικής ενέργειας με σημαντική συμβολή. Ένας σημαντικός παράγοντας, αναφορικά με την καταλληλότητα της ακτογραμμής, είναι τα βαθυμετρικά της χαρακτηριστικά (δηλ. η κλίση και η μορφή του πυθμένα της).

Σε αντίθεση με τα υπεράκτια αιολικά, οι τεχνολογίες κυματικής ενέργειας γενικά δεν έχουν κάποια οπτική επίπτωση στην ακτογραμμή, πράγμα που καθιστούν προτιμότερη την εγκατάσταση πάρκων πλησιέστερα στην ακτή. Αυτό θα σήμαινε σημαντική μείωση του κόστους καλωδίωσης και εγκατάστασης, ενώ παράλληλα η εποπτεία και η συντήρηση μπορεί να γίνει με αποτελεσματικότερο τρόπο.

Το καταλληλότερο εύρος βάθους για τις συσκευές κυματικής ενέργειας είναι τα 50m, λαμβάνοντας υπόψη την εξισορρόπηση της διαθέσιμης ενέργειας και των δαπανών ελλιμενισμού καθώς και την απόσταση από τη στεριά. Περιοχές με οξεία βαθυμετρία (π.χ. απότομη υφαλοκρηπίδα, βαθιά νερά κοντά στην ακτή), όπως για παράδειγμα η Πορτογαλία, έχουν πλεονέκτημα όσον αφορά τις εφαρμογές κυματικής ενέργειας. Οι συνθήκες του βυθού δεν αποτελούν τον κρισιμότερο παράγοντα αφού οι περισσότερες τεχνολογίες είναι πλωτού τύπου. Έτσι για τη διέλευση των καλωδίων προς την ακτή, γενικά προτιμούνται οι αμμώδεις πυθμένες.

Σε σχέση με τις συνθήκες στη στεριά, είναι σημαντικό ο επίγειος σταθμός ή/και υποσταθμός που παρέχει τη διεπαφή με το χερσαίο δίκτυο να βρίσκεται όσο πιο κοντά γίνεται στις μονάδες παραγωγής, ενώ, εάν είναι πιο μέσα στην ενδοχώρα, το έδαφος και η τοπογραφία να επιτρέπουν την τοποθέτηση των καλωδίων σε λογικό κόστος. Επίσης η γεωμορφολογία των εδαφών διαφορετικών περιοχών απαιτούν και



διαφορετικές υποδομές – κατασκευές έργα πολιτικού και μηχανολόγου μηχανικού για την ανάπτυξη του συγκεκριμένου τεχνολογικού κλάδου.

Σε ότι αφορά την ανάπτυξη της οικονομίας, η εκμετάλλευση και η μετατροπή της κυματικής ενέργειας θα μπορούσε να οδηγήσει σε άνθιση τις τοπικές κοινωνίες με τη δημιουργία θέσεων εργασίας για υψηλού όσο και χαμηλότερου μορφωτικού επιπέδου εργαζόμενους ενώ η ύπαρξη συμπληρωματικών βιομηχανιών (π.χ. ναυπηγεία, χαλυβουργεία, υπεράκτιες δραστηριότητες, ναυτιλιακά κλπ.) θα μπορούσε να προσδώσει μια στέρεα βάση ανάπτυξης ευρύτερων περιοχών.

Σε έργα μεγάλης κλίμακας, το σημαντικότερο εμπόδιο είναι η δυνατότητα και η διαθεσιμότητα του δικτύου διανομής. Αυτό διότι οι ευνοϊκοί πόροι κυματικής ενέργειας μπορεί να βρίσκονται σε περιοχές με σχετικά αδύνατο δίκτυο, ακόμη και εντός Ευρώπης. Το μέλλον της υλοποίησης της κυματικής ενέργειας σε μεγάλη κλίμακα θα καθοριστεί εν μέρει από το βαθμό στον οποίο οι θαλάσσιοι ανανεώσιμοι ενεργειακοί πόροι αποτελούν προτεραιότητα σε διακρατικό επίπεδο. Όμως δεν επαρκεί η επιτυχία στην ανάπτυξη της τεχνολογίας και, στα πλαίσια μεμονωμένων εθνικών πρωτοβουλιών, η ενσωμάτωση μεγάλης κλίμακας θαλάσσιας ανανεώσιμης ενέργειας στο δίκτυο, αλλά θα χρειαστεί να γίνουν μεγάλες επενδύσεις σε διεθνές επίπεδο στην δικτυακή υποδομή, τόσο επάκτια όσο και υπεράκτια, καθώς και μεταξύ διαφορετικών χωρών (π.χ. το Ευρωπαϊκό Διακρατικό Δίκτυο). Η πρόταση SUPERGRID που έγινε από την Airtricity, μια επιχείρηση κοινής ωφέλειας, εισηγείται τη δημιουργία ισχυρών πλεγμάτων υπεράκτιων διεθνών δικτύων για τη σύνδεση των πολλών πάρκων θαλάσσιας ανανεώσιμης ενέργειας που θα εγκατασταθούν στην περιοχή. Μολονότι η πρόταση αυτή εστιάζεται στα υπεράκτια αιολικά, η μαζική εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας μπορεί με τον ίδιο τρόπο να ωφεληθεί από τέτοιες υποδομές. Προφανώς, λόγω του υψηλού κόστους ανάπτυξης της τεχνολογίας της υπεράκτιας ανανεώσιμης ενέργειας, θα είναι αδύνατη η ενσωμάτωση τέτοιων θεμάτων σχετικών με τα δίκτυα στον προϋπολογισμό του τομέα που αναπτύσσει την τεχνολογία. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο θα απαιτηθούν επιπλέον προσπάθειες στο πεδίο αυτό.

3.1 Μορφές Κυματικής Τεχνολογίας.

Η ανάπτυξη της κυματικής τεχνολογίας ανάγεται στο σχεδιασμό και την κατασκευή διατάξεων κατάλληλων για τη δέσμευση της ενέργειας των κυμάτων με τρόπο αποτελεσματικό και αξιόπιστο ενώ θα πρέπει να ελέγχεται πάντα και η αντοχή των συσκευών ως προς πιθανές αντίξοες συνθήκες λειτουργίας. Η τελευταία απαίτηση αφορά κυρίως διατάξεις που πρόκειται να αφεθούν σε ωκεανούς.

Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται ενεργειακοί μετατροπείς κυμάτων ή μετατροπείς κυματικής ενέργειας που συχνά αναφέρονται ως WEC (*wave energy converters*). Ο σχεδιασμός των διατάξεων εξαρτάται από την απόσταση από την ακτή στην οποία θα κληθούν να λειτουργήσουν, το βάθος της θαλάσσιας περιοχής και το κυματικό δυναμικό. Κρίσιμοι παράγοντες για ένα επιτυχημένο WEC είναι:

- η αποτελεσματική τεχνική απόδοση.
- η οικονομική κατασκευή, τοποθέτηση και λειτουργία του.
- η αξιοπιστία και βιωσιμότητα σε ακραίες συνθήκες λειτουργίας.
- οι αποδεκτές περιβαλλοντικές επιπτώσεις.



Ένας μεγάλο πλήθος WEC είναι πλωτές διατάξεις που βρίσκονται είτε υπεράκτια είτε παράκτια. Υπό την επίδραση των κυμάτων κινούνται με περισσότερους από έναν τρόπους. Είναι σημαντική η μελέτη και κατανόηση της κίνησης των πλωτών διατάξεων για τον σχεδιασμό των WEC. Οι κινήσεις αυτές χωρίζονται σε α) περιστροφικές και β) μη περιστροφικές και είναι οι ακόλουθες:

- κινήσεις χωρίς περιστροφή:
 - Ανύψωση (**heave**): δηλαδή μια κάθετη ταλάντωση
 - Διόγκωση (**surge**): δηλαδή μια οριζόντια κίνηση παράλληλη στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος.
 - Λίκνισμα (**sway**): οριζόντια κίνηση κάθετη στην κατεύθυνση διάδοσης του κύματος
- περιστροφικές κινήσεις:
 - Κλυδωνισμός (**pitch**): περιστροφή γύρω από τον οριζόντιο άξονα που προκαλεί τα άκρα της πλωτής συσκευής να ανεβοκατεβαίνουν.
 - Κύλιση (**roll**): κίνηση γύρω από τον οριζόντιο άξονα που προκαλεί την περιστροφή της μηχανής από τη μία πλευρά στην άλλη.
 - Περιστροφή (**yaw**): κίνηση γύρω από τον κάθετο άξονα.

Το φυσικό μέγεθος μιας πλωτής συσκευής έχει μεγάλο αντίκτυπο στην κίνηση αυτής, ειδικά αν η διάστασή της στην κατεύθυνση της διάδοσης του κύματος είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος του κύματος.

Για παράδειγμα κλυδωνισμός συμβαίνει στην περίπτωση που το μήκος της συσκευής είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους του κύματος, δηλαδή: $L = N\lambda$, όπου $N=1,2,3,\dots$

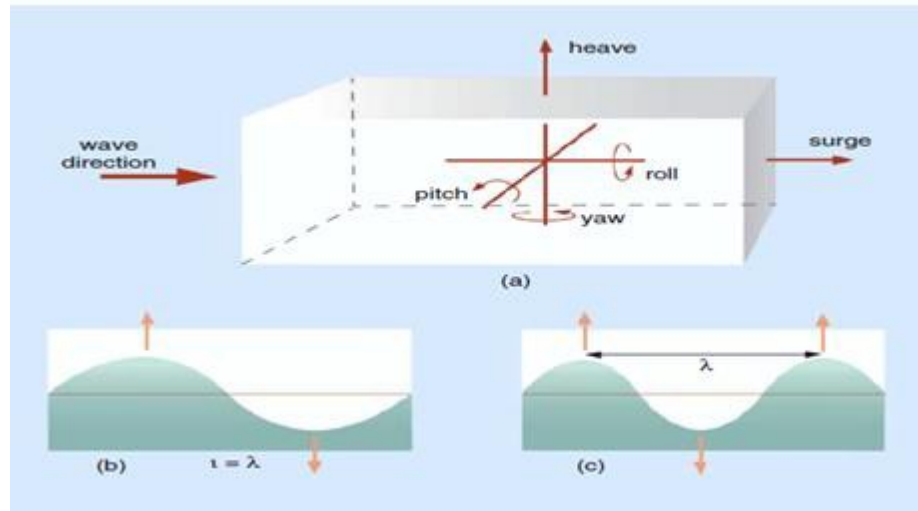
Ανύψωση παρατηρείται όταν το μήκος της διάταξης είτε είναι πολύ μικρότερο από το μήκος του κύματος ή ισούται με περιττό πολλαπλάσιο μισού μήκους κύματος, δηλαδή: $L = N(\lambda/2)$, όπου $N=1,3,5,\dots$. Στην Εικ. δίνονται οι κινήσεις που περιγράφηκαν παραπάνω.

Επίσης θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα WEC αυξάνουν την απόδοση τους όταν **συντονίζονται** στη συχνότητα των διερχόμενων κυμάτων. Κάθε συσκευή έχει την δική της φυσική συχνότητα εξαρτώμενη από τη μάζα και την άνωσή της. Η μείωση της μάζας του WEC ή/ και η αύξηση της άνωσης αυτής έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συχνότητας. Κατά αυτό τον τρόπο όταν η συσκευή συναντά κύματα με συχνότητα κοντά στη φυσική συχνότητά της τότε η κίνηση της συσκευής γίνεται εντονότερη. Το αποτέλεσμα είναι ο συντονισμός που συμβαίνει ανεξάρτητα του μεγέθους του κύματος. Η κατάλληλη ρύθμιση της συσκευής για την επίτευξη του συντονισμού αποτελεί σημαντικό κομμάτι του σχεδιασμού μετατροπένων κυματικής ενέργειας.

Μέχρι σήμερα, η τεχνολογία που έχει ερευνηθεί περισσότερο, και εγκαθίσταται συχνότερα, είναι η ταλαντευόμενη στήλη νερού (OWC). Πρωτότυπα σε πλήρη κλίμακα της ταλαντευόμενης στήλης νερού, με εγκατεστημένη ισχύ της τάξης των αρκετών δεκάδων κιλοβάτ (kW), κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν υπό πραγματικές συνθήκες θαλάσσης στη Νορβηγία (Toftehallen, 1985), την Ιαπωνία (Sanze, Niigata, Kujukuri, Sakata, ~1985-90), την Ινδία (Vizhinjam, ~1990), την



Πορτογαλία (Pico/Azores, 1999) και το HB (Islay, 1986; LIMPET, 2000, Islayisland, Scotland).



Εικόνα 31: Δυνατότητες Κινήσεων Πλωτών Διατάξεων. [3]

Από την έρευνα της βιβλιογραφίας φαίνεται ότι η συσκευή Pelamis είναι η τεχνολογία εκμετάλλευσης της υπεράκτιας κυματικής ενέργειας που βρίσκεται πιο κοντά στην αξιοποίησή της σε πάρκα πλήρους κλίμακας. Η συγκεκριμένη συσκευή αναπτύχθηκε εμπορικά από την εταιρεία Pelamis Wave Power Ltd (που εδρεύει στη Σκωτία και πριν ήταν γνωστή ως Ocean Power Delivery Ltd). Προτεραιότητα του σχεδιασμού της είναι η ικανότητα επιβίωσης και η χρήση ετοιμοπαράδοτης τεχνολογίας. Πρωτότυπό της δοκιμάστηκε το 2004/2005 (Orkney, HB) και από το 2006 βρίσκεται υπό εξέλιξη η εφαρμογή της σε ένα μικρό πάρκο (διάταξη 3 μονάδων) στη βόρεια Πορτογαλία στα πλαίσια μιας εμπορικής συμφωνίας με τον φορέα ανάπτυξης έργων ΑΠΕ Enefersis.

Η AWS είναι ένα ακόμα παράδειγμα τεχνολογίας "νέας" γενιάς της κυματικής ενέργειας που η επινότηση και ανάπτυξη της συσκευής έγινε από την ολλανδική εταιρεία Teamwork Technology στα μέσα της δεκαετίας του 1990 και σήμερα προωθείται από την εταιρεία AWS Ocean Ltd (Σκωτία). Μεταξύ των τεχνολογιών που βρίσκονται σε ένα προηγμένο στάδιο ανάπτυξης είναι οι: WaveDragon, WaveBob, AquaBuoy, OE Buoy, Powerbuoy, FO3 και Wavestar.

Η διάταξη WaveDragon διαφέρει από τις άλλες συσκευές κυματικής ενέργειας ως προς τη φιλοσοφία υδροδυναμικής μετατροπής και τις διαστάσεις. Η συσκευή, η ανάπτυξη και διαχείριση της οποίας γίνεται από την WaveDragon ApS/Δανία – αποτελείται από μια μεγάλη πλωτή λεκάνη στην οποία συσσωρεύεται νερό για στάθμες νερού πάνω από τη μέση στάθμη της θαλάσσης μέσω της υπερακόντισης των κυμάτων προς την συσκευή. Επιπλέον, σ' αυτό το εγχείρημα, προτεραιότητα αποτέλεσε η χρήση εμπορικής τεχνολογίας και η επαγγελματική προσέγγιση για την σταδιακή αναβάθμιση της εμπειρίας από την περιορισμένης κλίμακας λειτουργική εμπειρία (Nissum Bredning/Δανία) στο τρέχον προ-εμπορικό έργο επίδειξης στην Ουαλία, ονομαστικής ισχύος 5-7 MW.

Άλλες σχεδιάσεις που πρόσφατα έφτασαν στο στάδιο της πραγματικής θαλάσσιας δοκιμής είναι αυτές του τύπου του πλωτού σημειακού απορροφητή, π.χ. η



OPT PowerBuoy (OceanPower Technologies, ΗΠΑ/ΗΒ), η WaveBob (WaveBobLtd, Ιρλανδία), η Aquabuoy (FinaveraLtd, Ιρλανδία) και η OE Buoy (OceanEnergyLtd, Ιρλανδία) (η οποία είναι μια πλωτή OWC του τύπου Αγωγού Οπίσθιας Κλίσης). Επιπλέον, έχουν δοκιμαστεί σε μεγαλύτερη κλίμακα πλωτές μικρές σχεδίες σημειακού απορροφητή στηριζόμενες σε πλατφόρμες, όπως π.χ. η FO3 (FredOlsen, Νορβηγία) και η Wavestar (Δανία).

Σε μεγαλύτερο βαθμό από ότι συμβαίνει με τις άλλες τεχνολογίες ΑΠΕ, η κυματική ενέργεια θεωρείται αναξιόπιστη, υψηλού κόστους και μη ρεαλιστική για να συμβάλει σε μεγάλη κλίμακα. Ο σημαντικότερος παράγοντας γι' αυτήν την εικόνα είναι η περιορισμένη έρευνα και ανάπτυξη ειδικότερα για το απαιτητικό υπεράκτιο περιβάλλον. Η ποικιλομορφία των ιδεών και η ανάγκη για εξαιρετικά οικονομικούς μηχανισμούς πρόσληψης της ισχύος (PTO) που κατά καιρούς υπόκεινται σε ακραία φορτία (π.χ. μεγάλα φορτία που συμβαίνουν μόνο σε εξαιρετικά σπάνιες περιστάσεις) και ο μεγάλος αριθμός των κύκλων λειτουργίας (η κυματική συσκευή συνήθως οδηγείται από κυκλικές ευθύγραμμες κινήσεις κάθε λίγα δευτερόλεπτα, βάσει της περιόδου του κύματος) δεν επιτρέπουν την σύγκριση με άλλες τεχνολογίες.

Τα προβλήματα αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας σχετίζονται με τα υλικά και τη συντήρηση των μηχανικών αλλά και ηλεκτρικών τμημάτων των συσκευών – διατάξεων. Η εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας θεωρείται παρόμοια με την υπεράκτια εξόρυξη πετρελαίου και αερίου, με την εφαρμογή των υφιστάμενων λύσεων να οδηγεί σε πολύ υψηλές δαπάνες που συχνά καθίστανται απαγορευτικές. Επίσης τα έσοδα θεωρούνται μικρότερα από τα ορυκτά καύσιμα συμβάλλοντας σε καχυποψία ως προς την κυματική ενέργεια. Η διάσταση αυτή καθυστέρησε σημαντικά την ανάπτυξη και συνέβαλε στην επιφυλακτικότητα με την οποία οι ισχυροί βιομηχανικοί φορείς αντιλαμβάνονται την πιθανή συμμετοχή τους σε έρευνα και ανάπτυξη της κυματικής. Για παράδειγμα υπεράκτιες συσκευές – παλλόμενα, πλωτά ή πλήρως βυθισμένα σώματα, μπορούν να εκμεταλλευτούν τους ισχυρότερους κυματισμούς των θαλασσών στα μεγάλα βάθη και αρκετές βρίσκονται στο στάδιο δοκιμής στη θάλασσα ή έχουν ολοκληρώσει τις σχετικές δοκιμές.

Αναμένεται ότι τουλάχιστον δύο ή τρεις από τις διαφορετικές τεχνολογίες που έχουν επιτύχει κάποια στοιχεία απόδειξης της ιδέας σε στάδιο πρωτοτύπου και βρίσκονται σε ικανοποιητική εμπορική θέση προς το παρόν, θα μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας στο εγγύς μέλλον. Υπάρχουν αρκετοί παράγοντες όπως η θέση το βάθος της θάλασσας, η ένταση του κύματος που μπορούν να οδηγήσουν σε διαφορετικές βέλτιστες λύσεις, επομένως δεν υπάρχει μοναδική συσκευή – εξοπλισμός για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας στο μέλλον. Αυτό αποδεικνύεται και από την πληθώρα διατάξεων και την κατηγοριοποίηση ως προς τις παραμέτρους ενδιαφέροντος.

Μολονότι το πρώτο πάρκο κυματικής ενέργειας, αποτελούμενο από τρεις συσκευές Pelamis, βρίσκεται ήδη στο στάδιο εγκατάστασης (από το 2006) και υπάρχει προοπτική ανάπτυξής του σε 30 συσκευές στο άμεσο μέλλον, και άλλα συστήματα σηματοδούρας φαίνεται ότι οδεύουν προς εφαρμογή σε εμπορική κλίμακα. Μεταξύ αυτών είναι:

- Η **AquaBuOY**, που προέκυψε από ένα συνδυασμό της σουηδικής σωληνωτής αντλίας και του κλασσικού σημειακού απορροφητή και σήμερα βρίσκεται στο στάδιο της ανάπτυξης από μια θυγατρική της FinaveraRenewablesLtd.



- Η **OPT**Powerbuoy – που προωθείται από την αμερικανική/βρετανική εταιρεία OceanPowerTechnology, και
- Η **Wavebob**, η οποία αναπτύσσεται από την ομώνυμη εταιρεία Wavebobσυμφερόντων Ιρλανδίας.
- Η **WaveDragon** μπορεί να είναι μία ακόμη υποψήφιος για να βρεθεί μεταξύ των πρώτων συντελεστών μεγάλης κλίμακας της μετατροπής της κυματικής ενέργειας.

3.2 Τύποι Μετατροπέων WEC's (Wave Energy Converters).

Οι φορείς ανάπτυξης της κυματικής ενέργειας ακολουθούν όπως θα φανεί και παρακάτω διαφορετικό σχεδιασμό για την απόσπαση της ενέργειας που περικλείεται στα κύματα. Οι κυματικές συσκευές κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τη θέση και το βάθος στο οποίο κατασκευάζονται για να λειτουργήσουν επάκτια, παράκτια ή υπεράκτια ή με τη μέθοδο που εφαρμόζεται για την απόσπαση της κυματικής ενέργειας. Στα επόμενα καταγράφονται καταρχήν οι 5 διαφορετικοί τύποι συσκευών που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα.

Πριν την ανάλυση των τύπων WEC που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα θα πρέπει να επισημανθεί ότι έχει παρατηρηθεί ότι τα WEC αυξάνουν την απόδοση τους όταν συντονίζονται στην συχνότητα των διερχόμενων κυμάτων. Ειδικότερα κάθε συσκευή έχει την δική της φυσική συχνότητα η οποία εξαρτάται από τη μάζα και την άνωσή της. Μειώνοντας την μάζα του WEC ή/και αυξάνοντας την άνωση της η φυσική συχνότητα μεγαλώνει. Όταν η συσκευή συναντά κύματα με συχνότητα παραπλήσια της φυσικής συχνότητάς της, τότε η κίνηση της συσκευής γίνεται πιο έντονα. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται συντονισμός και δεν εξαρτάται από το μέγεθος του κύματος. Η κατάλληλη ρύθμιση της συσκευής για να επιτευχθεί ο συντονισμός αποτελεί είναι μια από τις βασικές αρχές σχεδιασμού μετατροπέων κυματικής ενέργειας.

Οι μετατροπείς κυματικής ενέργειας (WECs) μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας τους καταρχήν, την περιοχή λειτουργίας τους και το στάδιο ανάπτυξης το οποίο έχει επιτευχθεί. Με βάση την απόσταση από την ακτή οι διατάξεις χαρακτηρίζονται ως

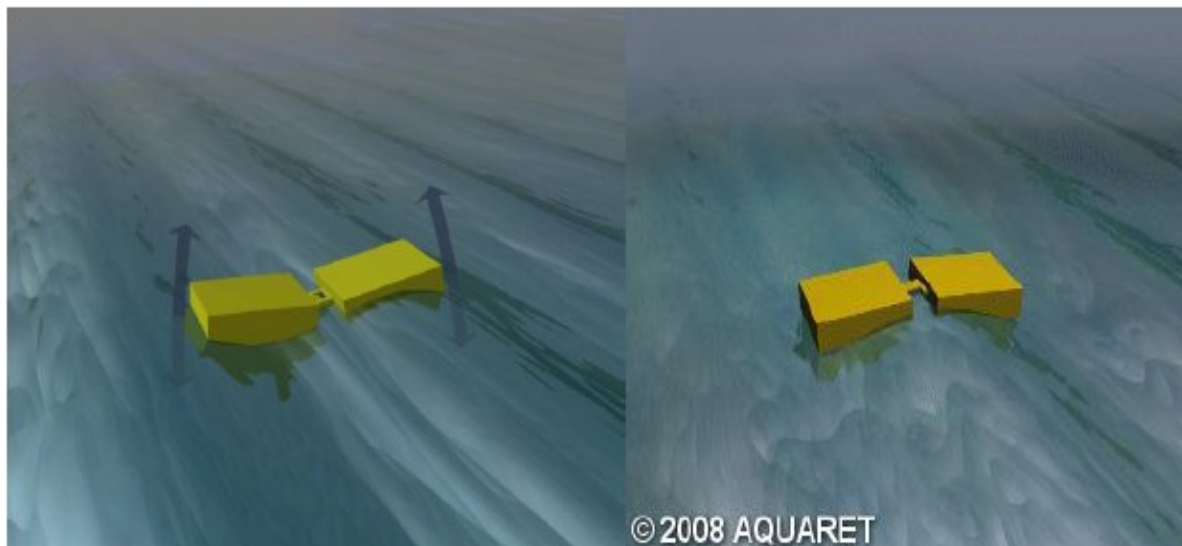
- Υπεράκτιες (offshore): Οι μετατροπείς αυτού του είδους τοποθετούνται σε τοποθεσίες με βάθος μεγαλύτερο από 40m όπου το ενεργειακό δυναμικό είναι μεγάλο.
- Παράκτιες (near-shore ή coastal): Η εγκατάστασή τους γίνεται σε μεσαίο βάθος (20-30m) και σε απόσταση έως 500m από την ακτή.
- Επάκτιες ή Ακτογραμμής (shoreline): Πρόκειται για σταθερές διατάξεις στην ακτή και έτσι δεν απαιτείται σύστημα αγκυροβόλησης ή υποθαλάσσια καλώδια για την ηλεκτρική διασύνδεση με την ακτή. Σε αυτές τις διατάξεις τόσο η εγκατάσταση όσο και η συντήρηση είναι σχετικά εύκολη. Μειονεκτήματα τους είναι το περιορισμένο κυματικό δυναμικό και περιορισμοί που εισάγονται από τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά της ακτογραμμής.



Με βάση την αρχή λειτουργίας, οι διατάξεις εκμετάλλευσης - μετατροπής της κυματικής ενέργειας η ταξινόμηση γίνεται με βάση την πρόταση του Ευρωπαϊκού Κέντρου Θαλάσσιας Ενέργειας (EMEC). Οι τύποι των WEC είναι οι ακόλουθα περιγραφόμενοι με βάση την αρχή λειτουργίας τους.

3.2.1 Εξασθενητής κυμάτων (Attenuator).

Είναι μια μακρόστενη πλωτή συσκευή που τείνει να στρέφεται έτσι ώστε να ευθυγραμμίζεται παράλληλα προς το μέτωπο του κύματος με τη μεγαλύτερή της διάσταση. (Εικ.31). Πιο απλά η μεγαλύτερη διάσταση τείνει να είναι παράλληλη στην κατεύθυνση των κυμάτων. Η διάταξη μπορεί να είναι είτε πλωτή, που είναι και το συνηθέστερο, είτε πλήρως βυθισμένη. Είναι αρθρωτή διάταξη και μπορεί να αποτελείται από ένα πλήθος τμημάτων τα οποία κάμπτονται και στρέφονται σύμφωνα με την κίνηση των κυμάτων. Οι εξασθενητές χρησιμοποιούν την ενέργεια των επερχόμενων κυμάτων για να προκαλέσουν ταλάντωση των γειτονικών τμημάτων της διάταξης. Σε αυτή την ταλάντωση αντιστέκονται τα υδραυλικά έμβολα που είναι εγκατεστημένα στην συσκευή και ωθούν υψηλής πίεσης υδραυλικά υγρά σε κινητήρα ώστε να παραχθεί ηλεκτρισμός. Εξάγουν ενέργεια από τα διερχόμενα κύματα προκαλώντας την προοδευτική εξασθένηση τους, η οποία γίνεται αντιληπτή από την μείωση του ύψους τους. Η συσκευή αυτή επιπλέει των διερχόμενων κυμάτων και αποσπά την ενέργεια τους με την επιλεκτική δέσμευση των κινήσεων καθ' όλο της το μήκος. Ένα σημερινό παράδειγμα εξασθενητή κυματισμών είναι η συσκευή Pelamis. Προηγούμενα σχέδια ήταν η Κυματική Αντλία McCabe (θαλάσσιες δοκιμές) και η σχεδία Cockerel (στο στάδιο ανάπτυξης της ιδέας).



Εικόνα 32: Πλωτή συσκευή με τον άξονά της ευθυγραμμισμένο στο μέτωπο του κύματος.

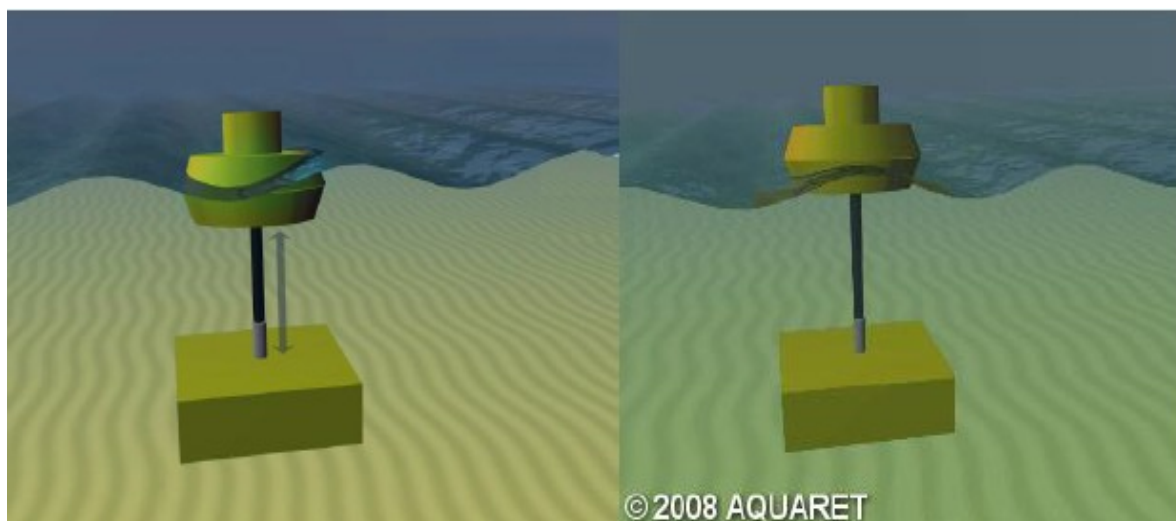


3.2.2 Αξονοσυμμετρικός Σημειακός Απορροφητής – (Point absorber).

Αυτού του τύπου οι διατάξεις σχεδιάζονται ώστε να εκμεταλλεύονται την κίνηση της μάζας τους, που προκαλείται από τα διερχόμενα κύματα. Ηδιάταξη αποτελείται από δύο συμπαγή μέρη, το κινούμενο μέρος που αλληλεπιδρά με τα κύματα και το σταθερό μέρος το οποίο είτε είναι αγκυροβολημένο είτε συγκρατείται στον πυθμένα λόγω της βαρύτητας. Διατάξεις αυτού του τύπου συνήθως τοποθετούνται μερικώς βυθισμένες. Το κινούμενο επάνω μέρος επιζητείται να έχει σχετικά μικρές διαστάσεις σε σχέση με το μήκος των κυμάτων που αλληλεπιδρά ώστε να απορροφά την ενέργειά τους ανεξαρτήτως της κατεύθυνσής τους. Συνήθως ρυθμίζονται ώστε η φυσική τους συχνότητα να είναι παραπλήσια της συχνότητας των κυμάτων της περιοχής που εγκαθίσταται και έτσι να προκύπτει συντονισμός.

Πρόκειται για πλωτή κατασκευή η οποία απορροφά την κυματική ενέργεια από κάθε διεύθυνση μέσω των κινήσεών της στην επιφάνεια των υδάτων ή κοντά σε αυτή (Εικ.32). Έχει μικρές διαστάσεις σε σχέση με το τυπικό μήκος κύματος, με διάμετρο συνήθως της τάξης των λίγων μέτρων. Το χαρακτηριστικό της σημειακής απορρόφησης συνιστά την ικανότητα απορρόφησης της ενέργειας μιας θαλάσσιας περιοχής μεγαλύτερης από τις διαστάσεις της συσκευής. Σε σχέση με το ίδιο φαινόμενο που παρουσιάζεται στα ραδιοκύματα (π.χ. ακουστικά), το φαινόμενο αυτό καλείται «φαινόμενο κεραίας». Οι σχεδιασμοί τύπου σημαδούρας, για παράδειγμα, ενεργούν ως σημειακοί απορροφητές. Τυπικά, όχι όμως κι απαραίτητα, οι πλωτοί αυτοί σχεδιασμοί είναι αξονοσυμμετρικοί. Σημερινά παραδείγματα στην κατηγορία αυτή είναι οι συσκευές Wavebob, OPT PowerBuoy και Aquabuoy. Ωστόσο, παράδειγμα μη αξονοσυμμετρικού σημειακού απορροφητή, με σχεδόν παρόμοια χαρακτηριστικά, είναι και η SeaREV. Οι πλωτές κατασκευές OWC (OEbuoy, Spherboy, MRC) έχουν κι αυτές χαρακτηριστικά σημειακής απορρόφησης, αλλά εξετάζονται συνήθως στην κατηγορία των OWC.

Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διάταξης είναι η απορρόφηση κυματικής ενέργειας από κάθε διεύθυνση πρόσπτωσης του κύματος μέσω της ελεύθερης κίνησης επί της επιφάνειας του νερού.



Εικόνα 33: Πλωτή κατασκευή απορρόφησης κυματικής ενέργειας.



3.2.3 Παλλόμενοι μετατροπείς των κυματικών κλυδωνισμών (Oscillating Wave Surge Converter).

Η λειτουργία αυτής της διάταξης βασίζεται στην κίνηση της μάζας του νερού. Λόγω της προσβολής από κύματα, εκμεταλλεύεται το φαινόμενο της ρήχωσης κατά το οποίο οι τροχιές κίνησης των μορίων του νερού γίνονται ελλειπτικές. Για αυτό το λόγο εγκαθίστανται σε παράκτιες περιοχές όπου το βάθος της θάλασσας είναι μικρό. Στοιχίζονται κάθετα στα επερχόμενα κύματα. Κατά κανόνα έχουν έναν βραχίονα ή ένα πτερύγιο, που ταλαντώνεται καθώς περνούν τα κύματα. Οι διατάξεις αυτές συνήθως είναι πακτωμένες στον βυθό, ενώ πλωτές συσκευές αυτής της τεχνολογίας βρίσκονται υπό ανάπτυξη.

Πρόκειται για διάταξη – συλλέκτη κυματισμών κοντά στην επιφάνεια του νερού ο οποίος εδράζεται επί περιστρεφόμενου βραχίονα αγκυρωμένου κοντά στον πυθμένα. Ο βραχίονας εκτελεί ταλάντωση ως ανάστροφο εκκρεμές λόγω της κίνησης των σωματιδίων νερού των κυμάτων (Εικ.33). Παραδείγματα της κατηγορίας αυτής είναι η υποβρύχια συσκευή Waveroller και το διατρητικό επιφάνειας Oyster. Ένας προηγούμενος τύπος της συσκευής αυτής, το Ιαπωνικό Εκκρεμές, είχε το αγκυρωμένο κοντά στην επιφάνεια πτερύγιο να κρέμεται προς τα κάτω και να εισέρχεται μέσα στον υδατοστεγή θάλαμο.



Εικόνα 34: Παλλόμενος συλλέκτης κυματικών κλυδωνισμών.

3.2.4 Παλλόμενη υδάτινη στήλη (ΠΥΣ - OWC)

Ο μετατροπέας της παλλόμενης στήλης νερού (Oscillating Water Column - OWC) είναι μια μερικώς υποβρύχια κοίλη κατασκευή η οποία έχει ένα άνοιγμα στη θάλασσα κάτω από την επιφάνεια των υδάτων ώστε να εγκλωβίζει αέρα πάνω από την υδάτινη στήλη. Τα κύματα προκαλούν την κατακόρυφη κίνηση της στήλης, που ενεργεί πλέον ως έμβολο συμπιέζοντας και αποσυμπιέζοντας τον αέρα (Εικ.35). Ο αέρας μπορεί να διέρχεται μέσα από αεριοστρόβιλο μετατρέποντας την κυματική σε κινητική ενέργεια που με τη σειρά της οδηγεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

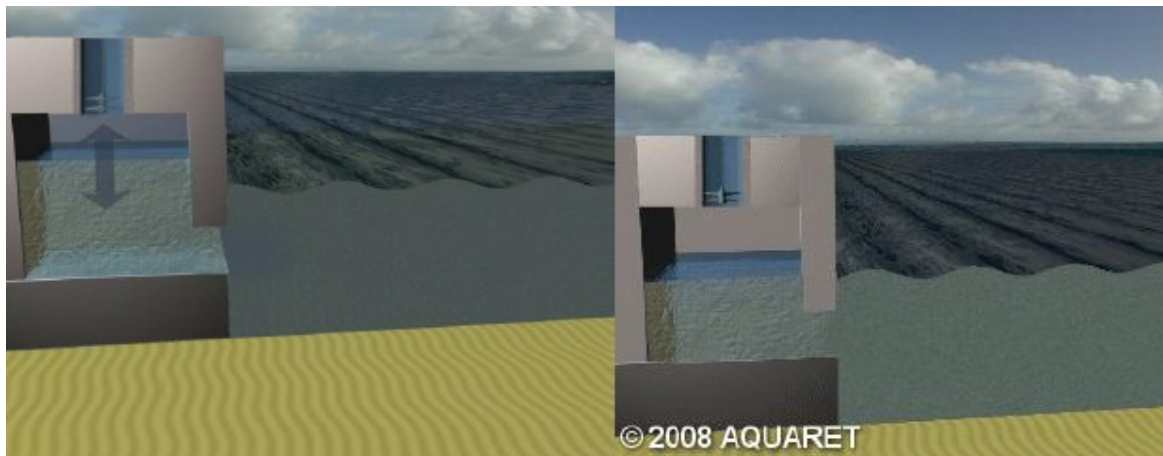
Οι διατάξεις αυτού του τύπου αποτελούνται από τρία κυρίως μέρη: Ένα θάλαμο μερικώς βυθισμένο στο νερό στον οποίο υπάρχει νερό και παγιδευμένος αέρας, ένα



άνοιγμα στο μέρος του θαλάμου κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας καιέναν αεροστρόβιλο.

Τα κύματα που προσεγγίζουν τη συσκευή προκαλούν την κατακόρυφη ταλάντωση της στάθμης του νερού που βρίσκεται εντός του θαλάμου. Καθώς η στάθμη του νερού ανεβαίνει, αυξάνεται η πίεση μέσα στο θάλαμο και ο αέρας εξέρχεται από το θάλαμο οδηγώντας τον στρόβιλο της γεννήτριας. Αντιστρόφως, καθώς η στάθμη του νερού κατεβαίνει η ροή του αέρα αναστρέφεται και ο αέρας εισέρχεται στον θάλαμο. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί από την περιστροφή του στροβίλου λόγω της συμπίεσης -αποσυμπίεσης του αέρα εντός του θαλάμου.

Η τεχνολογία των συσκευών ταλαντευόμενης στήλης νερού μπορεί να εφαρμοσθεί σε κατασκευές κατά μήκος της ακτογραμμής, αλλά και σε τεχνητούς κυματοθραύστες ή σε πλωτές κατασκευές αγκυροβολημένες σε υπεράκτιες κατασκευές. Κατά τη σχεδίαση των διατάξεων για την επικρατούσα κατάσταση θαλάσσης, οι OWC ρυθμίζονται κατάλληλα για το επικείμενο μήκος κύματος ώστε να υπάρχει συντονισμός τους. Με τον τρόπο αυτό, οι συσκευές OWC μπορεί να είναι πολύ αποτελεσματικές και παρουσιάζουν χαρακτηριστικά σημειακής απορρόφησης. Ειδική περίπτωση της κατηγορίας αυτής είναι η πλωτή OWC. Μεταξύ των προτεινόμενων σήμερα συσκευών είναι η Sperboy, η MRC και η τύπου αγωγού Οπίσθιας Κλίσης ΟΕ Buoy. Οι κλασσικές OWC είναι επάκτιες συσκευές που κατασκευάζονται επί της ακτής (Pico OWC, Limpet OWC) ή ενσωματώνονται σε κυματοθραύστες (Mutriko OWC).



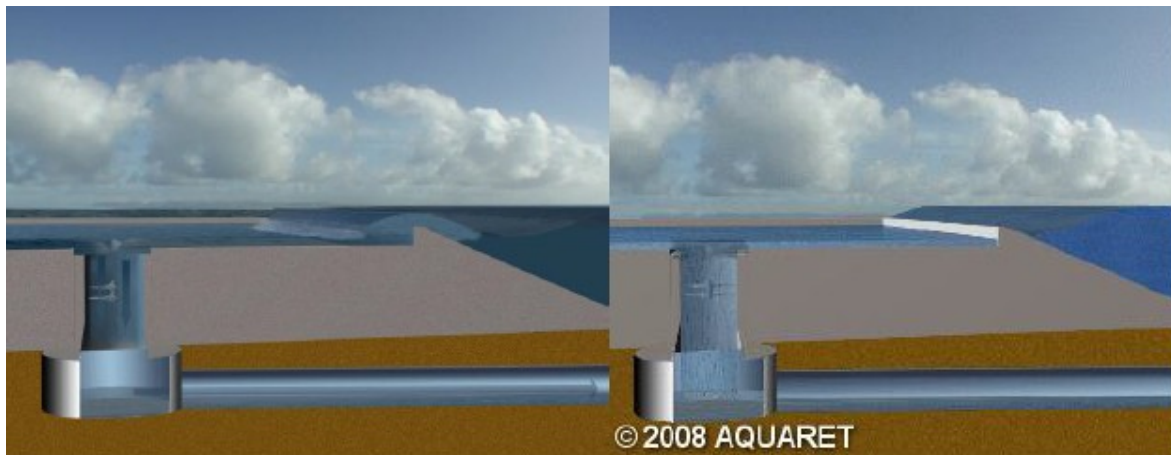
Εικόνα 35: Κίνηση παλλόμενης στήλης (ΠΥΣ).

3.2.5 Συσκευή υπερακόντισης– υπερύψωσης (overtoppingdevices).

Η συσκευή αποτελείται από ένα τοίχωμα πάνω στο οποίο σπάνε τα κύματα και το νερό συλλέγεται σε μία δεξαμενή αποθήκευσης . Τα προσκρούοντα κύματα δημιουργούν ένα ύψος πτώσης το οποίο ελευθερώνεται πίσω στη θάλασσα μέσω συμβατικών στροβίλων χαμηλής πίεσης που είναι εγκατεστημένοι στον πυθμένα της δεξαμενής (Εικ.36). Η συσκευή υπερακόντισης μπορεί να κάνει χρήση συλλεκτών για την συγκέντρωση της κυματικής ενέργειας. Είναι συνήθως μεγάλες κατασκευές λόγω



του απαιτούμενου χώρου για τη δεξαμενή, η οποία χρειάζεται να εξασφαλίζει μια ελάχιστη χωρητικότητα αποθήκευσης. Οι συσκευές μπορεί να είναι πλωτές, όπως η Wave Dragon, που επί του παρόντος είναι ο μεγαλύτερος μετατροπέας κυματικής ενέργειας που αναπτύσσεται, ή σταθερές κατασκευές στη στεριά όπως η SSG (ενσωματώνεται σε κυματοθραύστη). Παράδειγμα πρώιμης συσκευής υπερακόντισης είναι η συσκευή TAPChan στο Toftestallen της Νορβηγίας, όπου ένας αγωγός με σταδιακή μείωση της διαμέτρου του προκαλούσε την υπερχειλίση του νερού σε μία επίγεια δεξαμενή. Παράδειγμα εφαρμογής είναι η συσκευή TAPChan στο Toftestallen της Νορβηγίας, όπου ένας αγωγός με σταδιακή μείωση της διαμέτρου του προκαλεί την υπερχειλίση του νερού σε μία επίγεια δεξαμενή.



Εικόνα 36: Διάταξη Υπερακόντισης (Νορβηγία).

Οι συσκευές υπερύψωσης, γνωστές και ως καταληκτικές συσκευές (*terminators*), μετατρέπουν την κυματική ενέργεια σε δυναμική και την χρησιμοποιούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Με τη βοήθεια ράμπας που είναι ενσωματωμένη στις συσκευές αυτού του τύπου, ανυψώνουν και δεσμεύουν νερό από τα κύματα, το αποθηκεύουν σε δεξαμενή που τοποθετείται πάνω από την στάθμη της θάλασσας και τελικά το επιστρέφουν μέσω υδροστροβίλων στην θάλασσα παράγοντας έτσι ηλεκτρισμό. Οι συσκευές αυτού του τύπου μπορεί να είναι είτε σε υπεράκτια περιοχή είτε στην ακτή.

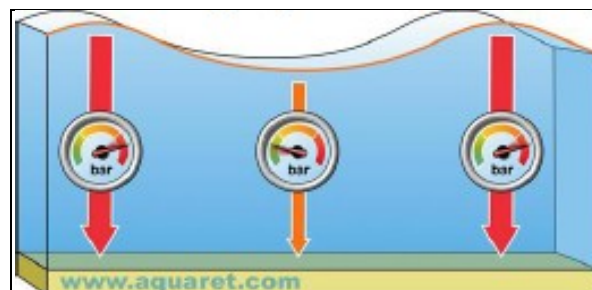
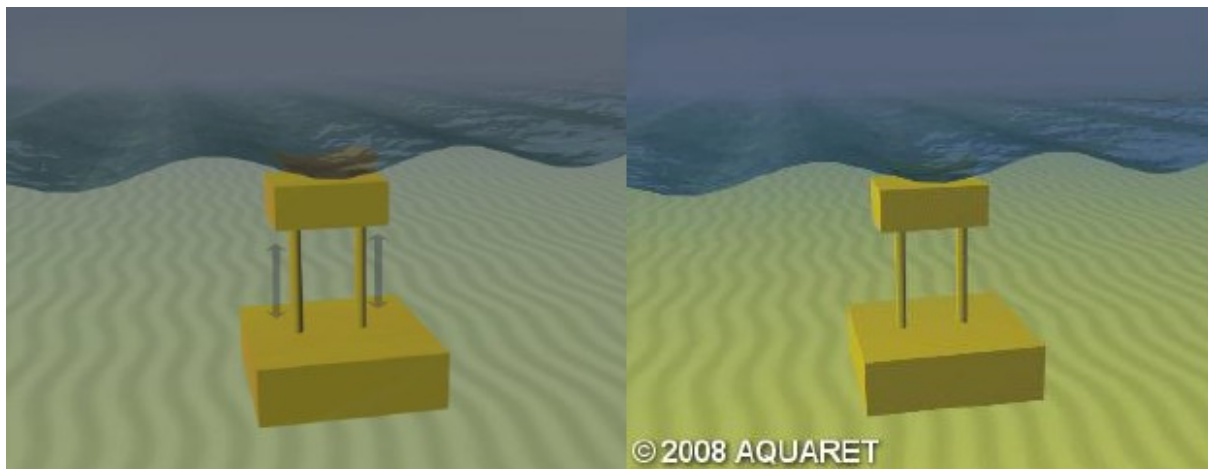
3.2.6 Βυθιζόμενη συσκευή διαφορικής πίεσης.

Πρόκειται για μια βυθιζόμενη συσκευή που συνήθως εγκαθίσταται κοντά στην ακτή και προσαρτάται στον πυθμένα. Η κίνηση των κυμάτων (Εικ.37) προκαλεί την άνοδο και την πτώση της στάθμης της θάλασσας πάνω από τη συσκευή, πράγμα που δημιουργεί μια διαφορά πίεσης η οποία αναγκάζει τη συσκευή να ανεβοκατεβαίνει με τα κύματα. Όταν σχεδιαστεί σωστά για την συγκεκριμένη κατάσταση της θάλασσας, η κατηγορία αυτή διαθέτει και αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά σημειακής απορρόφησης. Ένα παράδειγμα υλοποίησης της σχεδίασης αυτής μέχρι σήμερα είναι η AWS (ArchimedesWaveSwing), που διαθέτει χαρακτηριστικά σημειακής απορρόφησης.

Οι συσκευές διαφορικής πίεσης βασίζονται στην αυξομείωση της υδροδυναμικής πίεσης που προκαλείται από τα διερχόμενα κύματα και



εκμεταλλεούμενες τις διαφορές πίεσης οδηγούν στη μετατροπή σε ηλεκτρισμό. Οι συσκευές της τεχνολογίας αυτής μπορούν να είναι είτε πλωτές είτε πλήρως βυθισμένες. Στις υποβρύχιες συσκευές, που είναι συνήθως προσαρμοσμένες στον πυθμένα, ασκούνται κάθετες δυνάμεις που οφείλονται στο διερχόμενο από πάνω τους κύμα. Μόλις περάσει το κύμα οι δυνάμεις παύουν να ασκούνται. Οι συσκευές αντιλαμβάνονται την διαφορά πίεσης που προκαλείται από τις κοιλάδες και τα όρη των κυμάτων και την μετατρέπουν σε ηλεκτρική. Οι πλωτές συσκευές χρησιμοποιούν την αυξανόμενη πίεση από τα διερχόμενα κύματα για να συμπιέσουν αέρα μέσω μιας γεννήτριας για τη μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 37: Βυθιζόμενη συσκευή διαφορικής πίεσης και σχηματική αναπαράσταση.

3.3 Τεχνολογίες Μετατροπής ενέργεια κυμάτων.

Όπως φάνηκε παραπάνω, υπάρχουν αρκετές κατηγορίες διατάξεων κυματικής ενέργειας βάσει των μηχανισμών απόσπασης της ενέργειας. Στα προηγούμενα τρεις στοιχειώδεις μηχανισμοί αναγνωρίστηκαν, η παλλόμενη υδάτινη στήλη, η διάταξη υπερχειλίσης και σώματα με προκαλούμενη από τα κύματα (σχετική) κίνηση. Πέραν της διάταξης υπερχειλίσης οι άλλες διαθέτουν και χαρακτηριστικά σημειακού απορροφητή δηλαδή την ικανότητα απορρόφησης της ενέργειας από μια μεγάλη περιοχή σε σχέση με τις φυσικές διαστάσεις της διάταξης – επίσης γνωστό και ως φαινόμενο «κεραίας».

Για την καλύτερη κατανόηση των διαφόρων τεχνολογιών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας σήμερα, όλες οι διατάξεις - μετατροπείς της ενέργειας των



θαλάσσιων κυμάτων χωρίζονται επίσης σε τρεις βασικές κατηγορίες με παράμετρο την απόσταση από την ακτή. Αυτές οι κατηγορίες είναι:

3.3.1 Τεχνολογίες Ακτογραμμής:

Οι τεχνολογίες ακτογραμμής είναι σταθερές ή ενσωματωμένες στην ακτογραμμή, κάτι το οποίο τους προσδίδει το πλεονέκτημα της εύκολης εγκατάστασης και συντήρησης. Οι συγκεκριμένες τεχνολογίες δεν απαιτούν αγκυροβολήσεις σε μεγάλο βάθος υδάτων, ούτε υποθαλάσσια ηλεκτρικά καλώδια μεταφοράς. Ωστόσο, υπόκεινται σε ένα κυματικό καθεστώς σημαντικά μικρότερης ισχύος. Αυτό μπορεί να αντισταθμιστεί βέβαια από την μεγάλη συγκέντρωση της κυματικής ενέργειας ('hotspots'). Περιορισμοί βέβαια σε εγκατάσταση αυτής της τεχνολογίας τίθενται από τη γεωμορφολογία της περιοχής δηλ. το γεωγραφικό ανάγλυφο που μπορεί να καθιστά δαπανηρές τις περιφερειακές εργασίες (έργα πολιτικού μηχανικού).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι πιο ανεπτυγμένες τεχνολογικά συσκευές ακτογραμμής είναι τύπου παλλόμενης στήλης ύδατος..

3.3.2 Παράκτιες Τεχνολογίες:

Οι παράκτιες τεχνολογίες εγκαθίστανται σε μέτριο βάθος υδάτων που χαρακτηρίζεται ως μέτριο των περίπου 20 με 30m, σε αποστάσεις μέχρι και περίπου 500m από την ακτή. Οι τεχνολογίες αυτές διατηρούν τα ίδια πλεονεκτήματα με τις τεχνολογίες ακτογραμμής, ενώ επιπλέον μπορούν να εκμεταλλευτούν ενέργεια κυμάτων υψηλότερης ισχύος.

3.3.2 Υπεράκτιες Τεχνολογίες (Ανοιχτής Θαλάσσης):

Οι υπεράκτιες τεχνολογίες εκμεταλλεύονται τα πιο ισχυρά κυματικά κλίματα που συναντώνται σε μεγάλο βάθος υδάτων (μεγαλύτερο από 40m). Ο σχεδιασμός των πιο πρόσφατων υπεράκτιων τεχνολογιών επικεντρώνεται κυρίως σε μικρές αρθρωτές συσκευές, που δίνουν συνολική παραγόμενη έξοδο μεγάλης ισχύος όταν παρατάσσονται σε μεγάλο αριθμό. Επίσης λόγω του μεγάλου αριθμού των τεχνολογιών κυματικής ενέργειας, κάθε μία από τις τρεις βασικές κατηγορίες υποδιαιρείται στις πέντε υποκατηγορίες που προαναφέρθηκαν ανάλογα με τον τύπο της κάθε τεχνολογίας, και εφόσον υπάρχει κάποια τεχνολογία τέτοιου τύπου σε κάθε μία από τις τρεις βασικές κατηγορίες. Αρκετές από τις τεχνολογίες που θα μελετηθούν ανήκουν σε περισσότερες από μία εκ των πέντε υποκατηγοριών, αφού για παράδειγμα μπορεί να εκμεταλλεύονται ταυτόχρονα τη κατακόρυφη ταλάντωση (τύπος 3) και την οριζόντια κίνηση (τύπος 5) των θαλάσσιων κυμάτων. Αυτές θα συμπεριληφθούν σε μία μόνο υποκατηγορία ανάλογα με τον τύπο που τη προσδιορίζει καλύτερα. Όλα τα στοιχεία και οι πληροφορίες των τεχνολογιών που παρουσιάζονται παρακάτω προέρχονται από τις ίδιες τις εταιρίες και τους φορείς που κατέχουν τα δικαιώματα εκμετάλλευσης τους. συνεπώς η εγκυρότητα των τεχνολογικών, οικονομικών και αναπτυξιακών εκτιμήσεων και προοπτικών εξαρτάται από τους ίδιους τους κατασκευαστές.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Κυματική Ενέργεια και Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης – Μετατροπής Θαλασσίων Κυμάτων
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

ΜΟΥΤΣΑΤΣΟΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ
ΠΡΟΣΚΕΦΑΛΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ





4. Ελληνικό Κυματικό Δυναμικό.

Στο προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας αναπτύχθηκαν οι διατάξεις εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας με βάση τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται (εξασθενητής κυμάτων, αξονοσυμμετρικός απορροφητής, παλλόμενοι μετατροπείς κλπ). Πριν την εφαρμογή των παραπάνω διατάξεων θα πρέπει να γίνει η ορθή εκτίμηση της θέσης, που θα τοποθετηθούν ώστε να έχουν την μεγαλύτερη δυνατή απόδοση κατά τη μετατροπή της κυματικής σε ηλεκτρική ενέργεια. Η επιλογή αυτή θα πρέπει να γίνει με βάση το λεγόμενο κυματικό δυναμικό, δηλ. τις τοποθεσίες όπου υπάρχει αρκετά μεγάλο ύψος κύματος ή ακόμα και καταγεγραμμένες θέσεις hot spot στις οποίες λόγω φυσικών φαινομένων των κυμάτων (ενισχυτική συμβολή, ανάκλαση), δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας.

Για την επιλογή της θέσης θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν δεδομένα μεγάλης διάρκειας για τον άνεμο και τα κύματα σε υπεράκτιες και παράκτιες περιοχές, που είναι πολύ σημαντικά για τις κατασκευές υπεράκτιων και παράκτιων δομών που θα πρέπει να υλοποιηθούν καταρχήν. Επίσης τα δεδομένα θα δώσουν πληροφορία για την εκτίμηση της δυνατότητας αξιοποίησης του αιολικού και κυματικού δυναμικού συγκεκριμένων περιοχών. Ο βέλτιστος σχεδιασμός ενός μετατροπέα κυματικής ενέργειας (WEC) βασίζεται στην ποσοτική περιγραφή του κυματικού και αιολικού κλίματος μιας συγκεκριμένης περιοχής. Η ανάλυση του αιολικού και κυματικού κλίματος βασίζεται σε μια στατιστική περιγραφή της συμπεριφοράς των κύριων παραμέτρων του ανέμου και του κύματος, όπως η ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου, το σημαντικό ύψος και η περίοδος του κύματος, καθώς και η χωρική και χρονική μεταβολή τους.

Δεδομένα μακράς περιόδου και εκτεταμένης γεωγραφικής περιοχής συνήθως συνοψίζονται στην μορφή του επονομαζόμενου κυματικού άτλαντα. Οι δύο κύριες πηγές πληροφοριών για τα κύματα είναι τα δεδομένα έμμεσων ή άμεσων μετρήσεων και τα αποτελέσματα αριθμητικών μοντέλων.

- Οι άμεσες (επιτόπιες) μετρήσεις παρέχουν έγκυρα δεδομένα αλλά δεν είναι διαθέσιμες σε πολλά σημεία. Οι έμμεσες (απομακρυσμένες) μετρήσεις προέρχονται από δορυφόρους και καθώς εξελίσσονται είναι ιδιαίτερα ακριβείς και διαθέσιμες για μεγάλο εύρος περιοχών.
- Τα αριθμητικά μοντέλα χρησιμοποιούν ως δεδομένα τα πεδία ανέμων πάνω από τη θάλασσα λεκάνη και υπολογίζουν το φάσμα κύματος σε κάθε κόμβο του πλέγματος με το οποίο έχει διακριτοποιηθεί η περιοχή.

Τα τελευταία 20 χρόνια έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες χαρτογράφησης του κυματικού δυναμικού και ανάπτυξης πακέτων για τον υπολογισμό παράκτιων κυματικών δυναμικών τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Ειδικότερα σε ευρωπαϊκό επίπεδο, ο WERATLAS ή WaveEnergy Resource Atlas (Pontes, 1998) αναπτύχθηκε από μια ομάδα 7 ιδρυμάτων προερχόμενων από 6 χώρες και περιγράφει το κυματικό δυναμικό βαθέν υδάτων του Ατλαντικού και των ακτών της Μεσογείου. Ακόμη, το WorldWaves (Barstow et al., 2003) είναι ένα πακέτο που περιλαμβάνει μια παγκόσμια βάση δεδομένων για υπεράκτια κύματα, στοιχεία βαθυμετρίας, και μοντέλα παράκτιας διάδοσης των κυμάτων (Ντάβαλης 2016).



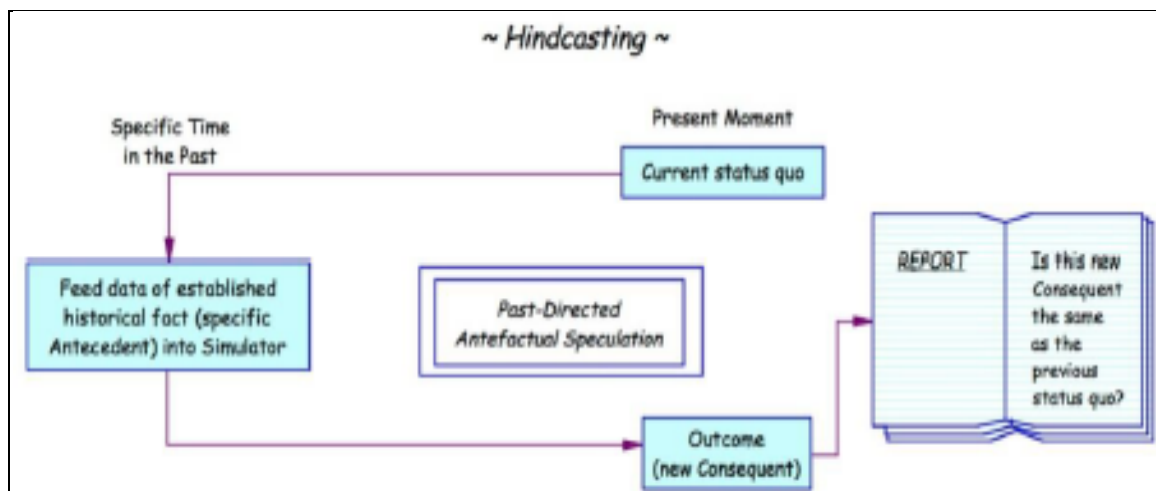
Για τον ελληνικό θαλάσσιο χώρο, τα αιολικά και κυματικά δεδομένα προέρχονται:

- από τις επιτόπιες μετρήσεις από πλωτούς σταθμούς του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ,
- από μεταγενέστερες εκτιμήσεις (δεδομένα hindcast) από το κυματικό μοντέλο WAM.

4.1 Δεδομένα του μοντέλου WAM.

Με τον όρο hindcast νοούνται τα αποτελέσματα μοντέλων πρόβλεψης που χρησιμοποιούνται τόσο στη μετεωρολογία όσο και την ωκεανογραφία. Ουσιαστικά με μια διαδικασία ανατροφοδότησης δεδομένων και εξαγόμενων ελέγχεται το μαθηματικό μοντέλο. Ειδικότερα γνωστά δεδομένα παλαιότερων γεγονότων εισάγονται στο μαθηματικό μοντέλο και εξετάζεται αν επιβεβαιώνεται το ήδη γνωστό αποτέλεσμα.

Το μοντέλο WAM χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του κυματικού δυναμικού στο Αιγαίο πέλαγος. Το πέλαγος βρίσκεται γεωγραφικά στη βορειοανατολική Μεσόγειο καλύπτοντας μια έκταση 240,000 km². Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό του Αιγαίου είναι η δαιδαλώδης τοπογραφική δομή της ακτογραμμής και η ύπαρξη περισσότερων από 2000 νησιών διαφόρων μεγεθών με συνέπεια η μορφολογία του βυθού να παρουσιάζει απότομες και συχνές μεταβολές. Λόγω της πολύπλοκης βαθυμετρίας του Αιγαίου, η χρήση hindcast δεδομένων που προέρχονται από αριθμητικά μοντέλα υψηλής χωρικής και χρονικής ανάλυσης είναι ο μόνος τρόπος να παρουσιασθούν με ακρίβεια τα κύρια χαρακτηριστικά του αιολικού και κυματικού κλίματος των ελληνικών θαλασσών.



Εικόνα 38: Διαδικασία μοντέλου hindcast.

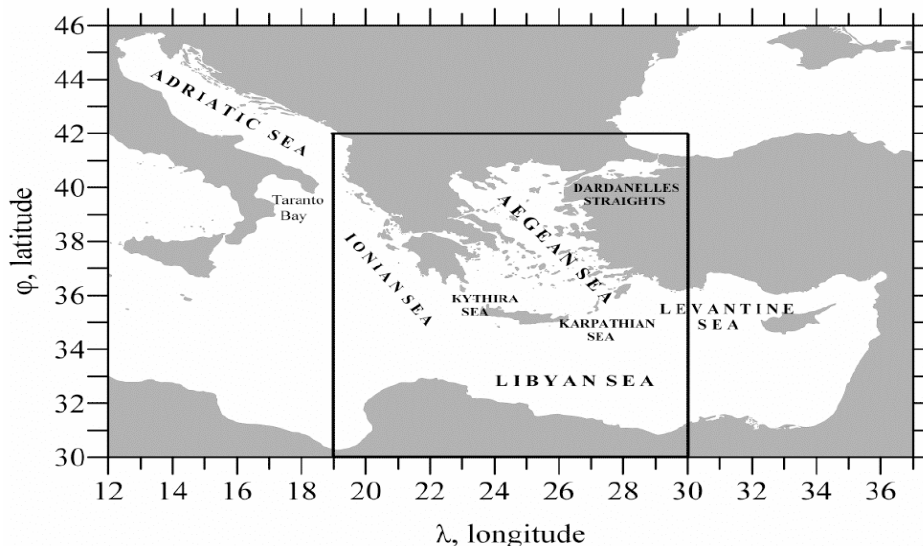
Τα κυματικά δεδομένα hindcast προέρχονται από το 3ης γενιάς κυματικό μοντέλο WAM-Cycle 4, που αναπτύχθηκε στο Max Planck-Institute της Γερμανίας με χωρική ανάλυση 0.1°x0.1° (περίπου 9x11 km²) και χρονική ανάλυση 3 ωρών. Τα αιολικά δεδομένα hindcast προέρχονται από το μη υδροστατικό μοντέλο καιρού SKIRON-ETA. Η χωρική ανάλυση του μοντέλου ορίσθηκε σε 0.1°x0.1° και το χρονικό βήμα των αριθμητικών ολοκληρώσεων στα 36sec.



Το κυματικό μοντέλο *WAM-Cycle 4* υπολογίζει την χωρική και χρονική εξέλιξη του κυματικού φάσματος λαμβάνοντας υπόψη την δημιουργία κύματος λόγω ανέμου, τη διάθλαση του κύματος λόγω αλλαγής βάθους και της παρουσίας ρευμάτων, καθώς και την απώλεια ενέργειας λόγω θραύσης του κύματος ή τριβής με τον πυθμένα. Η βαθυμετρία είναι προσαρμοσμένη στην χωρική ανάλυση του πλέγματος χωρική ανάλυση των 2' (κάθε 1' αντιστοιχεί σε 1852m στον Ισημερινό) και κατακόρυφη ακρίβεια 1m. Σε περιπτώσεις που κρίνεται απαραίτητο γίνονται διορθώσεις με βάση τους ναυτικούς χάρτες της Υδρογραφικής Υπηρεσίας του Πολεμικού Ναυτικού. Η φασματική συχνότητα ανάλυσης του μοντέλου ορίστηκε σε ένα εύρος (0.05 – 0.793 Hz) με διακριτοποίηση 30 συχνοτήτων συνολικά.

Το σημαντικό ύψος κύματος και η μέση κατεύθυνση κύματος λαμβάνονται ως εξαγόμενα ολοκλήρωσης από τα φάσμα του κύματος ενώ η περίοδος κορυφής προέρχεται από την κατανομή του φάσματος. Τα αποτελέσματα του κυματικού μοντέλου διορθώνονται με συνδυασμό δεδομένων από επιτόπιες κατάλληλα επεξεργασμένες μετρήσεις που συλλέγονται από ωκεανογραφικές πλατφόρμες του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ.

Το μοντέλο WAM τείνει σε υποεκτίμηση των υψών κύματος H_s σε όλη τη περιοχή της Μεσογείου, ενώ οι τιμές της κυματικής ισχύος που υπολογίζει μπορεί να είναι χαμηλότερες μέχρι και 50% σε σχέση με τις πραγματικές τιμές. Αυτό αποτελεί σημαντικό έλλειμμα του μοντέλου και είναι απορίας άξιο το ότι μέχρι σήμερα χρησιμοποιείται, έχοντας ένα τόσο μεγάλο περιθώριο σφάλματος.

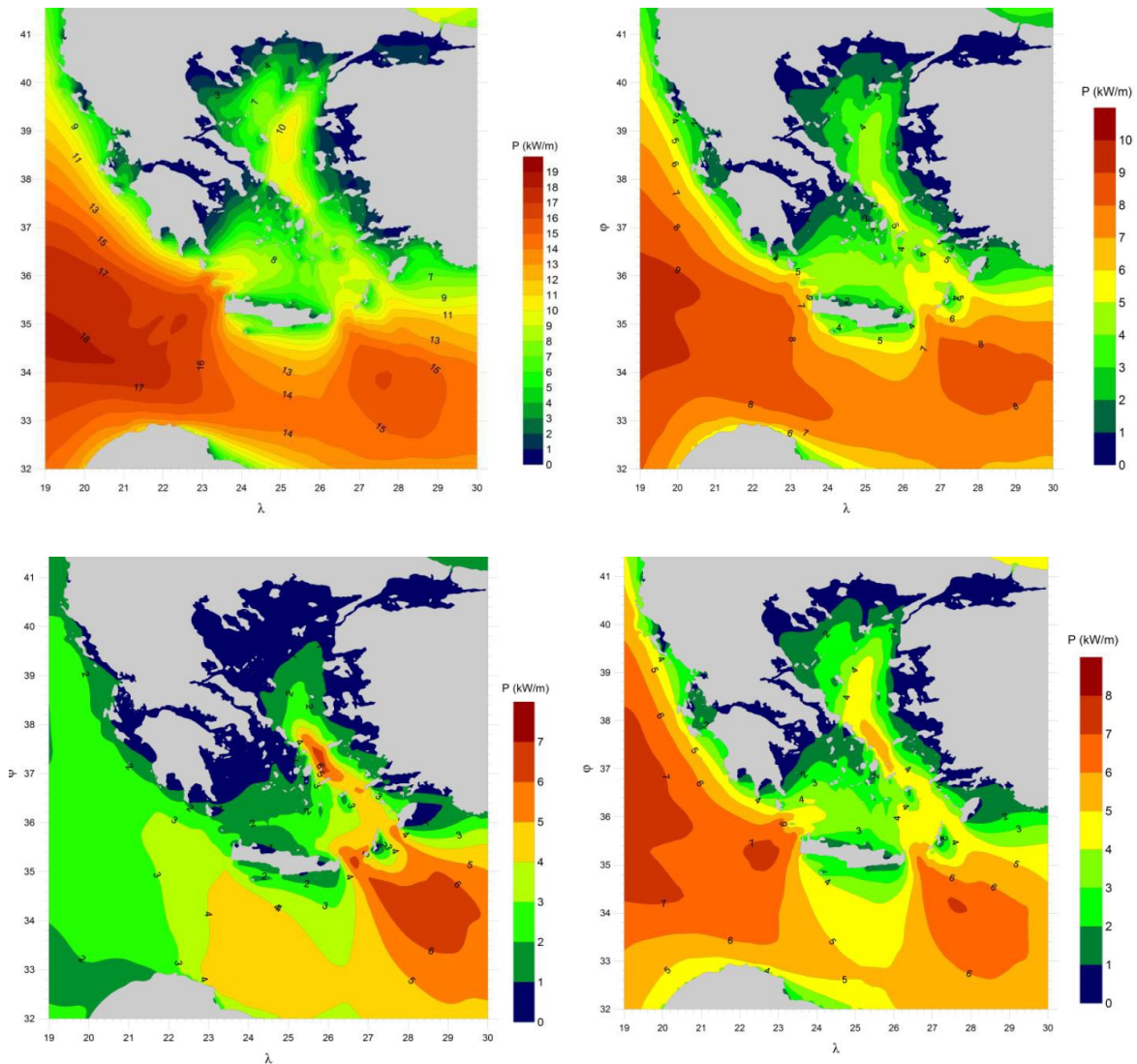


Εικόνα 39: Η περιοχή ανάλυσης – μελέτης του μοντέλου.

Η περιοχή μελέτης που αφορά όλο τον ελλαδικό χώρο έχει διακριτοποιηθεί μέσω ενός πλέγματος διαστάσεων $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ (περίπου $9 \times 11 \text{ km}^2$) όπως αναφέρθηκε και παραπάνω. Σε κάθε κόμβο του πλέγματος έχει υπολογιστεί μια συγκεκριμένη τιμή για κάθε μέγεθος ανά 3 ώρες και για μια συνολική χρονική περίοδο 10 ετών (1995-2004). Από το σύνολο αυτών των δεδομένων σχεδιάζονται οι ισοϋψείς ενεργειακές καμπύλες των ελληνικών θαλασσών. Χρησιμοποιούνται οι μέσοι όροι του σημαντικού ύψους κύματος (H_s) και της περιόδου (T_p) που προκύπτουν διορθωμένες από το μοντέλο καθώς και δεκαετείς μετρήσεις και υπολογίζεται η τιμή



της κυματικής ενέργειας σε kW/m. Η χωρική κατανομή της κυματικής ενέργειας των ελληνικών θαλασσών γίνεται τόσο σε εποχιακή όσο και σε ετήσια βάση. Η διάρκεια του έτους χωρίζεται στις τέσσερις εποχές. Για κάθε εποχή υπολογίζεται ο μέσος όρος του σημαντικού ύψους κύματος (H_s) και της περιόδου (T_p) και προκύπτει η μέση κυματική ενέργεια. Στα διαγράμματα που ακολουθούν δίνεται η χωρική κατανομή της μέσης κυματικής ενέργειας σε kW/m με τις ισοενεργειακές καμπύλες.



Εικόνα 40:Χωρική Κατανομή της μέσης κυματικής ενέργειας στις 4 εποχές ξεκινώντας από Χειμώνα έως φθινόπωρο.

Παρατηρώντας τις ισοενεργειακές στάθμες προκύπτει ότι η μέση κυματική ενέργεια φθάνει τις μέγιστες τιμές της κατά τη διάρκεια του χειμώνα γενικά. Βόρεια των Κυκλάδων η κυματική ισχύς φθάνει τα 10 kW/m ενώ νότια των Κυκλάδων η τιμή της μειώνεται στα 6-8 kW/m. Στο νοτιανατολικό Αιγαίο ανάμεσα στην Κρήτη και την Κάρπαθο η κυματική ισχύς είναι περίπου 10-12kW/m ενώ στο νοτιοδυτικό Αιγαίο η τιμή της κυματικής ισχύος είναι περίπου 8-10kW/m. Μεταξύ των νησιών Κρήτης και



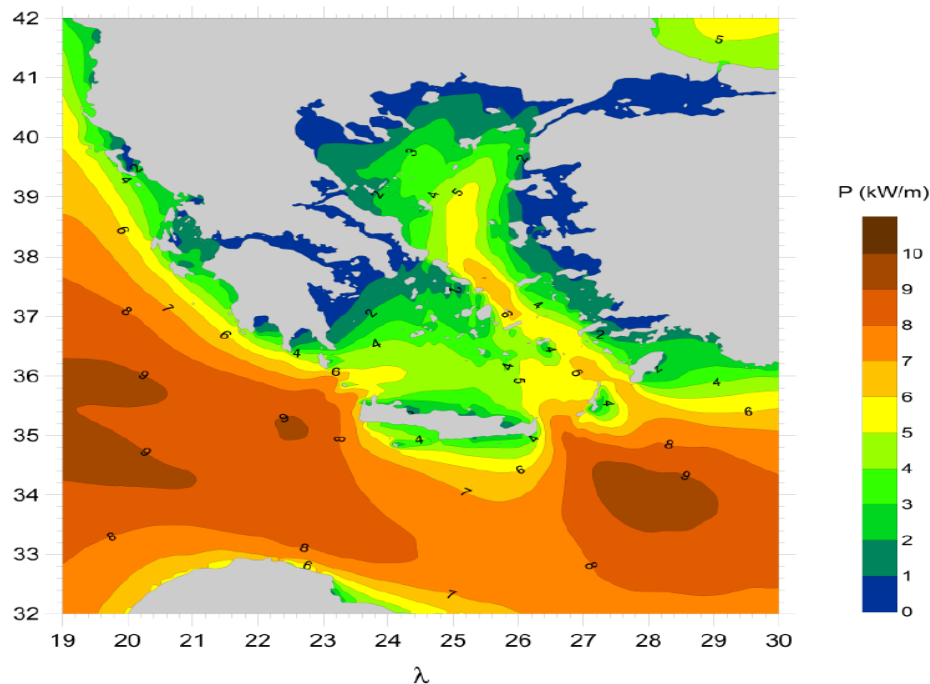
Κυθήρων εμφανίζεται το υψηλότερο κυματικό δυναμικό του Αιγαίου Πελάγους της τάξης των 12-14 kW/m.

Κατά τη διάρκεια της άνοιξης η ενέργεια των κυμάτων είναι πιο ήπια και στο βόρειο- κεντρικό και νότιο Αιγαίο δεν υπερβαίνει 5 kW/m. Η υψηλότερη τιμή της μέσης κυματικής ισχύος είναι 7kW/m και εμφανίζεται πάλι στα στενά μεταξύ Κρήτης-Κυθήρων, Κρήτης-Κάσου και Καρπάθου-Ρόδου.

Το καλοκαίρι εμφανίζονται χαμηλότερες τιμές κυματικής ενέργειας στις ελληνικές θάλασσες από τις αντίστοιχες της άνοιξης. Ωστόσο στο κεντρικό Αιγαίο βόρεια των Κυκλάδων και στο νοτιοανατολικό Αιγαίο εμφανίζεται μια τοπική σημαντική αύξηση της κυματικής ισχύος η οποία φθάνει τα 5-6kW/m. Οι υψηλές τιμές της κυματικής ενέργειας κατά τους θερινούς μήνες οφείλονται στην επίδραση των Ετησίων Ανέμων (τα λεγόμενα μελτέμια) που πνέουν από βόρεια– βορειοδυτικά προς νότια- νοτιοανατολικά στο Αιγαίο Πέλαγος.

Τέλος, το φθινόπωρο η μέση τιμή της κυματικής ενέργειας αυξάνεται σταδιακά σε σχέση με το καλοκαίρι σε όλη την Ελλάδα. Στο βόρειο -κεντρικό Αιγαίο η τιμή της κυματικής ισχύος είναι 4-5kW/m. Στο νοτιοανατολικό Αιγαίο ανάμεσα στα στενά της Κρήτης-Κάσου και Καρπάθου-Ρόδου η ισχύς είναι 5-6kW/m. (Ντάβαλης 2016)

Μέχρι το σημείο αυτό η ανάλυση του κυματικού δυναμικού έγινε σε εποχιακή βάση. Αντίστοιχα μπορεί να γίνει η μελέτη και σε ετήσια βάση ως ακολούθως.



Εικόνα 41:Μέση ετήσια κυματική ενέργεια στις ελληνικές θάλασσες (Ντάβαλης 2016) .

Σε ετήσια βάση (Εικ.41) δίνεται η μέση κυματική ισχύς στη διάρκεια ενός έτους σε kW/m με τη βοήθεια ισοενεργειακών καμπυλών. Προκύπτει ότι:

- στο βόρειο Αιγαίο η ισχύς των κυμάτων είναι περίπου 3-5 kW/m ενώ
- στο βόρειο-κεντρικό Αιγαίο μέχρι το σύμπλεγμα των Κυκλάδων η κυματική ισχύς φθάνει τα 6kW/m.
- στο νοτιοδυτικό Αιγαίο η κυματική ισχύς είναι χαμηλότερη (4-5 kW/m).



- Οι υψηλότερες τιμές της κυματικής ισχύος(6-8 kW/m) παρουσιάζονται στα στενά μεταξύ Κρήτης- Κυθήρων και Κρήτης-Κάσου.
- στο στενό Καρπάθου-Ρόδου η κυματική ισχύς είναι περίπου 6 kW/m.

4.2 Δεδομένα μετρήσεων συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ.

Το Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ) χρηματοδοτούμενο από τον κρατικό προϋπολογισμό υλοποιεί το σύστημα παρακολούθησης και πρόγνωσης θαλασσών με την επωνυμία ΠΟΣΕΙΔΩΝ. Πρόκειται για ένα σύστημα παρακολούθησης, πρόγνωσης και παροχής πληροφοριών που αφορούν τις ελληνικές θάλασσες. Το σύστημα ΠΟΣΕΙΔΩΝ αποτελείται από τα παρακάτω κύρια μέρη:

- i. Δίκτυο πλωτών σταθμών μέτρησης.
- ii. Τηλεπικοινωνιακά συστήματα μεταφοράς δεδομένων

4.2.1 Πλωτοί Σταθμοί Μέτρησης.

Το σύστημα ΠΟΣΕΙΔΩΝ χρησιμοποιεί δύο τύπους πλωτών σταθμών μέτρησης.

- Ο σταθμός *Wavescan* είναι μια πλατφόρμα πολλαπλών χρήσεων και εφαρμογών. Είναι σχεδιασμένος ώστε να διατηρεί μεγάλη σταθερότητα και άνωση, χαρακτηριστικά πολύ θετικά για βαθιές ποντίσεις μακριά από την ακτή αλλά και για περιοχές με ισχυρά ρεύματα.
- Ο σταθμός *Seawatch* είναι μια μετρητική πλατφόρμα με μικρότερη άνωση από τον *Wavescan*. Είναι κατάλληλος για νερά μικρού και ενδιάμεσου βάθους.
- Παράλληλα με τους πλωτούς σταθμούς χρησιμοποιείται και το *Seawatch Deep Sea Module (SDSM)* το οποίο είναι ένα παρατηρητήριο πυθμένα εφοδιασμένο με σύστημα ακουστικής επικοινωνίας. Το σύστημα αυτό επιτρέπει την ενσωμάτωση περισσότερων υπομονάδων μέτρησης στους υπάρχοντες πλωτούς σταθμούς.

Το δίκτυο παρακολούθησης ΠΟΣΕΙΔΩΝ αποτελείται από 10 ωκεανογραφικούς σταθμούς *Wavescan* (+2 εφεδρικοί) και 10 πλωτήρες τύπου *Seawatch* μέτρησης κυματικών παραμέτρων, παρατεταγμένοι στις ελληνικές θάλασσες για μέτρηση μετεωρολογικών, περιβαλλοντικών και ωκεανογραφικών δεδομένων, όπως φαίνονται στον παρακάτω χάρτη.

Οι σταθμοί είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες οι οποίοι μετρούν τα ακόλουθα μεγέθη:

- Ταχύτητα και κατεύθυνση επιφανειακών ρευμάτων
- Ατμοσφαιρική πίεση
- Θερμοκρασία αέρα
- Ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου
- Σημαντικό ύψος, κατεύθυνση και περίοδος κύματος
- Επιφανειακή θερμοκρασία και αλατότητα.



Εικόνα 42: Οι πλωτοί σταθμοί Wavescan, Seawatch και Seawatch Deep Sea Module (SDSM).



Εικόνα 43: Οι σταθμοί μετρήσεων του προγράμματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ (Ντάβαλης 2016)

Το δίκτυο πλωτών σταθμών βρίσκεται σε λειτουργία από το 1999 και κάθε 3-4 μήνες γίνεται συντήρηση από το ωκεανογραφικό σκάφος «Αιγαίο». Τα δεδομένα των πλωτών σταθμών μεταφέρονται μέσω του δορυφορικού συστήματος Inmarsat-C και με χρήση των τηλεπικοινωνιακών συστημάτων GPRS. Συλλέγονται και αποστέλλονται στο ΕΛΚΕΘΕ όπου επεξεργάζονται και αξιοποιούνται για την πρόγνωση της κατάστασης θαλασσών με χρήση αριθμητικών μοντέλων. Οι μετρήσεις από τους πλωτούς σταθμούς είναι χρονοσειρές φασματικών μεγεθών που καλύπτουν μια χρονική περίοδο. Οι μετρήσεις εμφανίζονται με βήμα 3 ωρών και στην



πραγματικότητα κάθε τιμή βασίζεται σε καταγραφές διάρκειας 17min που διενεργούνται με περίοδο δειγματοληψίας συνήθως 1Hz.

4.3 Παράδειγμα μελέτης κυματικού δυναμικού (Σκύρος).

Η μέθοδος εξαγωγής αποτελεσμάτων και ο τρόπος μελέτης περιγράφονται αναλυτικά στην εργασία του Ντάβαλη 2016. Στη συγκεκριμένη εργασία δίνονται διαγράμματα που απεικονίζουν μετρήσεις φασματικών παραμέτρων όπως το σημαντικό ύψος κύματος H_s και την περίοδο κορυφής T_p για χρονική περίοδο που κυμαίνεται από 1-4 χρόνια, από 3 πλωτούς σταθμούς του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ οι οποίοι είναι ποντισμένοι σε βαθιά νερά (Ρόδος, Μύκονος, Σκύρος). Και στις τρεις περιπτώσεις η συλλογή των δεδομένων έγινε από μετρητικούς πλωτούς σταθμούς τύπου Seawatch.

Εδώ υπενθυμίζεται ότι για την εξαγωγή της ισχύος τα πρωτογενή δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι ακριβώς το σημαντικό ύψος κύματος H_s και η περίοδος κορυφής T_p , τα οποία οδηγούν στον υπολογισμό της ισχύος σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

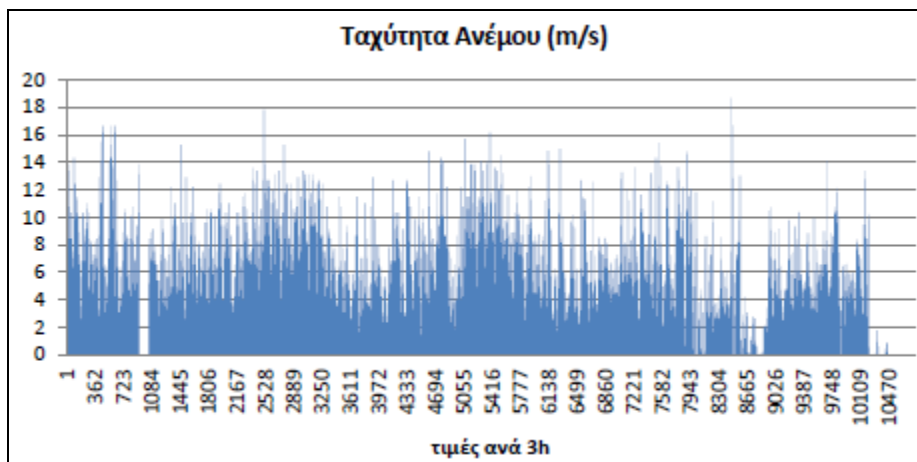
$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_p \quad [kW/m] \quad P = \frac{\sum_1^N P_i}{N} [kW/m] \quad (4.2.1)$$

Από τις καταγεγραμμένες τιμές του σημαντικού ύψους κύματος και της περιόδου κορυφής κύματος θα προκύψει η τιμή της κυματικής ισχύος της περιοχής. Οι σχέσεις που δίνονται παραπάνω αναφέρονται στην περίπτωση τυχαίας θάλασσας. Η ολοκλήρωση δίνει τη μέση κυματική ισχύ για όλες τις διαθέσιμες μετρήσεις, δηλ. όπου N ο συνολικός αριθμός καταγραφών από τον πλωτό σταθμό.

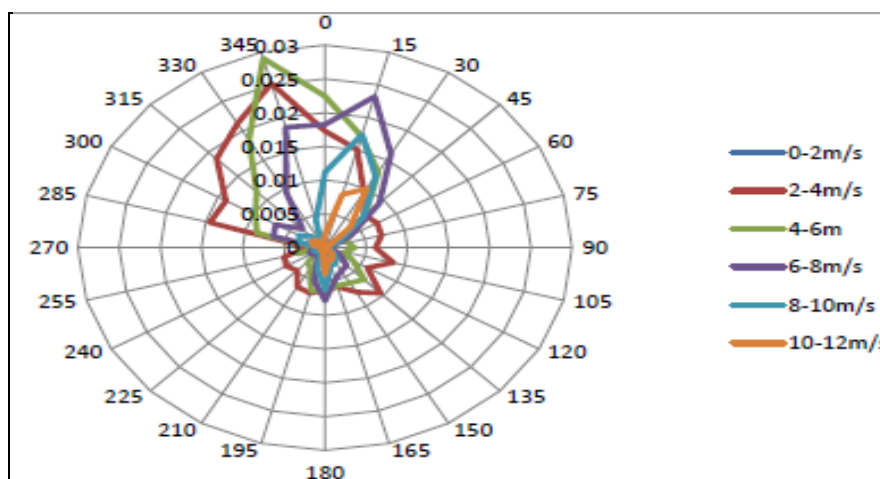
Στη συνέχεια δίνεται ένα παράδειγμα μελέτης για το σταθμό της Σκύρου όπως αναφέρεται στην εργασία του Ντάβαλη 2016. Οι μετρήσεις για την θαλάσσια περιοχή της Σκύρου προέρχονται από έναν πλωτό σταθμό τύπου Seawatch ποντισμένο στο σημείο με συντεταγμένες $[36^\circ 27' N - 28^\circ 8' .59 E]$. Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται καλύπτουν μια χρονική περίοδο 4 χρόνων (από τις 01/12/2007 έως τις 31/11/2011).

Ως πρώτο βήμα καταγράφεται η χρονοσειρά της ταχύτητας του ανέμου σε αυτή την περίοδο μετρήσεων που δίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί. Ιχνηλατώντας το διάγραμμα προκύπτει το εύρος ταχυτήτων (0,015 - 18,677)m/s με μέση ταχύτητα ανέμου 5,081m/s (Εικ.44).

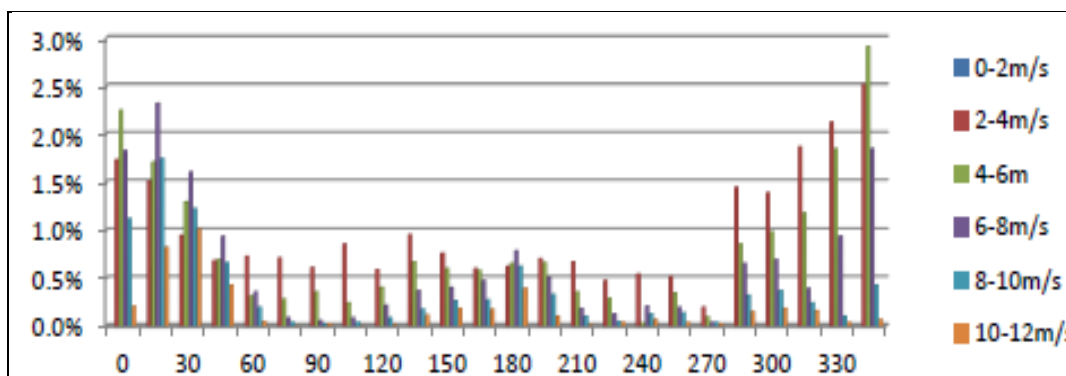
Το δεύτερο βήμα είναι ο προσδιορισμός της κατεύθυνσης του ανέμου που γίνεται με τη βοήθεια ροδογράμματος που φαίνεται παρακάτω (Εικ.45). Πέρα από την κατεύθυνση του ανέμου ενδιαφέρει και η ισχύς αυτού που δίνεται στην εικ.46. Από το ροδόγραμμα ανέμου φαίνεται ότι οι άνεμοι που πνέουν με μεγαλύτερη ένταση είναι βόρειοι-βορειοδυτικοί και βόρειοι-βορειοανατολικοί. Η ένταση των ανέμων μεταφράζεται στη μεγαλύτερη ταχύτητα ανέμου όπως σημειώνεται και στο ροδόγραμμα. Ειδικότερα οι άνεμοι με βόρεια- βορειοανατολική κατεύθυνση εμφανίζουν τη μεγαλύτερη ταχύτητα.



Εικόνα 44: Χρονοσειρά ταχύτητας ανέμου (Ντάβαλης 2016).



Εικόνα 45: Ροδόγραμμα ανέμου θαλασσίου χώρου Σκύρου (Ντάβαλης 2016).



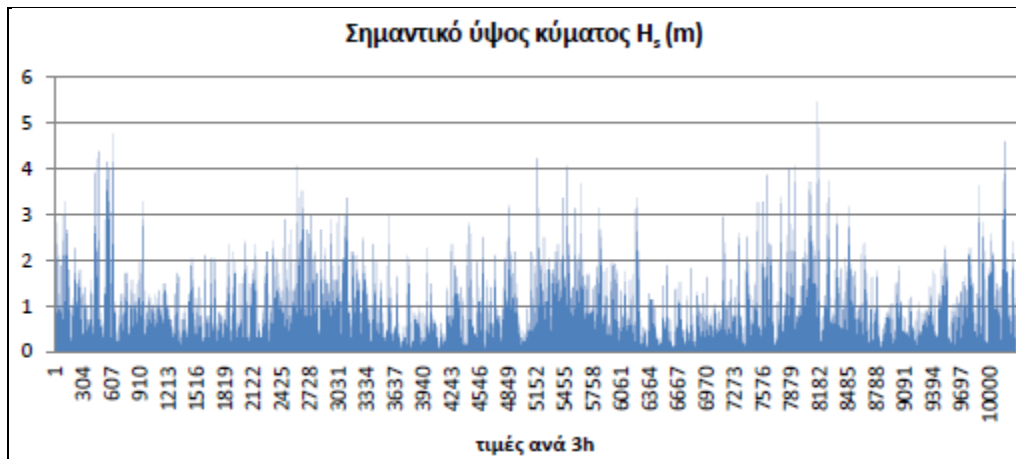
Εικόνα 46: Ανεπτυγμένο ροδόγραμμα ανέμου Σκύρου (Ντάβαλης 2016).

Το τρίτο βήμα της μελέτης είναι η καταγραφή της χρονοσειράς του σημαντικού ύψους κύματος. Από τη χρονοσειρά προκύπτει το εύρος σημαντικού ύψους (0.05 - 5,39)m, ενώ η μέση τιμή του H_s κύματος είναι στα 0,875m (Εικ.47).

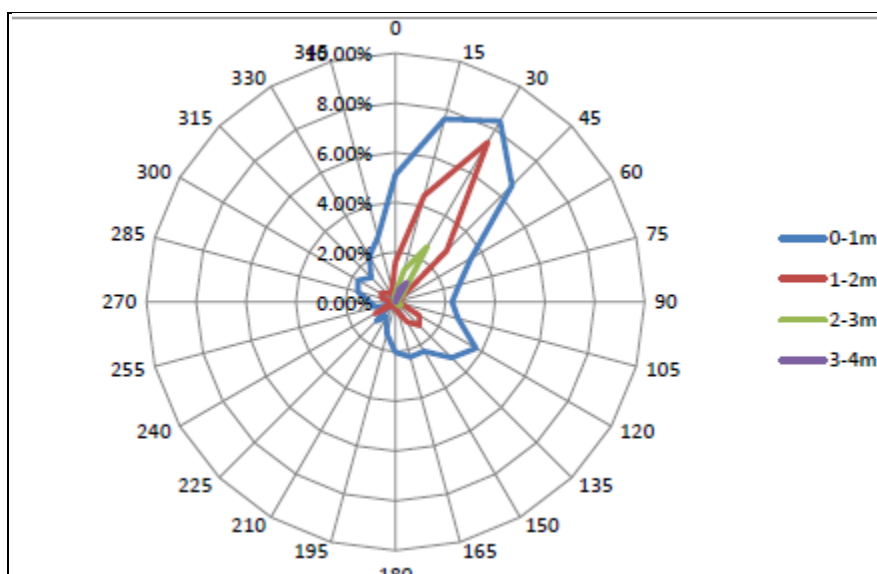
Το τέταρτο βήμα είναι η καταγραφή του ροδογράμματος κύματος (Εικ.48). Στο διάγραμμα αυτό δίνεται η κατεύθυνση των κυμάτων όπως αυτή καταγράφεται από



των πλωτό σταθμό. Κατά παρόμοιο τρόπο με το ροδόγραμμα ανέμου από το ροδόγραμμα κύματος προκύπτει και το ανεπτυγμένο ροδόγραμμα.

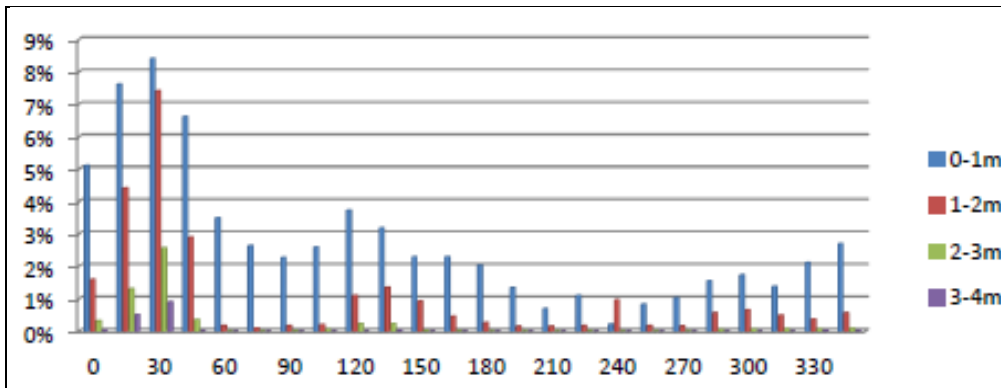


Εικόνα 47: Χρονοσειρά σημαντικού ύψους κύματος (Ντάβαλης 2016).

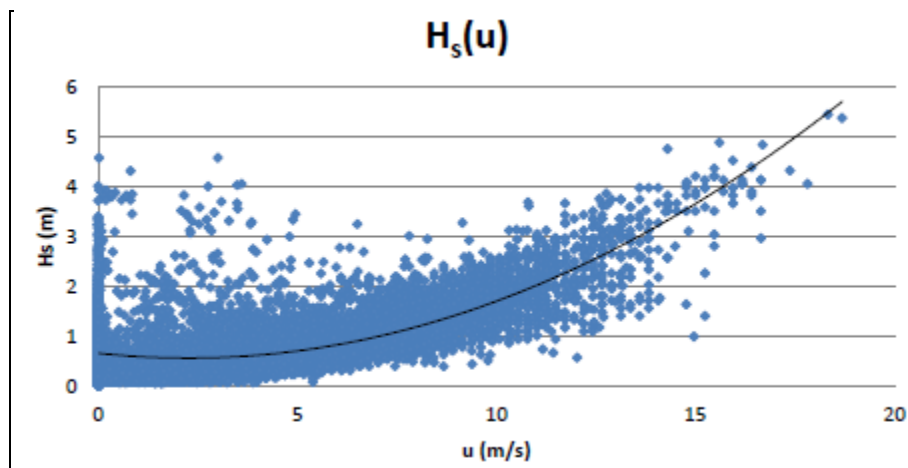


Εικόνα 48: Ροδόγραμμα κύματος σταθμού Σκύρου (Ντάβαλης 2016) .

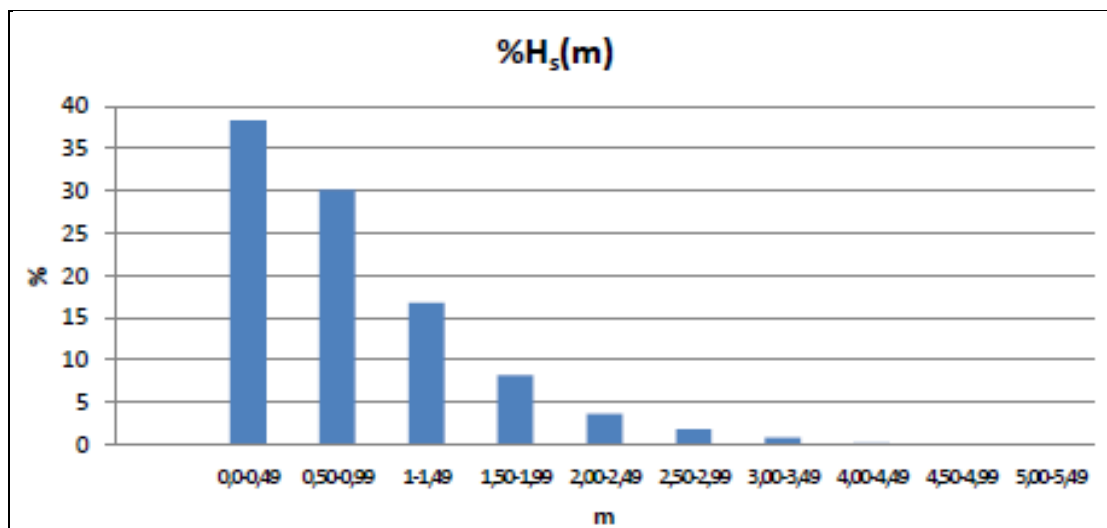
Παρατηρείται από το ροδόγραμμα κύματος ότι τα κύματα φθάνουν στην Σκύρο από βόρεια- βορειοανατολικά. Συγκρίνοντας το ροδόγραμμα κύματος με το αντίστοιχο για την ταχύτητα του ανέμου γίνεται αντιληπτό ότι τα περισσότερα αλλά και υψηλότερου σημαντικού ύψους κύματα δημιουργούνται από τους ανέμους με την μεγαλύτερη ταχύτητα, οι οποίοι στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι οι βόρειοι-βορειοανατολικοί.



Εικόνα 49: Ανεπτυγμένο ροδόγραμμα κύματος (Ντάβαλης 2016).



Εικόνα 50: Συσχέτιση σημαντικού ύψους κύματος - ταχύτητας ανέμου (Ντάβαλης 2016).



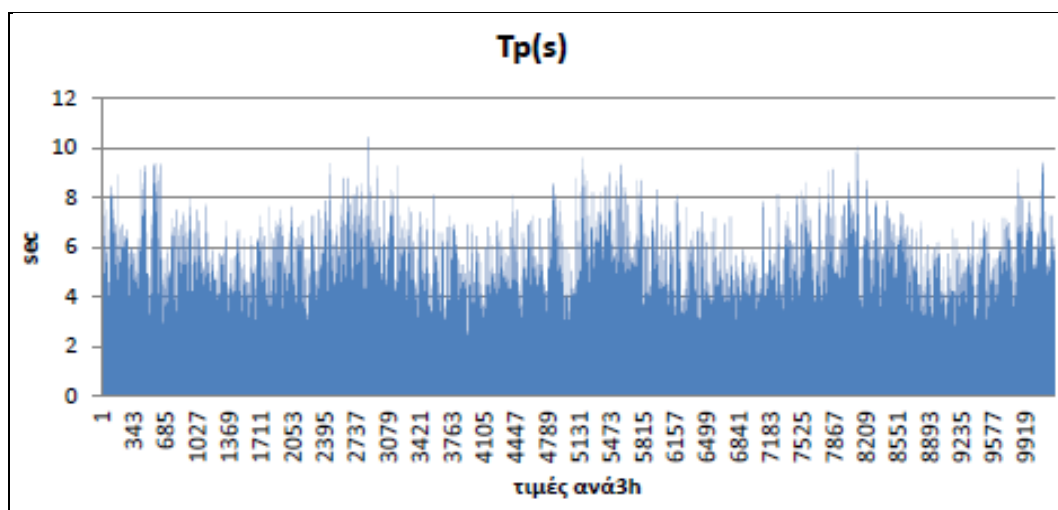
Εικόνα 51: Ποσοστιαία κατανομή σημαντικού ύψους ως προς την ταχύτητα ανέμου.



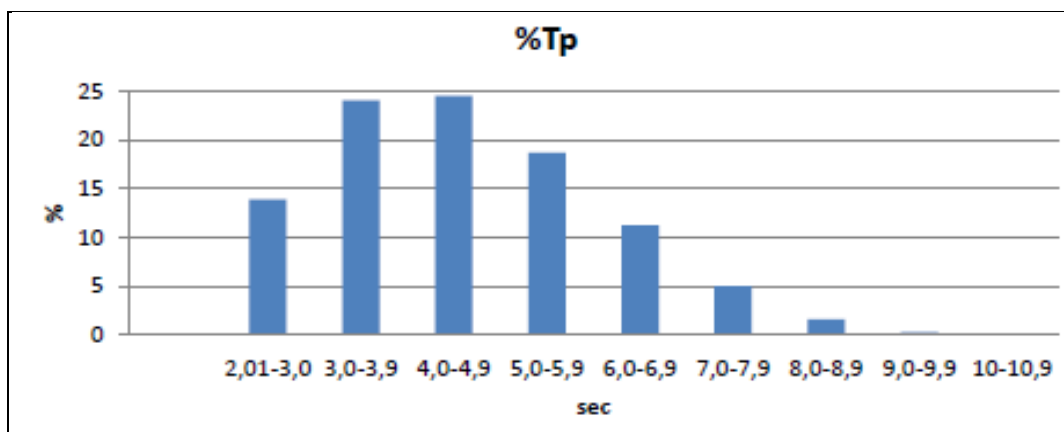
Το πέμπτο βήμα της μελέτης είναι η δημιουργία γραφήματος που περιγράφει τη συσχέτιση σημαντικού ύψους κύματος H_s , με την ταχύτητα του ανέμου. Από τη συσχέτιση αυτή προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η ταχύτητα του ανέμου τόσο υψηλότερα είναι τα κύματα που καταγράφονται. Όμως και σε αυτή την περίπτωση κυματισμός και μάλιστα σημαντικού ύψους παρουσιάζεται και χωρίς την παρουσία ανέμου. Από την άλλη πλευρά όμως το μεγαλύτερο ποσοστό σημαντικού ύψους κύματος διατηρείται σε αρκετά χαμηλές τιμές. Αυτό το συμπέρασμα είναι εμφανές από την κατανομή πυκνότητας πιθανότητας της συσχέτισης του σημαντικού ύψους με την ταχύτητα του ανέμου που πνέει στη θαλάσσια περιοχή της Σκύρου (Εικ.51).

Από το διάγραμμα κατανομής πυκνότητας πιθανότητας προκύπτει ότι σε ποσοστό 30% των κυμάτων το σημαντικό ύψος κύματος ανήκει στο εύρος (0.5-1)m. Δεδομένου ότι ένα ποσοστό κυμάτων περίπου 37.5% έχει σημαντικό ύψος έως 0.5m προκύπτει ότι τα υπόλοιπα δηλ. σε ποσοστό 32% το σημαντικό ύψος κύματος ξεπερνά το 1m.

Στο έκτο βήμα της μελέτης ενδιαφέρουν τα χρονικά χαρακτηριστικά των κυμάτων. Έτσι για παράδειγμα στο συγκεκριμένο βήμα μελετάται η χρονοσειρά της περιόδου κορυφής T_p και η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας των δεδομένων της.



Εικόνα 52: Χρονοσειρά τιμών περιόδου κορυφής T_p .



Εικόνα 53: Κατανομή πυκνότητας πιθανότητας T_p (Ντάβαλης 2016).

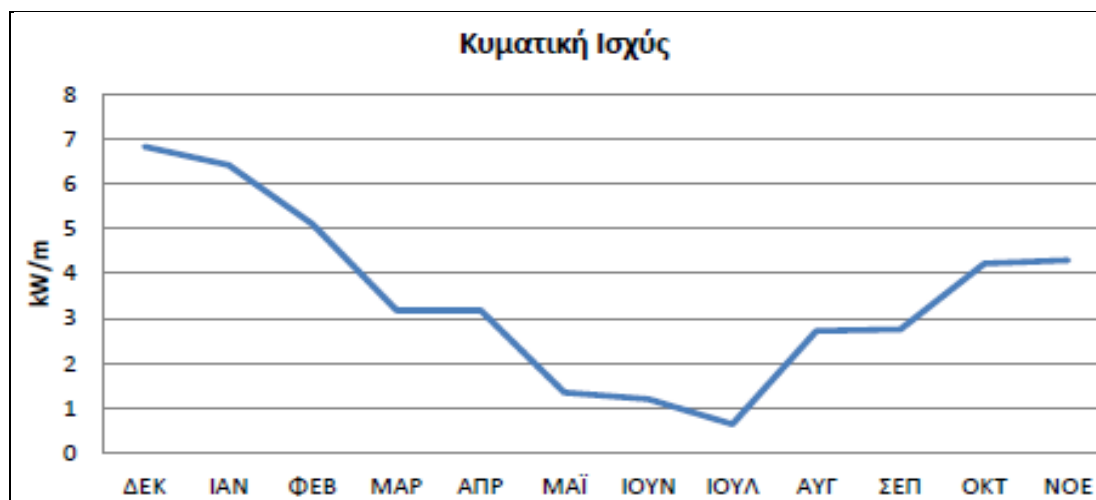


Από την κατανομή πυκνότητας πιθανότητας των τιμών της περιόδου κορυφής προκύπτει ότι περίπου το 37% των καταγεγραμμένων κυμάτων έχει περίοδο κορυφής μεγαλύτερη των 5sec. Περίπου σε ποσοστό 50% των κυμάτων έχει περίοδο (3-5)sec. Η μικρότερη τιμή της περιόδου είναι 1.99 sec και η μέγιστη 10.43sec.

Τέλος στο έβδομο βήμα και τελευταίο με βάση τις καταγεγραμμένες τιμές σημαντικού ύψους κύματος (H_s) και περιόδου κορυφής (T_p) προκύπτουν τα δεδομένα κυματικής ισχύος. Η μέση τιμή της κυματικής ισχύος ανά μήνα στην εξεταζόμενη περιοχή από την τετραετή μέτρηση δίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.

Από την κατανομή μέσης ετήσιας παραγωγής κυματικής ενέργειας προκύπτει ότι ο ετήσιος μέσος όρος της κυματικής ισχύος ανέρχεται στα 3.492 kW/m. Ειδικότερα οι τιμές παραγόμενης ισχύος κυμαίνονται στο εύρος (0.641 - 6.828) kW/m με την μικρότερη τιμή να αντιστοιχεί στον Ιούλιο και τη μέγιστη στον Δεκέμβριο. Σε εποχιακή βάση, κατά τους χειμερινούς μήνες η μέση κυματική ισχύς είναι 6.114 kW/m, την άνοιξη 2.571 kW/m, το καλοκαίρι 1.532 kW/m και το φθινόπωρο 3.761 kW/m.

Με την παραπάνω μεθοδολογία και με δεδομένα πάντα το σημαντικό ύψος κύματος και την περίοδο κορυφής είναι δυνατό να προκύψουν διαγράμματα παραγόμενης κυματικής ισχύος για όλους τους υπάρχοντες σταθμούς καταγραφής αλλά και για νέους που θα μπορούσαν να ποντιστούν σε ελληνικές θάλασσες προκειμένου να δοθεί μια πιο πλήρης εικόνα του κυματικού δυναμικού της χώρας.



Εικόνα 54: Κατανομή μέσης ετήσιας παραγωγής κυματικής ενέργειας (Ντάβαλης 2016).

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Κυματική Ενέργεια και Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης – Μετατροπής Θαλασσίων Κυμάτων
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

ΜΟΥΤΣΑΤΣΟΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ
ΠΡΟΣΚΕΦΑΛΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ





5. Εφαρμοσμένες Διατάξεις Ακτογραμμής.

Στα επόμενα δίνονται παραδείγματα διατάξεων που έχουν ήδη εφαρμοστεί σε πειραματικό στάδιο δοκιμών ανά τον κόσμο. Στα επόμενα δίνονται τα χαρακτηριστικά της διάταξης LIMPET που ακολουθεί την τεχνολογία παλλόμενης στήλης και έχει εφαρμογή ως τεχνολογία ακτογραμμής. Παρόμοια, δίνονται στοιχεία για τη διάταξη WECA ελληνικής κατασκευής που και αυτή είναι μια τεχνολογία ακτογραμμής και προσομοιάζει την τεχνική παλλόμενης στήλης.

5.1 Σύστημα LIMPET.

Το 1998 το Queen's University Belfast σε συνεργασία με μια ομάδα εταιριών (Wavegen Ireland Ltd, Charles Brand Ltd, Kirk McClure Morton και τη I.S.T. Portugal) ανέλαβαν την κατασκευή και δοκιμή μιας παράκτιας εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τη μετατροπή της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων.

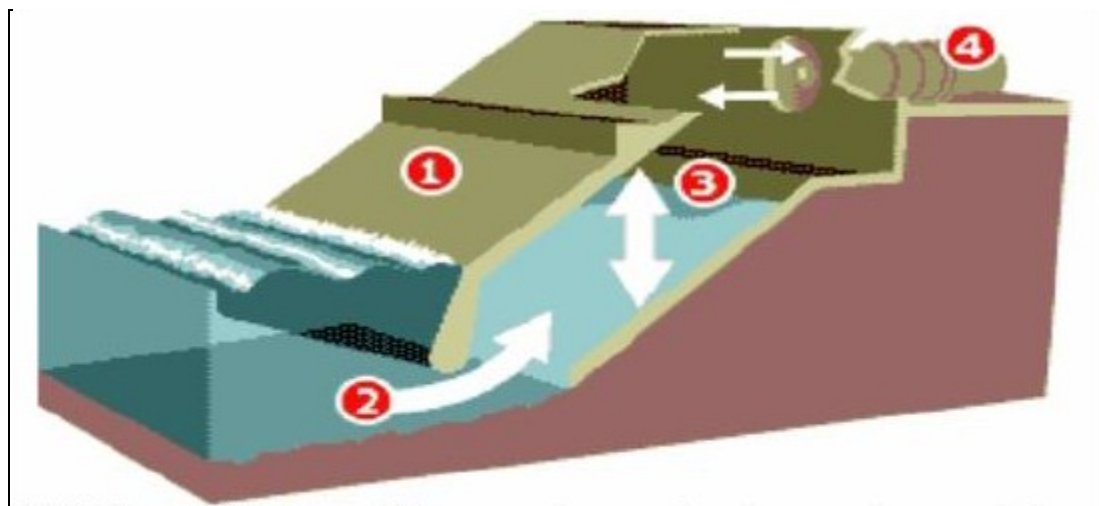
Το σύστημα αυτό που είναι γνωστό ως LIMPET (Last Installed Marine Power Energy Transmitter), εγκαταστάθηκε στη νήσο Islay έξω από τα δυτικά παράλια της Σκωτίας και η έναρξη της λειτουργίας του πραγματοποιήθηκε τον Νοέμβριο του 2000. Η εγκατάσταση λειτουργεί και ελέγχεται από απόσταση (remote), ενώ τροφοδοτεί το δίκτυο του Ηνωμένου Βασιλείου με ηλεκτρική ενέργεια. Η μέχρι σήμερα επιτυχημένη λειτουργία χωρίς επίβλεψη της εγκατάστασης LIMPET απέδειξε τις δυνατότητες συνεισφοράς της παράκτιας κυματικής ενέργειας στα εθνικά αποθέματα ενέργειας.

Η τεχνολογία στην οποία βασίζεται η λειτουργία της διάταξης είναι η παλλόμενη υδάτινη στήλη. Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν τρεις στήλες ύδατος που ταλαντώνονται μέσα σε θαλάμους από μπετόν με εσωτερικές διαστάσεις 6 m επί 6 m και σε κλίση 40° ως προς την οριζόντιο. Το άνω τμήμα των θαλάμων είναι εσωτερικά συνδεδεμένο και η μετατροπή της ενέργειας πραγματοποιείται από μία μόνο στροβιλογεννήτρια που είναι συνδεδεμένη στον μεσαίο αγωγό. Οι στήλες ύδατος έχουν εξωτερικό πλάτος 21m και βρίσκονται 17m εσωτερικά της φυσικής ακτογραμμής σε ένα προκατασκευασμένο βάθος νερών 6m. Οι πλευρές του ανοίγματος είναι ουσιαστικά κάθετες ως προς την επιφάνεια της θάλασσας. Στην εγκατάσταση αυτή η κατακόρυφη παλινδρομική κίνηση των κυμάτων ουσιαστικά λειτουργεί ως έμβολο που πιέζει τον αέρα ενός θαλάμου, η ροή του οποίου περιστρέφει ένα στρόβιλο.



Εικόνα 55: Η εγκατάσταση LIMPET (Σκωτία).

Το πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διάταξης είναι ότι μπορεί να εφαρμοστεί ακόμα και σε απόκρυμνα βράχια απαιτώντας όμως αρκετές εργασίες πολιτικού μηχανικού. Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει ένα στρόβιλο Wells αντίστροφης περιστροφής, κατασκευασμένο από ανοξείδωτο χάλυβα με διάμετρο πτερωτής 2.6m. Κάθε επίπεδη επιφάνεια με πτερύγια του στρόβιλου Wells είναι ενσωματωμένη απευθείας στον άξονα μιας τροποποιημένης επαγωγικής γεννήτριας των 250 kW, δίνοντας έτσι συνολική εγκατεστημένη ισχύ 500 kW.



Εικόνα 56: Τμηματική περιγραφή της διάταξης LIMPET.

Στην Εικ.56 δίνονται αναλυτικά τα διάφορα τμήματα της διάταξης LIMPET. Πιο αναλυτικά στο τμήμα (1) φαίνεται ο θάλαμος περιορισμού των υδάτων που είναι κατασκευασμένος στην πρόσοψη του βράχου. Στο τμήμα (2) φαίνεται η κίνηση των κυμάτων που ωθεί νερό εντός του θαλάμου. Το ανώτερο τμήμα του θαλάμου περιέχει αέρα - τμήμα(3) – ο οποίος μπορεί να συμπιέζεται και να αποσυμπιέζεται λόγω της συσσώρευσης του νερού με τη λειτουργία να προσομοιάζει την ταλαντούμενη στήλη νερού. Τέλος στο τμήμα (4) ο αέρας μπορεί να κινεί το στρόβιλο Wells για την μετέπειτα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Η έξοδος των γεννητριών συνδέεται με κύκλωμα εξομάλυνσης και αντιστροφής πριν από τη σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο. Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης LIMPET μπορούν να ελέγχονται και να μεταβάλλονται από ειδικό λογισμικό. Ο θόρυβος που παράγεται από την ροή του αέρα διαμέσου του στροβίλου μειώνεται σε ένα ειδικό ακουστικό θάλαμο πριν απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα. Η στρόβιλο-γεννήτρια περιλαμβάνει επίσης μια βαλβίδα με περιστρεφόμενο δίσκο και μια βαλβίδα βάνας. Το σύστημα συλλογής πληροφοριών παρακολουθεί όλες τις βασικές λειτουργικές παραμέτρους καθ' όλη τη διαδικασία μετατροπής της ενέργειας.

Επίσης κατά τις δοκιμές έγινε παρακολούθηση (monitoring) της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων που οδηγούνται στο θάλαμο, χρησιμοποιώντας διατάξεις μετατροπής πίεσης του πυθμένα. Επίσης καταγράφηκαν τα φορτία των κυμάτων στους εμπρός και πίσω τοίχους της εγκατάστασης και μετρήθηκαν οι κινήσεις των στηλών ύδατος χρησιμοποιώντας διατάξεις μετατροπής της πίεσης καθώς και ηχητικές διατάξεις μετατροπής.

Στον παρακάτω πίνακα 2 παρουσιάζονται οι μετρήσεις παραγόμενης ισχύος που έγιναν για τα 53 αντιπροσωπευτικά είδη κυμάτων, ως προς το ύψος και την περίοδο, που συναντώνται στη συγκεκριμένη τοποθεσία της εγκατάστασης LIMPET.

Πίνακας 2. Μέτρηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με το ύψος και την περίοδο των θαλάσσιων κυμάτων της εγκατάστασης LIMPET στο νησί του Islay.

	Tz (s)		Power (kW)	
1	10.0	1.5	8.8	1.85
2	12.4	1.6	9.6	0.40
3	7.6	1.6	8.9	2.87
4	9.8	1.5	9.4	8.18
5	10.0	2.5	24.8	1.42
6	11.9	1.6	10.1	0.76
7	11.8	2.4	23.3	1.13
8	11.9	2.9	33.6	0.18
9	14.7	2.2	21.4	0.18
10	7.6	1.5	8.9	9.23
11	7.6	1.5	21.6	0.33
12	9.6	1.6	10.0	10.83
13	9.6	2.5	25.5	4.98
14	10.0	2.9	34.2	0.36
15	11.8	1.6	10.7	0.87
16	11.3	2.4	22.7	2.18
17	12.2	2.9	35.3	1.53
18	12.3	3.5	48.8	0.33
19	13.1	2.8	34.2	0.15
20	13.6	3.4	50.9	0.15
21	7.6	1.6	10.4	9.49
22	7.7	2.6	25.2	0.98
23	9.7	1.6	10.5	8.98
24	9.6	2.4	23.0	7.09
25	10.1	3.0	37.8	1.67
26	10.1	3.6	51.6	0.18
27	11.5	1.6	11.5	0.62
28	12.3	2.3	22.2	0.87
29	12.0	2.9	35.9	1.49
30	11.8	3.5	51.9	0.87



Με βάση τα πρώτα αποτελέσματα από τη δοκιμή και αξιολόγηση του συστήματος LIMPET στο νησί Islay, αναπτύχθηκαν νέα σχέδια σε συνδυασμό με διάφορες μεθόδους κατασκευής, καθώς και νέα υλικά. Στο μέλλον προβλέπεται η κατασκευή ενός απλούστερου μοντέλου στρόβιλο-γεννήτριας και συστήματος ελέγχου που σε συνδυασμό με τη μείωση των υλικών κατασκευής των θαλάμων, θα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ανταγωνιστικές τιμές ως προς τις αντίστοιχες των ανεμογεννητριών. Η συνεργασία κατά τη συγκεκριμένη εγκατάσταση LIMPET αποτέλεσε σημαντικό βήμα για την εξέλιξη των μελλοντικών τεχνολογιών κυματικής ενέργειας οδηγώντας στην ανάπτυξη νέας γενιάς συστημάτων «ταλαντευόμενης στήλης ύδατος». Η εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας LIMPET στο νησί Islay συνεχίζει την παραγωγική λειτουργία της συνδεδεμένη με το δίκτυο ενώ πλέον έχει γίνει τουριστικό αξιοθέατο, επιδεικνύοντας τις προοπτικές εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας.



Εικόνα 57: Διαδικασίες – στάδια κατασκευής της διάταξης LIMPET.

Στην Εικ.18 δίνονται τα βασικά στάδια κατασκευής της διάταξης LIMPET. Ειδικότερα στην πάνω αριστερά φαίνεται αρχικά η εκσκαφή της επιλεγμένης τοποθεσίας εγκατάστασης, πάνω δεξιά η κατασκευή των 3 τσιμεντένιων αεροθαλάμων, κάτω αριστερά η συναρμολόγηση του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τον στρόβιλο Wells και τις επαγωγικές γεννήτριες και κάτω δεξιά η τελική μορφή της πρόσοψης της εγκατάστασης.



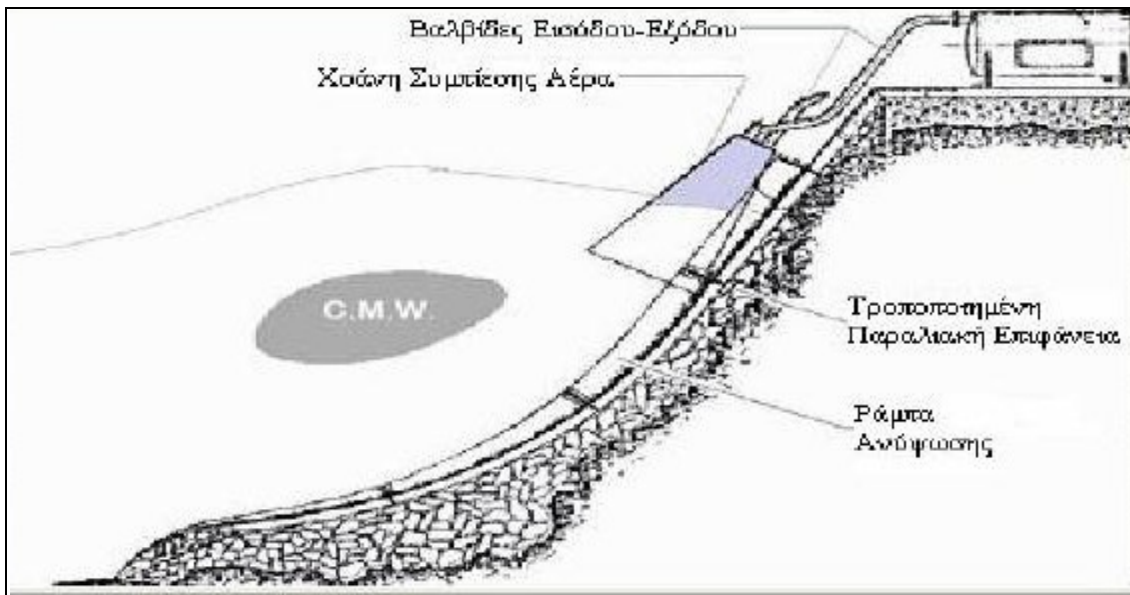
5.2 Σύστημα WECA (Ελλάδα).

Το WECA (Wave Energy Conversion Activator) είναι αποτέλεσμα της ελληνικής εταιρίας DAEDALUS Informatics Ltd και αποτελεί έναν μετατροπέα της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων σχεδιασμένο κυρίως για εγκατάσταση ακτογραμμής, αν και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε εφαρμογές ανοιχτής θαλάσσης. Η βασική αρχή λειτουργίας του μετατροπέα WECA στηρίζεται στη συμπίεση του εγκλωβισμένου αέρα κατά την πρόσκρουση του θαλάσσιου κύματος. Πιο συγκεκριμένα, ένα είδος ανεστραμμένης κωνοειδούς χοάνης λειτουργεί ως αεροθάλαμος συμπίεσης που χρησιμοποιεί την ορμή του ερχόμενου κύματος (CMW – Critical Momentum Wedge principle). Η λειτουργία του μετατροπέα WECA προσομοιάζει σε μεγάλο βαθμό το θερμοδυναμικό κύκλο ενός συμβατικού αεροσυμπιεστή.

Το προτεινόμενο μοντέλο WECA πλήρους κλίμακας είναι από χάλυβα, ώστε να είναι κατάλληλο για ενσωμάτωση σε κυματοθραύστες ή άλλες κατασκευές. Τα υλικά κατασκευής αποτελούν πάντα πρόκληση σε επίπεδο ανάπτυξης μιας οικονομικότερης λύσης αφού το υλικό κατασκευής δεν είναι ανάγκη να είναι ο χάλυβας. Άλλα κατάλληλα υλικά με παρόμοια μηχανικά χαρακτηριστικά, μπορούν αρκεί βέβαια να συμφέρουν από οικονομικής άποψης.



Εικόνα 58: Προτεινόμενη εφαρμογή μετατροπής κυματικής ενέργειας σε κυματοθραύστη WECA.



Εικόνα 59: Τμήματα της διάταξης WECA.

Λειτουργικά το WECA είναι σχεδιασμένο για να απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας των προσπιπτόντων θαλάσσιων κυμάτων και να τη μετατρέπει σε συμπιεσμένο αέρα, που στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ή άλλου είδους ενέργεια. Σχεδιάστηκε ένα πειραματικό μοντέλο WECA πλήρους κλίμακας με διαστάσεις 7m ύψος και 6m πλάτος, ενώ με βάση αυτό πραγματοποιήθηκαν οι αναγκαίοι θεωρητικοί υπολογισμοί και η εξομοίωση της λειτουργίας του σε υπολογιστικό περιβάλλον.. Μελετήθηκαν οι διάφορες εναλλακτικές κατασκευαστικές και μηχανολογικές λύσεις με σκοπό τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού πριν την τελική κατασκευή του πρωτοτύπου. Η έξοδος ισχύος του συγκεκριμένου πρωτοτύπου αναμένεται να είναι περίπου 20 kW.

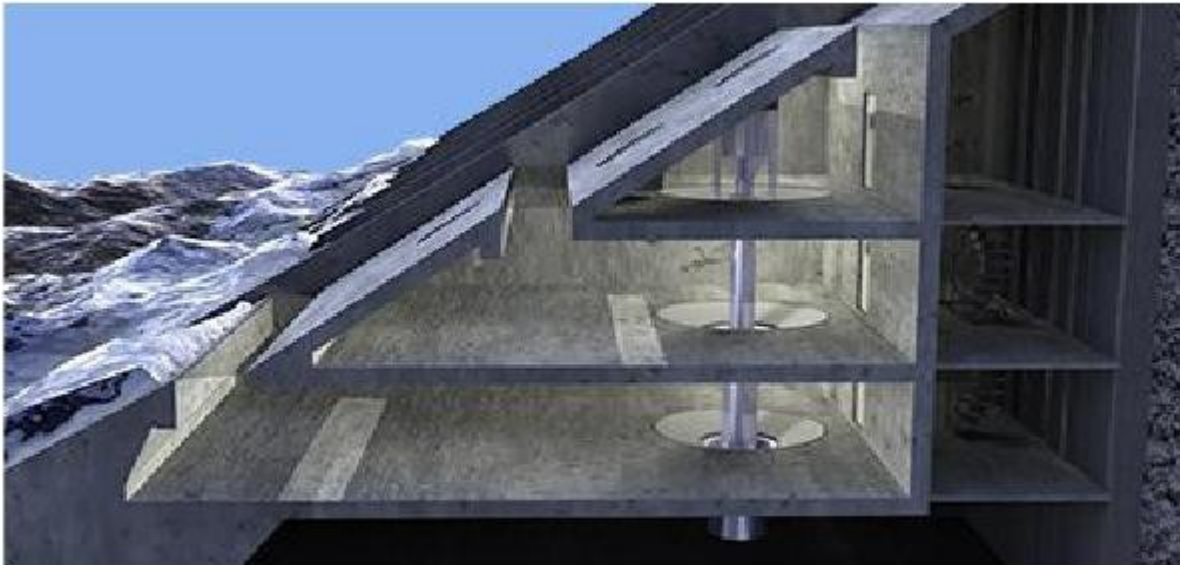
5.3 Σύστημα Υπέρβασης – Υπερύψωσης (Νορβηγία).

Η νορβηγική εταιρία WAVEenergy AS ιδρύθηκε το 2004 για την ανάπτυξη της Γεννήτριας Κυμάτων Αυλακωτού Κώνου SSG (SeawaveSlot-ConeGenerator). Το SSG είναι ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας που βασίζεται στην αρχή υπέρβασης των θαλάσσιων κυμάτων χρησιμοποιώντας ένα σύνολο τριών δεξαμενών τοποθετημένων η μία πάνω στην άλλη, στις οποίες η ενέργεια των εισερχόμενων κυμάτων θα αποθηκεύεται. Το νερό που παγιδεύεται στις δεξαμενές διέρχεται μέσα από τον πρωτοποριακό πολύτμηματικό στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η χρήση πολλαπλών δεξαμενών έχει ως αποτέλεσμα μια υψηλότερη συνολική απόδοση σε σύγκριση με κατασκευές μίας μόνο δεξαμενής.

Το SSG έχει το πλεονέκτημα της εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας σε διάφορες δεξαμενές η μία πάνω στην άλλη, οδηγώντας με αυτόν τον τρόπο σε υψηλότερη υδραυλική απόδοση του συστήματος. Το SSG κατασκευάζεται από οπλισμένο σκυρόδεμα, ενώ ο άξονας του στρόβιλου και οι πύλες που ελέγχουν τη ροή του νερού είναι ουσιαστικά τα μοναδικά κινούμενα τμήματα του μηχανικού συστήματος. Είναι ένας ευέλικτος μετατροπέας όσον αφορά το εύρος των επιλογών



εφαρμογής. Μπορεί να εφαρμοστεί ως πλωτή ή σταθερή εγκατάσταση ανοικτής θαλάσσης ή ως εγκατάσταση ακτής ενσωματωμένη σε μια κυματοθραυστική εγκατάσταση. Το SSG μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης και καθαρού πόσιμου νερού μέσω όσμωσης.



Εικόνα 60: Τομή πολυμηματικού μετατροπέα κυματικής ενέργειας.

Η τεχνολογία SSG χρησιμοποιεί τον καινοτόμο πολύ-μηματικό στρόβιλο που αναπτύχθηκε από τη WAVEenergy AS, με τη κατοχύρωση του με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας να εκκρεμεί. Ο πολύ-μηματικός στρόβιλος έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να εκμεταλλεύεται διαφορετικά ύψη κυματικών μετώπων με τη χρήση ενός κοινού άξονα στρόβιλου. Αυτού του είδους η τεχνολογική καινοτομία ελαχιστοποιεί το πλήθος των διαδοχικών εκκινήσεων-διακοπών της λειτουργίας του στρόβιλου, ακόμα και αν μία μόνο δεξαμενή τροφοδοτεί το στρόβιλο με θαλασσινό νερό. Το SSG μπορεί να ενσωματωθεί σε μια κυματοθραυστική κατασκευή. Έτσι μπορεί να αποτελεί μια οικονομική λύση για τη μετατροπή της κυματικής ενέργειας που θα επωφελείται από τη λειτουργία της κυματοθραυστικής κατασκευής. Επίσης με τη δυνατότητα ηλεκτρόλυσης και ώσμωσης του νερού το SSG μπορεί να αποφέρει ένα επιπλέον οικονομικό όφελος πέρα από τη πώληση ηλεκτρικής ενέργειας, την παραγωγή δηλ. πόσιμου νερού ή και υδρογόνου. Η χωρητικότητα και η διαμόρφωση των δεξαμενών αποτελεί επίσης ένα πεδίο έρευνας ώστε να συνεισφέρουν σημαντικά στην εξομάλυνση των εισερχόμενων κυμάτων και στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Το SSG μπορεί να αποτελεί μια εγκατάσταση εναλλακτικής πηγής ενέργειας ιδιαίτερα για νησιά που χρησιμοποιούν ντίζελ ή φυσικό αέριο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μειώνοντας έτσι το συνολικό κόστος καθώς και τις εκπομπές CO₂η μείωση των οποίων αποτελεί πάντα ζητούμενο στις μέρες μας.

Το SSG μπορεί να εφαρμοστεί σε εγκατάσταση στην ακτή εκεί όπου το τοπίο έχει σφηνοειδές σχήμα σαν μικρός κόλπος, έτσι ώστε να παράγονται μεγαλύτερα κύματα που θα αυξήσουν την απόδοση του. Το νησί Kvitsoy, όπου είναι εγκατεστημένη μια πειραματική κατασκευή, αποτελεί ένα από τα 10.000 νησιά που

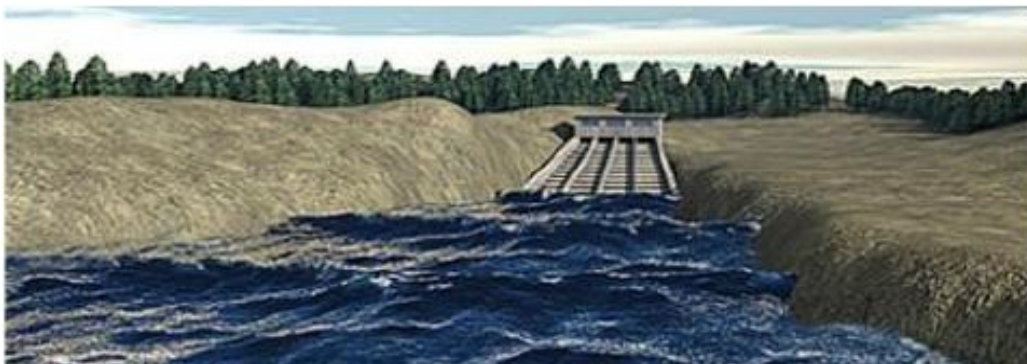


πληρούν τις κατάλληλες προϋποθέσεις για εφαρμογή της τεχνολογίας SSG σε παραθαλάσσιες τοποθεσίες.

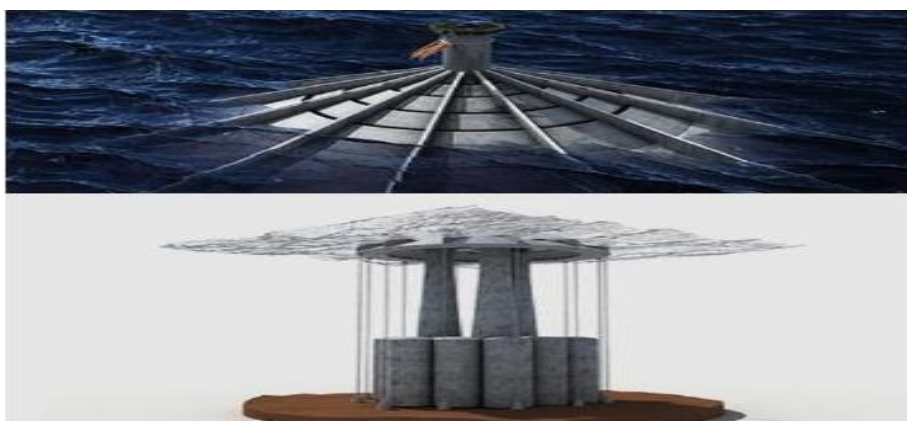


Εικόνα 61:Προτεινόμενη διάταξη SSG σε εφαρμογή κυματοθραύστη.

Η εγκατάσταση SSG θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε ανοικτή θάλασσα πλωτή ή σταθερά εγκατεστημένη στο βυθό. Ειδικότερα για τις σκανδιναβικές χώρες μπορεί να στο μέλλον να χρησιμοποιηθεί μια παροπλισμένη πλατφόρμα πετρελαίου ως βάση, παρατείνοντας έτσι τη ζωή της ως χρήσιμη βοηθητική διάταξη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την εκμετάλλευση των κυμάτων.



Εικόνα 62:Εφαρμογή τεχνολογίας ακτογραμμής SSG σε κολπίσκο.



Εικόνα 63:Προτεινόμενη εφαρμογή SSG σε υπεράκτια ζώνη.



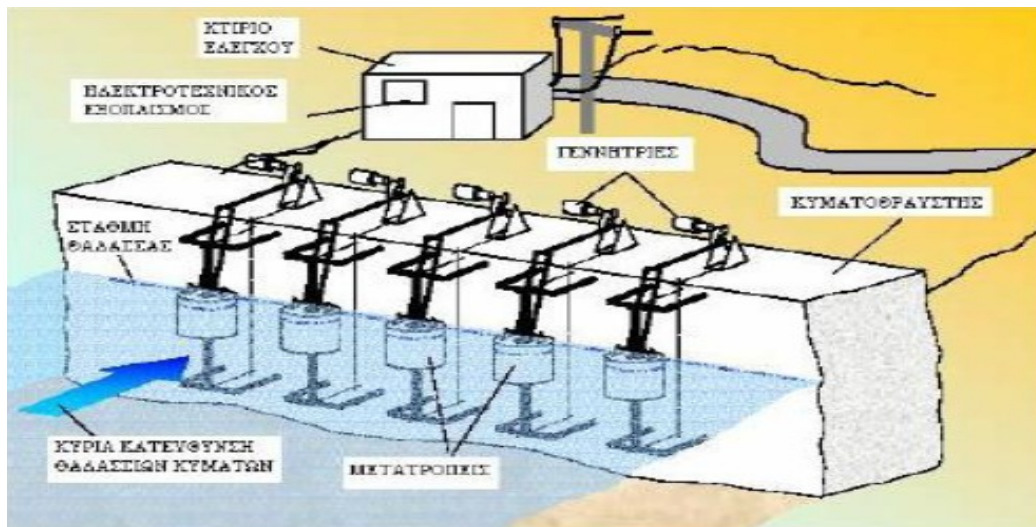
Το Δεκέμβριο του 2005 μια κοινοπραξία με συντονιστή την εταιρία WAVEenergy AS, ξεκίνησε ένα έργο στο νησί του Kvitsoy στη Νορβηγία. Ο στόχος του πειραματικού έργου είναι η ανάπτυξη ενός πρωτοτύπου πλήρους κλίμακας της κυματοθραυστικής κατασκευής SSG και η εγκατάσταση του στη δυτική ακτή του νησιού σε κυματικό κλίμα ενέργειας 19 Kw/m. Ο κύριος στόχος αυτού του έργου ήταν η επίδειξη λειτουργίας της διάταξης σε πλήρη κλίμακα συμπεριλαμβανομένου του στροβίλου, της γεννήτριας, του συστήματος ελέγχου, καθώς επίσης και της σύνδεσης του συστήματος στο δίκτυο.

5.4 Σύστημα LabBouoy (Ελλάδα).

Το LabBuoy είναι μια τεχνολογία μετατροπής της κυματικής ενέργειας για εγκατάσταση στην ακτή. Πρόκειται δηλ. για μια τεχνολογία ακτογραμμής. Η πρώτη φάση της δοκιμής του μαθηματικού και φυσικού μοντέλου πραγματοποιήθηκε με τη συνεργασία του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (CRES), του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου Αθηνών (ΕΜΠ), της Athena SA, της Ramboll (DK), του Queen's University Belfast UK) και του University College Cork (IE). Ο μετατροπέας LabBuoy είναι πλωτού τύπου, ενώ τα συστήματα μετάδοσης και μετατροπής βρίσκονται εγκατεστημένα σε στερεά θεμέλια (κυματοθραύστης ή αποβάθρα). Αυτά τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά αυξάνουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της ανάκλασης των θαλάσσιων κυμάτων στην πρόσοψη του κυματοθραύστη, καθώς επίσης βελτιώνουν την αξιοπιστία και την ασφάλεια λειτουργίας.

Οι βασικοί στόχοι του πειραματικού έργου ήταν:

- Η ανάπτυξη επιβεβαίωση και επαλήθευση αξιόπιστων μαθηματικών μοντέλων για το σχεδιασμό συστημάτων και την πρόβλεψη φορτίων. Τα μοντέλα είναι αποτελεσματικά για διάφορα αντιπροσωπευτικά κυματικά κλίματα που συναντώνται κατά μήκος της Ευρωπαϊκής ακτογραμμής.
- Η εφαρμογή της τεχνολογίας με πειράματα – δοκιμές μικρής κλίμακας σε δεξαμενή δημιουργίας τεχνητών κυμάτων
- Η επεξεργασία της πολύπλοκης διαμόρφωσης για τη μέγιστη απορρόφηση, εκμετάλλευση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Αξιολόγηση των κοινωνικοοικονομικών αποτελεσμάτων και των περιβαλλοντικών επιδράσεων της εφαρμοζόμενης τεχνολογίας σε αντιπροσωπευτικές θαλάσσιες συνθήκες στην Ευρώπη.



Εικόνα 64: Βασικά μέρη εγκατάστασης LabBouoy κοντά σε κυματοθραύστη.

Στην Εικ.25 δίνεται σχηματικά μια εγκατάσταση LabBouoyόπου διακρίνονται 5 μετατροπείς κυματικής ενέργειας σε σειρά.

Κατά τη μοντελοποίηση της λειτουργίας δόθηκαν δεδομένα μιας κυματικής εισόδου και μελετήθηκαν στη συνέχεια οι υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διατάξεων μετατροπής και τον κυματοθραύστη. Δύο διαφορετικά μηχανικά συστήματα μετάδοσης δοκιμάστηκαν (αλυσίδα και γρανάζια) ενώ δύο διαφορετικά συστήματα μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας ελέγχθηκαν. Εφαρμόστηκαν γεννήτριες κινούμενες από γρανάζια καθώς και εναλλάκτες άμεσης κίνησης.

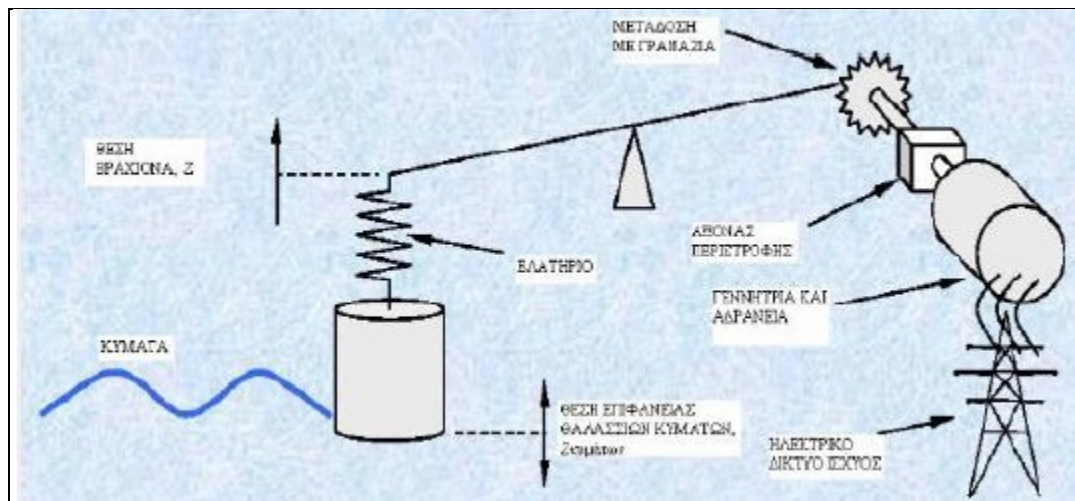
Το μοντέλο αριθμητικής προσομοίωσης της συσκευής LabBouoy αποτελείται από δύο επιμέρους τμήματα, ένα υδροδυναμικό-κινηματικό και ένα ηλεκτρικό. Το υδροδυναμικό-κινηματικό μοντέλο περιγράφει την ανυψωτική κίνηση του κάθε μετατροπέα της σειράς, συνυπολογίζοντας τις υδροδυναμικές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στους ίδιους τους μετατροπείς και στον κυματοθραύστη. Το μοντέλο της ηλεκτρικής μηχανής αποτελείται από ένα μοντέλο Simulink του βραχίονα, του άξονα περιστροφής και της ηλεκτρικής μηχανής και ένα αρχείο κειμένου Matlab που ονομάζεται Simulink για την επίλυση των επαγωγικών εξισώσεων της μηχανής. Μια ειδική πειραματική συσκευή κατασκευάστηκε και εγκαταστάθηκε σε μια στενή δεξαμενή δημιουργίας τεχνητών κυμάτων για τη δοκιμή των λειτουργιών του μοντέλου

Αναφορικά με το μοντέλο φυσικής κλίμακας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε ένα μοντέλο μιας σειράς 5 μετατροπέων σε κατάλληλη κλίμακα (1:10...1:15). Η επίδραση των ηλεκτρικών μηχανών που είναι προσαρτημένες σε κάθε μετατροπέα προσομοιώθηκε με ηλεκτρομηχανικές συσκευές ελέγχου της ταχύτητας, που ρυθμίζονται από αυτοματισμούς. Τα πειράματα διεξάχθηκαν υπό διάφορες κυματικές συνθήκες, προσομοιώνοντας τυπικά κυματικά κλίματα που συναντώνται κατά μήκος της ακτογραμμής της Ευρώπης.

Δοκιμάστηκε αριθμητικά ένα μοντέλο με διάμετρο πλωτού σώματος διαμέτρου 1.5m και βύθισμα 1m. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης υποδεικνύουν μια έντονη αλληλεπίδραση της αδράνειας του συστήματος και της απόσβεσης του πλάτους ταλάντωσης της μετατροπής ισχύος, ως προς την απόδοση



του μετατροπέα. Με κατάλληλη ρύθμιση αυτών ιδιοτήτων στις τοπικές κυματικές συνθήκες, το σύστημα μπορεί να συντονιστεί για τη μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 65: Σχηματική απεικόνιση των κινούμενων τμημάτων LabBuoy.

Ένα μοντέλο κλίμακας 1:15 που αποτελείται από μια σειρά με 5 μετατροπείς κατασκευάστηκε και εγκαταστάθηκε στη δεξαμενή κυμάτων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου Αθηνών (ΕΜΠ). Κάθε μετατροπέας ήταν εξοπλισμένος με τα παρακάτω αισθητήρια όργανα:

- Αισθητήρας δύναμης για τη μέτρηση της κάθετης δύναμης του πλωτού σώματος,
- Αισθητήριο στιγμιαίας θέσης του βραχίονα μετάδοσης της κίνησης του πλωτού σώματος,
- Οπτικός κωδικοποιητής για τη μέτρηση της στιγμιαίας ταχύτητας περιστροφής του βραχίονα,
- Κινητήρας DC προσαρτημένος στο πίσω άκρο του βραχίονα κάθε μοντέλου παρέχοντας μια ροπή αντίστασης στην κίνηση του βραχίονα διαμέσου οδοντωτού ιμάντα. Κάθε κινητήρας ελέγχεται με ελεγκτή ανάδρασης.

Τα αποτελέσματα της συνολικής μελέτης τόσο αριθμητικής όσο και πειραματικής ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικά και έδειξαν καλή σύγκλιση της αριθμητικής προσομοίωσης με τα πειράματα.

Ως προς την οικονομική ανάλυση προέκυψε ότι ανάλογα με το τοπικό επίπεδο της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων, το κόστος παραγωγής της συσκευής LabBuoy εκτιμάται ότι θα είναι περίπου 0,07 με 0,09 €/kWh. Αυτές οι τιμές, αν και είναι υψηλότερες από τις αντίστοιχες των συμβατικών πηγών ενέργειας, πιστεύεται ότι με την περαιτέρω ανάπτυξη θα μπορούσαν να μειωθούν.



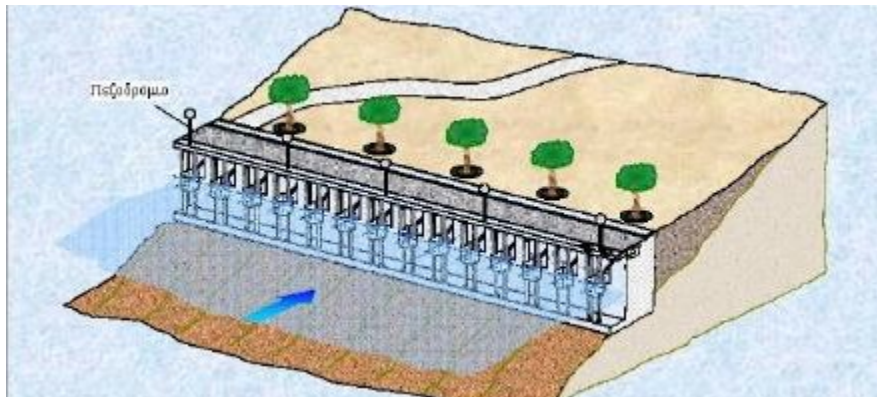
Εικόνα 66: Λειτουργία δοκιμαστικού μοντέλου κλίμακας 1:15 (EMΠ).

Λαμβάνοντας υπ' όψιν την αρχικά διαθέσιμη ακτογραμμή των 180 km για την Ευρωπαϊκή Ένωση (συμπεριλαμβανομένου της Ισλανδίας και της Νορβηγίας), η αρχική αγορά αναμένεται να ισοδυναμεί με 24.000 μετατροπείς με συνολική έξοδο ισχύος έως και 2,5 με 3 GW και με συνολική ετήσια απόδοση έως και 11 με 14 TWh.

5.4.1 Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις.

Οι βασικές επιδράσεις της τεχνολογίας είναι η οπτική και ακουστική ρύπανση, η όχληση των ψαριών και των θαλάσσιων θηλαστικών και η αναδιαμόρφωση της ακτής εγκατάστασης. Αναφορικά με την οπτική και ακουστική ρύπανση αν το περιβάλλον εγκατάστασης ενός κυματοθραύστη LabBuoy είναι κατάλληλα διαμορφωμένο και χρησιμοποιηθεί κατάλληλη ακουστική μόνωση για τους μετατροπείς, υπάρχει η δυνατότητα ελαχιστοποίησης ή ακόμα και πλήρους εξάλειψης των οπτικών και ακουστικών επιδράσεων. Επειδή οι επιδράσεις του LabBuoy για τη θαλάσσια ζωή δεν έχουν εξακριβωθεί ακόμα, απαιτείται εκτενής μελέτη στο μέλλον. Αλλά ακόμα και αν η λειτουργία του LabBuoy αποδειχθεί ότι μειώνει τους πληθυσμούς των ψαριών στην περιοχή εγκατάστασης του, που θα καλύπτει μια συγκριτικά μικρή έκταση, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν τα τεράστια πλεονεκτήματα της τεχνολογίας, όπως είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με μηδενικές εκπομπές ρύπων, η μικρή επίδραση στον κύκλο ζωής και τα κοινωνικά οφέλη.

Επίσης καθώς οι ακτογραμμές υφίστανται διάβρωση από την έντονη κυματική δραστηριότητα, τα σχετικά αποτελέσματα μιας κυματοθραυστικής εγκατάστασης LabBuoy μόνο θετικά μπορούν να είναι. Η εφαρμογή της τεχνολογίας σε οικοδομημένες βιομηχανικές περιοχές (π.χ. λιμάνια) δεν αναμένεται να βρει αντίθετη τη κοινή γνώμη. Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής δείχνει ότι, όταν συγκριθεί με την συμβατική παραγωγή ηλεκτρισμού, η παρούσα τεχνολογία μειώνει τις αρνητικές επιδράσεις σε περιοχές με μείζων περιβαλλοντικό ενδιαφέρον μέχρι και 70%.



Εικόνα 67: Παράδειγμα μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και διάβρωσης.

5.5 Σύστημα SDE (Ισραήλ).

Το σύστημα SDE είναι ένας παράκτιος μετατροπέας της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων, ο οποίος εφευρέθηκε από τον Shmuel Onadiah που ίδρυσε την εταιρία S.D.E. Energy Ltd στο Ισραήλ. Αυτή η μέθοδος παραγωγής ηλεκτρισμού από την ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων έχει κατοχυρωθεί με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας (US Patent #5,461,862).



Εικόνα 68: Εγκατάσταση συστήματος SDE στο Ισραήλ.

Η τεχνολογία του μετατροπέα SDE χρησιμοποιεί την κίνηση των θαλάσσιων κυμάτων για να παράγει υδραυλική πίεση, που με την σειρά της μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό. Το σύστημα εκμεταλλεύεται ένα πλήθος χαρακτηριστικών μεγεθών του κύματος όπως την ταχύτητα, το ύψος, το βάθος, την ανύψωση και την πτώση του κύματος, καθώς και τη ροή κάτω από το ερχόμενο κύμα, παράγοντας με αυτό τον τρόπο ενέργεια. Το συγκεκριμένο σύστημα έχει κατασκευαστεί και δοκιμαστεί σε οκτώ μονάδες συνολικά. Ένα μοντέλο πλήρους κλίμακας έχει κατασκευαστεί και



δοκιμαστεί στο Ισραήλ, όπου είχε την ικανότητα παραγωγής και παρήγαγε 40 kW/h σε ετήσια βάση. Η εταιρία έλαβε κρατική οικονομική στήριξη ύψους 1.360.000€ ενώ της έχει παραχωρηθεί το δικαίωμα, παραγωγής και πώλησης 50MW ηλεκτρικής ισχύος για 20 χρόνια. Η ενέργεια που παράγεται με τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι προφανώς καθαρή μορφή χωρίς επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Όπως φαίνεται και στην Εικ.30 η παλινδρομική κίνηση ενός πτερυγίου συνδέεται με άρθρωση. Η άρθρωση έχει συμπεριφορά εμβόλου με δυνατότητα οδήγησης του άξονα ενός στροβίλου – γεννήτριας ο οποίος στη συνέχεια ακολουθείται από κύκλωμα μετατροπής της κινητικής σε ηλεκτρική ενέργεια.



Εικόνα 69: Διαδοχή σταδίων παλινδρομικής κίνησης πτερυγίου.



6. Εφαρμοσμένες Παράκτιες Διατάξεις.

Στο κεφάλαιο 3 αναδείχθηκαν τεχνολογίες ακτογραμμής που βασίζονται στην τεχνική παλλόμενης στήλης για την κίνηση ενός στροβίλου. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια ανάπτυξης τεχνικών που έχουν εφαρμοστεί σε παράκτιες κατασκευές.

6.1 Σύστημα MIGHTYWHALE (Ιαπωνία).

Από το 1987 η ομάδα κυματικής ενέργειας του JAMSTEC (Japan Marine Science and Technology Center) στην Ιαπωνία ασχολείται με την ανάπτυξη μιας πλωτής συσκευής που μετατρέπει την ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων σε μηχανική και ονομάζεται MightyWhale.



Εικόνα 70: Καθέλκυση του MightyWhale.

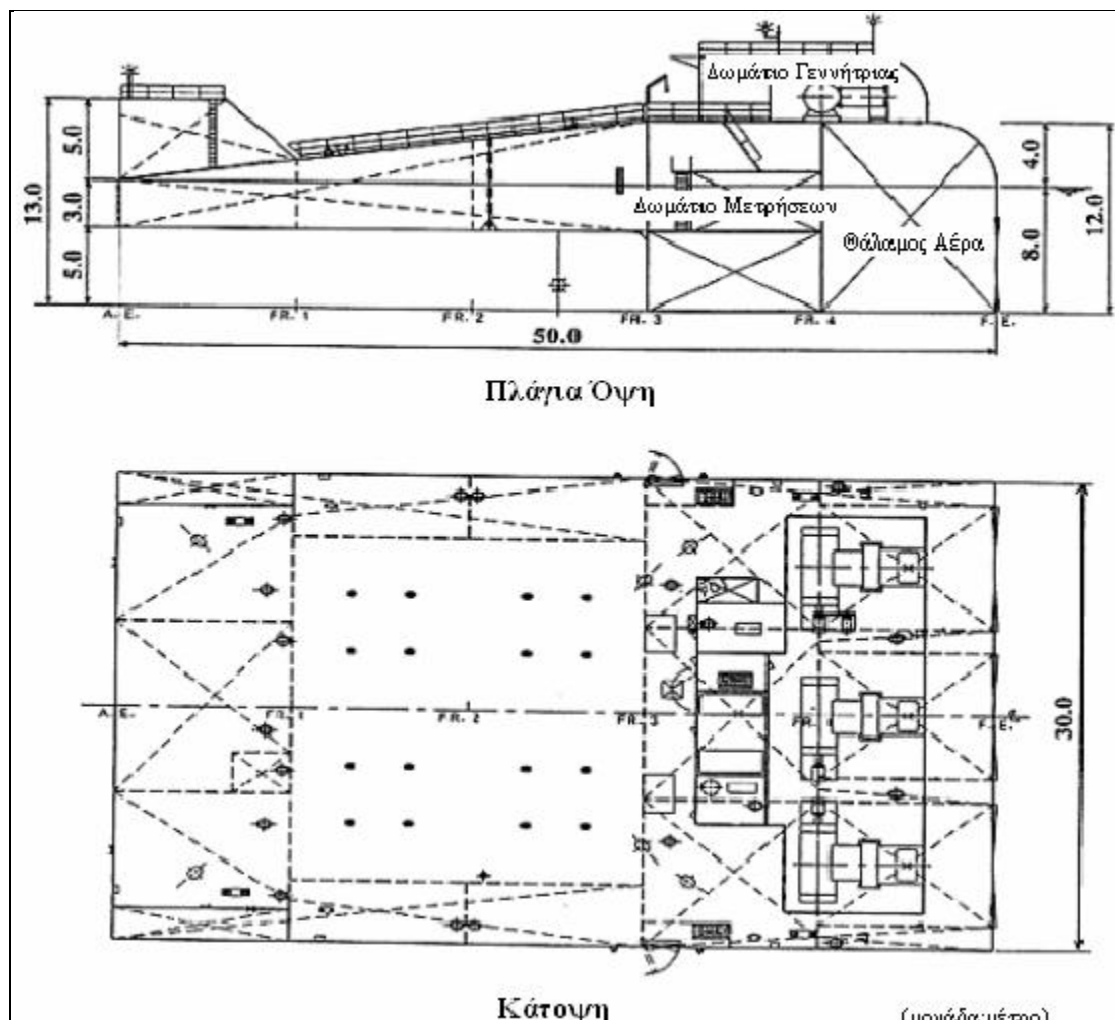
Οι θεωρητικοί υπολογισμοί και οι δοκιμές μοντέλων σε δεξαμενές τεχνητών κυμάτων επιβεβαίωσαν τη συμπεριφορά της συσκευής και παρέιχαν τις αναγκαίες πληροφορίες για τον ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό ενός πρωτοτύπου ανοιχτής θαλάσσης. Οι διαστάσεις του πρωτοτύπου επιλέχθηκαν να είναι 50m μήκος, 30m πλάτος και 12m ύψος. Η συνολική ονομαστική ισχύ έφθασε στα 110 kW. Το βάθος των υδάτων της τοποθεσίας δοκιμής του πρωτοτύπου ήταν 40m και η συσκευή προσδένεται στο βυθό με μέτωπο προς τη κατεύθυνση των επικρατούντων κυμάτων.

Η λειτουργία του πρωτοτύπου βασίζεται στην ταλαντευόμενη στήλη ύδατος της θάλασσας και περιέχει τρεις θαλάμους αέρα που μετατρέπουν τη κυματική ενέργεια σε πίεση αέρα. Η κίνηση των θαλάσσιων κυμάτων προκαλεί την άνοδο και κάθοδο της στάθμης του νερού στο εσωτερικό του κάθε θαλάμου, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο ροή αέρα διπλής κατευθύνσεως που κινεί έναν αεροστρόβιλο. Και οι τρεις στρόβιλοι πάνω στη συσκευή MightyWhale είναι παλινδρομικοί και κάθε ένας από αυτούς έχει δύο περιστροφικά τμήματα στη σειρά. Οι στρόβιλοι κινούν τρεις επαγωγικές γεννήτριες που παράγουν τριφασική AC τάση 200 Volts. Όπως φαίνεται



παρακάτω στην εικόνα 46, υπάρχουν τρεις θάλαμοι πλευστότητας ακριβώς πίσω από τους θαλάμους αέρα, δύο σε κάθε πλευρά της συσκευής και τρεις προς τη πρύμνη της. Σα δύο κάθετα περύγια στις άκρες τις πρύμνης παρέχουν πλευρική σταθερότητα στη συσκευή MightyWhale. □ τον μπροστινό κεντρικό θάλαμο πλευστότητας στεγάζεται η καμπίνα ελέγχου που χρησιμοποιείται ως σταθμός μετρήσεων πάνω στο πλοίο. Αυτός ο χώρος περιέχει επίσης και το σύστημα ελέγχου για τους αεροστρόβιλους και τις γεννήτριες.

Η κατασκευή του πρωτοτύπου ολοκληρώθηκε στο ναυπηγείο IshikawajimaHarimaHeavyIndustries στην πόλη Αιοί της επαρχίας Hyogo. Η καθέλκυση του πλοίου πραγματοποιήθηκε τον Μάρτιο του 1998 ενώ οι δοκιμές ξεκίνησαν τον Ιούλιο του ίδιου έτους και ολοκληρώθηκαν το 2000. Μια από τις προτεινόμενες εφαρμογές της τεχνολογίας, που παρουσιάζεται στη παρακάτω εικόνα 48, είναι η παροχή ηλεκτρισμού σε ιχθυοτροφεία στα ήρεμα νερά πίσω από τη σειρά των συσκευών MightyWhale και η αφαλάτωση του θαλασσινού νερού.



Εικόνα 71: Πλάγια όψη και κάτοψη διάταξης MightyWhale.



Εικόνα 72: Προτεινόμενη εφαρμογή παράταξης συσκευών MW.

6.2 Σύστημα WETEnGen (Καναδάς).

Η канаδική εταιρία WaveEnergy Technologies Inc δημιουργήθηκε το 2004 για την ανάπτυξη, την κατοχύρωση, τη δοκιμή και την εμπορευματοποίηση του μετατροπέα WET EnGen™. Ο ιδρυτής του εγχειρήματος είναι ο Alan Volwes μαζί με τους Brian Kurczaba και Heather Acres. Η εταιρία συνεργάζεται με το Εθνικό Ερευνητικό Συμβούλιο του Καναδά και το Πανεπιστήμιο του Dalhousie.

Πρόκειται για μια καινοτόμο τεχνολογία, που μετατρέπει την κυματική ενέργεια σε μηχανική για την παραγωγή ηλεκτρισμού ή αφαλατωμένου νερού. Το βασικό τμήμα είναι το λεγόμενο SmartFloat™ (Έξυπνη Σημαδούρα) του που κινείται κατά μήκος ενός άκαμπτου άξονα με κλίση 45°. Ο άξονας είναι δεμένος σε ένα μόνο σημείο επαφής με τη στερεωμένη στον πυθμένα βάση, έτσι ώστε να επιτρέπει στη συσκευή να περιστρέφεται ελεύθερα ώστε να αυτό-προσδιορίζεται προς την κατεύθυνση των θαλάσσιων κυμάτων. Όπως προκύπτει απαιτείται αγκύρωση της διάταξης στο βυθό ή σε κομμάτι που θα βρίσκεται σε κάποιο βάθος για το λόγο αυτό και η διάταξη χαρακτηρίζεται ως παράκτιας τεχνολογίας αλλά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και ως υπεράκτια τεχνική εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας.

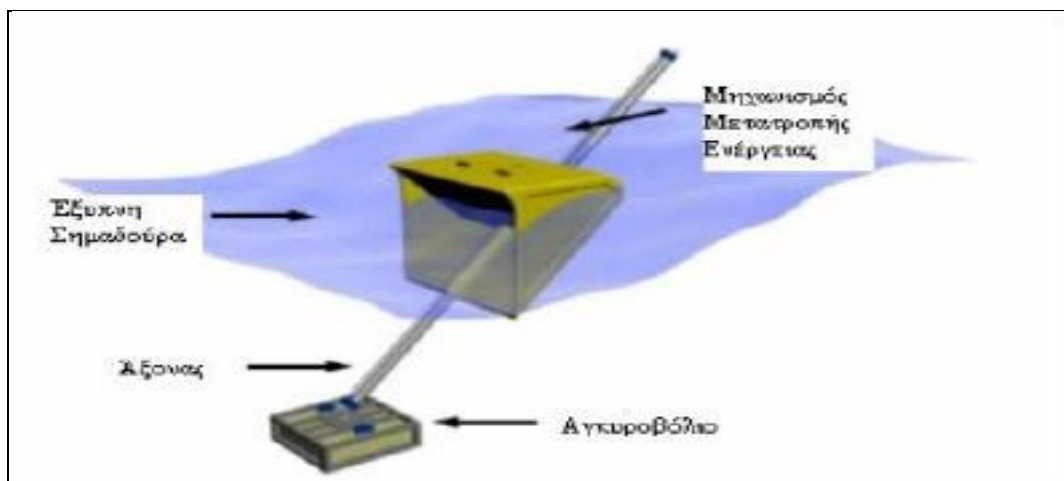
Το θετικό και πλεονέκτημα της συγκεκριμένης διάταξης είναι ότι η κίνηση του άξονα είναι συνεχής ενώ έχει την ευχέρεια να ευθυγραμμίζεται με την διεύθυνση των κυμάτων αφού είναι προσδεμένη μόνο σε μια θέση του πυθμένα με την αγκύρωση. Κατά αυτό τον τρόπο υπάρχει η δυνατότητα συνεχούς μετατροπής και παραγωγής ενέργειας με κινήσεις τόσο κατά τα όρη όσο και τις κοιλάδες των κυμάτων.

Σε σχέση με άλλες συσκευές μετατροπής κυματικής ενέργειας η συγκεκριμένη διάταξη διαθέτει σημαντικά μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση μετατροπής. Έχει

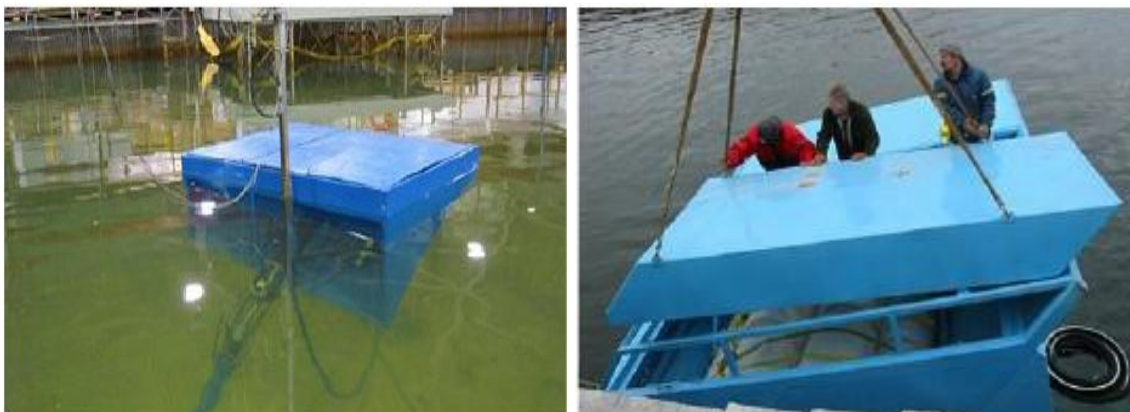


χαμηλότερο κόστος ανά kW εγκατεστημένης ισχύος, χαμηλότερο κόστος λειτουργίας και συντήρησης και είναι οικονομικά αποδοτικό ακόμα και σε σχετικά ήπια κυματικά κλίματα (15 kW/m). Επίσης η συσκευή έχει χαμηλές απαιτήσεις συντήρησης, κυρίως λόγω της απλής κατασκευής αφού περιλαμβάνει ελάχιστα κινούμενα τμήματα, ενώ η τοποθέτηση και απόσυρση της εγκατάστασης γίνεται εύκολα. Η διάταξη όπως και οι περισσότερες δοκιμάστηκε πρώτα σε συνθήκες εργαστηρίου (κλίμακα εργαστηρίου) και έπειτα σε ανοικτή θάλασσα. Το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προέκυψε να είναι συγκρίσιμο με άλλες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική ή ο άνθρακας και τα παράγωγά του, ενώ αποτελεί μια πολύ ικανοποιητική λύση σε ιδιαίτερα απομονωμένες περιοχές εκτός δικτύου όπου η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται αποκλειστικά από ντίζελ ή άλλα υγρά καύσιμα.

Μέχρι το 2006 η εταιρία ολοκλήρωσε με επιτυχία τις φάσεις της ανάπτυξης της αρχικής ιδέας, της δοκιμής σε δεξαμενή τεχνητών κυμάτων διάφορων μοντέλων μικρής κλίμακας και της δοκιμής στην ανοικτή θάλασσα ενός μοντέλου εγκατεστημένης ισχύος 20 kW. Στην παρούσα φάση εμπορευματοποίησης περιλαμβάνονται κατασκευή και δοκιμή μοντέλων επίδειξης, με την εγκατεστημένη ισχύ να φθάνει πλέον τα 40 kW.



Εικόνα 73: Τμήματα που αποτελούν τη διάταξη WETEnGen.



Εικόνα 74: Δοκιμή μοντέλου μικρής κλίμακας σε δεξαμενή κυματισμών και συναρμογή μοντέλου εγκατεστημένης ισχύος 20kW.



6.3 Σύστημα CES (Ηνωμένες Πολιτείες).

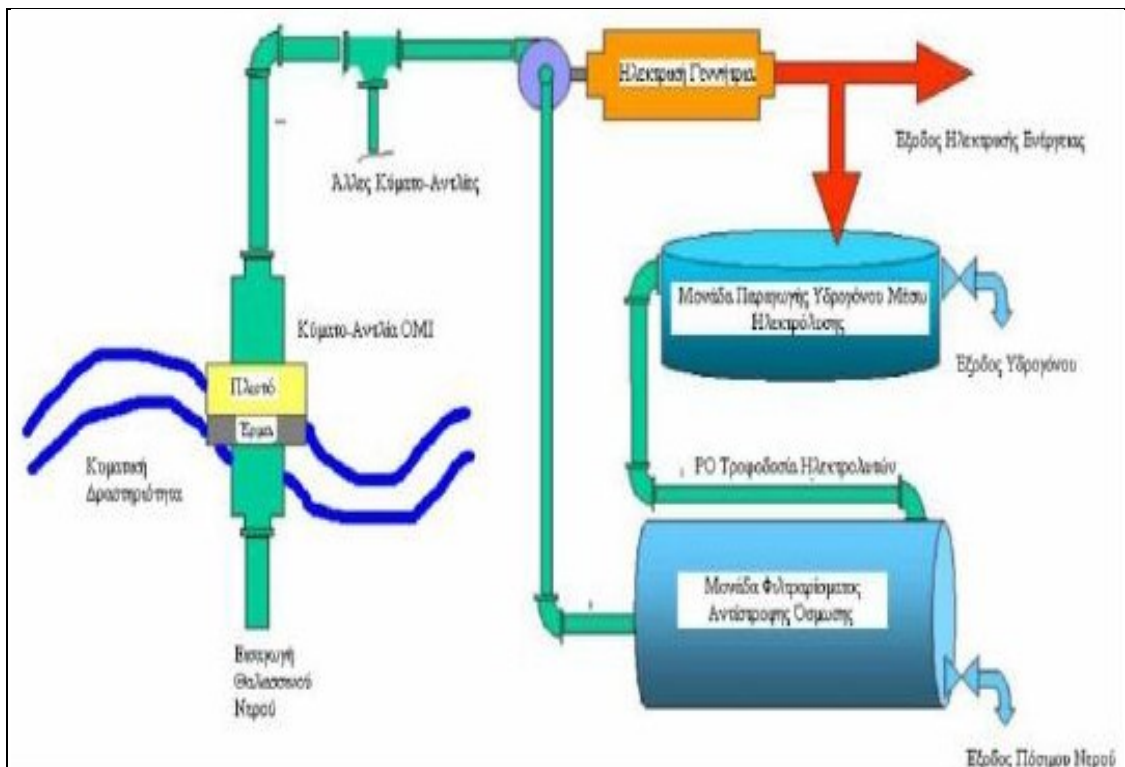
Η αμερικάνικη εταιρία Ocean Motion International (OMI) ανέπτυξε μια τεχνολογία που δεν εξαρτάται από εξωτερικές πηγές καυσίμου για την χαμηλού κόστους παραγωγή νερού, ηλεκτρισμού και αέριου υδρογόνου χωρίς επιβλαβείς εκπομπές στο περιβάλλον. Αυτή η συσκευή ονομάζεται CES (Combined Energy System).

Κατά τη συγκεκριμένη τεχνική όταν ένα κύμα διέρχεται κάτω από ένα πλωτό σώμα (σημαδούρα) και αυτό δεν υποβαστάζεται πλέον, επιτρέπει ένα βαρίδιο να καταδυθεί κατακόρυφα και με αυτόν τον τρόπο να συμπιέσει θαλασσινό νερό σε μία απλή φυγοκεντρική αντλία. Το συμπιεσμένο νερό οδηγείται μέσω μίας κοιλότητας του κύριου άξονα σε μια πολλαπλή που συνδυάζει πολλές αντλητικές συναρμολογήσεις μαζί. Οι έξοδοι της συνδυασμένης αντλίας κινούν αποδοτικά την υδροστροβιλική γεννήτρια, τα φίλτρα όσμωσης και τις μονάδες ηλεκτρόλυσης. Οι αντλητικές συναρμολογήσεις εγκαθίστανται σε μία τροποποιημένη πλατφόρμα μίας μονάδας διάτρησης ανοιχτής θαλάσσης. Η πλατφόρμα-φορηγίδα έχει 20 με 35 αντλίες με διαμέτρους που κυμαίνονται από 0,3 ως 0,914 m ανάλογα με τις κυματικές συνθήκες. Η μονάδα που αποκαλείται «φάρμα» έχει δύο επίπεδες πλατφόρμες. Η κάτω είναι πλημμυρισμένη με θαλασσινό νερό, βυθίζεται και σταθεροποιείται στο βυθό του ωκεανού, ενώ η πάνω έχει ένα πλαίσιο ανύψωσης που επιτρέπει τη ρύθμιση της πλατφόρμας καθ' ύψος.

Η συγκεκριμένη διάταξη – πλατφόρμα – φάρμα αποτελείται από 4 βασικά τμήματα, τα οποία είναι η αντλία κυμάτων θαλασσινού νερού, η υδροστροβιλική ηλεκτρική γεννήτρια, η μονάδα φιλτραρίσματος αντίστροφης όσμωσης και η μονάδα παραγωγής υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης. Το OMI CES είναι σχεδιασμένο για λειτουργία πάνω σε πλατφόρμα που ως τέτοια θα μπορούσε να είναι μια πλατφόρμα εξόρυξης πετρελαίου σε λειτουργία ή σε παύση ώστε να υπάρχει και οικονομία κόστους της όλης εγκατάστασης.



Εικόνα 75: Σχηματική αναπαράσταση εφαρμογής συστήματος CES.



Εικόνα 76: Σχηματικό διάγραμμα συνδυασμένου συστήματος CES.

Η αντλία κυμάτων περιγράφεται τεχνικά ως μία συσκευή μετατροπής της ενέργειας των κυμάτων τύπου μετατόπισης μάζας. Η πατενταρισμένη αντλία θαλασσινού νερού Refa, που αποτελεί το βασικότερο κομμάτι του CES, συνιστά μια καινοτόμα τεχνολογία που χρησιμοποιεί πολύ λίγα και απλά κινούμενα τμήματα για ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης. Αυτή η αντλία θετικής μετατόπισης είναι σχεδιασμένη για την παραγωγή μεγάλων όγκων νερού υψηλής πίεσης με την κίνηση ενός αναπόσπαστου πλωτού σώματος (σημαδούρα), που ταλαντώνεται κατακόρυφα με τη φυσική κίνηση των θαλάσσιων κυμάτων.

Η πλωτή αυτή πλατφόρμα πέρα από τις αντλίες που έχει μελετηθεί ότι θα φέρει είναι εγκατεστημένη και ολισθαίνει (λόγω της κυματικής κίνησης) σε έναν κατακόρυφο άξονα στη μέση της πλατφόρμας. Ο κατακόρυφος άξονας είναι τοποθετημένος ανάμεσα σε μια σταθερά αγκυροβολημένη βάση στον πυθμένα της θάλασσας και σε μια πλατφόρμα στην επιφάνεια πάνω από τα κύματα. Ο κατακόρυφος άξονας λειτουργεί επίσης και ως σωλήνας απορρόφησης και εκκένωσης της κυματοαντλίας, επιτρέποντας πολλαπλές αντλητικές συναρμολογήσεις μαζί. Κάθε κυματοαντλία λειτουργεί χωριστά για να παράγει την έξοδο της ανεξάρτητα συνδεδεμένη με ένα ξεχωριστό σύστημα λειτουργίας για την παραγωγή μιας σταθερής πίεσης και ροής.

Τα χαρακτηριστικά του σχεδιασμού της επιτρέπουν επίσης την τοποθέτηση της σε μία ασφαλή εγκατάσταση για την αποφυγή ζημιάς κατά την διάρκεια καταιγίδων. Η κυματοαντλία έχει κατασκευαστεί και ένα μοντέλο της λειτουργικής κλίμακας έχει συναρμολογηθεί και δοκιμαστεί. Η υδροστροβιλική ηλεκτρική γεννήτρια κινείται από την έξοδο των πολλαπλών κυματοαντλιών, που παρέχουν μία συνεχή τροφοδοσία θαλασσινού νερού μεγάλου όγκου και πίεσης.



Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει και τις λειτουργίες της πλατφόρμας CES εκτός από το να μεταφερθεί στην ακτή για εμπορικούς σκοπούς. Ο σχεδιασμός του CES επιτρέπει επίσης τη βέλτιστη οικονομικά και αποδοτικά χρήση των παραγόμενων προϊόντων.

Το ποσοστό του παραγόμενου ηλεκτρισμού που χρησιμοποιείται για να κινήσει την ηλεκτρολυτική γεννήτρια υδρογόνου μπορεί να ρυθμιστεί ανάλογα με τις απαιτήσεις ηλεκτρισμού και τη τιμή μονάδας του προϊόντος. Αυτό σημαίνει ότι όταν η ηλεκτρική ζήτηση είναι υψηλή, το μεγαλύτερο ποσοστό της εξόδου θα σταλεί στην ακτή ενώ όταν είναι χαμηλή, το CES μπορεί να λειτουργήσει για να παράγει το οικονομικά αποδοτικότερο υδρογόνο για αποθήκευση.

Το συγκεκριμένο συνδυασμένο σύστημα μπορεί επίσης να αφαιράει θαλασσινό νερό μέσω μονάδων φιλτραρίσματος αντίστροφης όσμωσης (RO). Το θαλασσινό νερό υψηλής πίεσης από τη κυματοαντλία φιλτράρεται για να παραχθεί πόσιμο νερό. Αυτό το προϊόν μεταφέρεται στην ακτή μέσω ενός συστήματος σωληνώσεων στον βυθό της θάλασσας.

Η αφαιράωση θεωρείται ακριβή διαδικασία λόγω της εξάρτησης της από την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια και καύσιμα. Τα συστήματα φιλτραρίσματος RO χρησιμοποιούν αντλίες τροφοδοσίας υψηλής πίεσης, που τυπικά τροφοδοτούνται με ηλεκτρισμό. Αυτή η εξάρτηση σε ηλεκτρική ενέργεια από μόνη της έχει οδηγήσει σε πολύ υψηλό κόστος παραγωγής για τους καταναλωτές, τερματίζοντας έτσι αρκετές από τις προηγούμενες μονάδες αφαιράωσης. Το σύστημα που περιγράφεται δεν έχει τέτοια προβλήματα κόστους, με την κυματοαντλία να κινεί τα περισσότερα μέρη του συστήματος.

Η γεννήτρια υδρογόνου αποτελεί ένα τμήμα παραγωγής που ενσωματώνεται στο CES εν αναμονή της μεγάλης ζήτησης για καύσιμο υδρογόνο χαμηλού κόστους. Ο σχεδιασμός του CES υποστηρίζει τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης, μέσω της οποίας παράγεται υδρογόνο μέγιστης καθαρότητας. Η παραγωγή μέσω ηλεκτρόλυσης είναι γνωστό ότι είναι ακριβή λόγω της απαίτησης για ηλεκτρική ενέργεια. Ωστόσο, το CES χρησιμοποιεί τη δική του παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο χαμηλότερο δυνατό κόστος παραγωγής. Το κόστος παραγωγής υδρογόνου μπορεί να μειωθεί περαιτέρω χρησιμοποιώντας ηλεκτρισμό κατά την διάρκεια περιόδων εκτός αιχμής. Ένα ενσωματωμένο χαρακτηριστικό του OMI CES είναι η παράκαμψη/εκκένωση του φίλτρου της μονάδας αφαιράωσης RO που τροφοδοτεί τη μονάδα παραγωγής υδρογόνου. Αυτή η συγκεντρωμένη τροφοδοσία ηλεκτρολυτών, με την αυξημένη αγωγιμότητα της, αυξάνει την απόδοση της διαδικασίας παραγωγής υδρογόνου (Εικ 37).

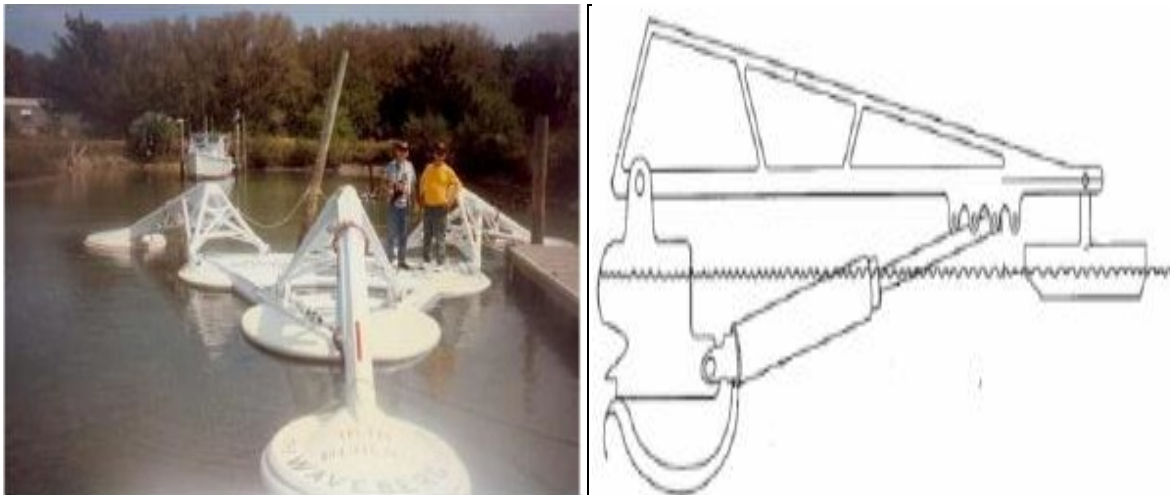
Αναφορικά τέλος με την απόδοση παραγωγής στην περίπτωση πλήρους λειτουργίας για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίστηκε ότι η εγκατεστημένη ισχύς μπορεί να είναι (5 – 50)MW ανάλογα με το πλήθος των αντλιών.

6.4 Σύστημα Waveberg (ΗΠΑ)

Ο εφευρέτης John Berg μετά από 25 χρόνια ερευνητικής προσπάθειας παρουσίασε τον μετατροπέα κυματικής ενέργειας Waveberg™, μια αποδοτική λύση με μεγάλη διάρκεια ζωής. Το μοντέλο μικρής κλίμακας πέρασε επιτυχώς μια σκληρή δοκιμή σε συνθήκες καταιγίδας έξω από τις ακτές της Nova Scotia. Υποβλήθηκε σε



μεγάλα κύματα τα οποία αύξησαν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενώ δεν προκάλεσαν καμιά ζημιά στη συσκευή. Παρόμοιες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δεξαμενές δημιουργίας τεχνητών κυμάτων, ενώ το 1997 ένα πρωτότυπο μεγάλης κλίμακας επιβίωσε κατά τη διάρκεια μιας καταστροφικής καταιγίδας κοντά στις ακτές της Φλόριντα, η οποία ισοπέδωσε πολλά παραθαλάσσια σπίτια.



Εικόνα 77: Το μοντέλο Waveberg κατά τη ρυμούλκηση στις ακτές της Florida (1996).

Το Waveberg είναι ένα αρθρωτό σύστημα συνδεδεμένων πλωτών σωμάτων που λυγίζουν καθώς τα κύματα περνάνε από κάτω τους, χρησιμοποιώντας αυτή τη κίνηση κάμψης για την άντληση θαλασσινού νερού. Στη συνέχεια το νερό υπό υψηλή πίεση μεταφέρεται από το Waveberg™ στη στεριά μέσω ενός συστήματος σωληνώσεων, όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα βασικά υλικά κατασκευής του είναι πλαστικό και φάϊμπεργκλας, λόγω της αντοχής, της αντιδιαβρωτικής δράσης, του χαμηλού κόστους και της ευκολίας κατασκευής τους.

Μια τυπική συσκευή Waveberg™ πλήρους κλίμακας θα παράγει περισσότερο από 100 kW ηλεκτρικής ενέργειας υπό φυσιολογικές συνθήκες, ενώ η έξοδος θα διπλασιάζεται κατά τη διάρκεια ακραίων καιρικών φαινομένων. Θα έχει 50m μήκος και θα κοστίσει περίπου 70.000€ για να κατασκευαστεί σε εργοστάσιο. Κατά τη διάρκεια της συνηθισμένης λειτουργίας της, 24 ώρες τη μέρα, κάθε μέρα, θα παράγει ένα ενεργειακό ισοδύναμο δύο βαρελιών πετρελαίου τη μέρα. Οι μετατροπείς Waveberg™ τυπικά θα εγκαθίστανται διασυνδεδεμένοι σε σειρές για να παρέχουν τη συνολική ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται από τη συγκεκριμένη τοποθεσία εγκατάστασης. Σο κόστος των 700€ ανά kW του Waveberg™ από μόνο του δεν ανταποκρίνεται στο κόστος των εγκαταστάσεων στη στεριά, συμπεριλαμβανομένου του συστήματος σωληνώσεων μεταφοράς, της εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, του στροβίλου, της γεννήτριας και της διασύνδεσης στο δίκτυο διανομής.

Μια πρώτη οικονομική μελέτη επιβεβαιώνει ότι τα κόστη για την υδροηλεκτρική εγκατάσταση θα είναι λιγότερα από 270€ ανά kW για μια εγκατάσταση 1,2MW και ακόμα λιγότερα για μεγαλύτερες εγκαταστάσεις. Προσθέτοντας το κόστος ιδιοκτησίας και εγκατάστασης, το συνολικό κόστος κεφαλαίου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται σε 1.150€ ανά kW. Οι ανεμογεννήτριες κοστίζουν λίγο περισσότερο και λειτουργούν μόνο το 30% του χρόνου, ενώ ο συλλέκτης κυμάτων



Waveberg™ μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια κατά το 60% του χρόνου. Έτσι το προβλεπόμενο κόστος υπολογίζεται περίπου 0,014€ ανά kWh (το μισό από το αντίστοιχο για την αιολική ενέργεια), σε μια μέσου πλάτους ακτή.. Όσον αφορά τη μελλοντική εμπορική αξιοποίηση του Waveberg™, εκτιμάται ότι 50.000 μονάδες Waveberg™ θα μπορούν να προσφέρουν το 1% της συνολικής παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας των Ηνωμένων Πολιτειών (3.700 GWh), με εγκατεστημένο κόστος κάτω από 4.000.000.000€ και με ετήσιο εισόδημα 1.000.000.000€. Έτσι με βάση το συνολικό κόστος του συστήματος μαζί με τη συντήρηση, υπολογίζεται ότι τα ετήσια έσοδα επί του κεφαλαίου θα είναι περίπου 22% ετησίως.



Εικόνα 78: Πειραματικά μοντέλα μέσης και μικρής κλίμακας.

Οι κατάλληλες αρχικές αγορές για το Waveberg™ αφορούν κυρίως την εμπορική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την αφαλάτωση θαλασσινού νερού, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας και την τροφοδοσία υδατοκαλλιεργειών.

Η διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως υπεράκτια στην οποία ένα πλέγμα συσκευών θα βρίσκονται σε ανοιχτή θάλασσα συνδεδεμένες με ένα υποθαλάσσιο σύστημα σωληνώσεων που θα μεταφέρει το νερό υπό πίεση στην ακτή για μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια, χρησιμοποιώντας τυπικούς υδροηλεκτρικούς στρόβιλους και γεννήτριες.

Ένα έργο που σχεδιάστηκε και αφορά τη Χαβάη μετά από πρόταση της εταιρίας στη RenewableHawaii (που δέχεται προτάσεις ανανεώσιμης ενέργειας για να τις χρηματοδοτήσει) για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας ύψους 1,2MW χρησιμοποιώντας 12 συσκευές Waveberg™ που θα τροφοδοτούν ένα στρόβιλο Pelton και μια γεννήτρια στην ακτή. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε απομακρυσμένα νησιά και απομονωμένες περιοχές όπου οι συμβατικές πηγές ενέργειας είναι ακριβές, όπως για παράδειγμα το νησί των Βερμούδων. Εκεί ενώ τώρα η παραγωγή ύψους 170 MW βασίζεται εξολοκλήρου σε εισαγόμενο πετρέλαιο με τιμή πώλησης 0,16€/kWh, με την εγκατάσταση 1.700 συσκευών Waveberg™ (κόστους κάτω από 70.000.000€) η τιμή πώλησης θα μειωνόταν σε 0,07€/kWh με ετήσιο ποσοστό εσόδων επί της επένδυσης περισσότερο από 60%. Όσον αφορά την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού, το Waveberg™ θα μπορεί να παράγει γλυκό νερό μέσω της διαδικασίας της αντίστροφης όσμωσης.



Αναφορικά με τις δυνατότητες άρδευσης που παρέχει η συγκεκριμένη συσκευή μία μονάδα μήκους 46m, ρυθμισμένη στα κύματα των ακτών της Καλιφόρνιας, θα μπορούσε να εξασφαλίσει την άρδευση για 108 στρέμματα γης. Αυτή η εγκατάσταση μικρής κλίμακας θα αποφέρει έσοδα 22.000€ ετησίως σε τιμή που είναι η μισή από αυτή που πληρώνουν οι καταναλωτές τώρα. Η τεχνολογία που παρουσιάζεται είναι κατάλληλη και για ιχθυοκαλλιέργειες, στις οποίες το βασικότερο κόστος είναι η άντληση φρέσκου θαλασσινού νερού. Μια μονάδα των 100 kW μπορεί να τροφοδοτήσει 4 - 6 λίμνες ιχθυοκαλλιέργειας, αυξάνοντας τη παραγωγικότητα χωρίς δαπάνες καυσίμων. Για παράδειγμα στην Ινδονησία για τις ιχθυοκαλλιέργειες έκτασης 175.000 στρεμμάτων, χρειάζονται 500 συσκευές Waveberg™ για τη πλήρη κάλυψη των αναγκών τους.

Η βασική αντίρρηση για την είσοδο της συγκεκριμένης τεχνολογίας στην αγορά είναι ο γενικότερος σκεπτικισμός για την ικανότητα επιβίωσης αλλά και την απόδοση σε πραγματικές και δύσκολες συνθήκες λειτουργίας των συσκευών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας. Το πρόβλημα αυτό θα εξαλειφθεί μόλις κάποιες μονάδες Waveberg™ πλήρους κλίμακας δοκιμαστούν επιτυχώς σε καταιγίδες, λειτουργώντας και παράγοντας ισχύ αδιάλειπτα. Αλλά ακόμα και αν υποθέσουμε ότι οι καταιγίδες θα καταστρέφουν μια μονάδα Waveberg™ κάθε 5 χρόνια, η αποδοτικότητα του συνόλου δε θα μειωθεί σημαντικά. Η πλωτή συσκευή αποτελεί μόνο το 1/3 του συνολικού κόστους κεφαλαίου μιας εγκατάστασης και το κόστος των συσκευών θα μειώνεται καθώς θα αυξάνεται η παραγωγή τους. Κάθε Waveberg™ αρχίζει να παράγει κέρδος μετά από δύο χρόνια λειτουργίας, αφού θα έχει ξεπληρώσει το κόστος του με την αντίστοιχη παραγωγή.

Ανάμεσα στα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής είναι ότι η συσκευή υπερτερεί σε σύγκριση με το μεγαλύτερο ποσοστό των άλλων μετατροπέων κυματικής ενέργειας για κάποιους βασικούς λόγους.

Το Waveberg™, όπως και άλλες διατάξεις που περιγράφηκαν νωρίτερα, είναι σχεδιασμένο για να κινείται με τη ροή των κυμάτων, να γλιστράει πάνω τους, χωρίς να αντιστέκεται σε αυτά. Με αυτόν τον τρόπο καταφέρνει να επιβιώνει στις καταιγίδες αφού η συσκευή επιτρέπει σε πολύ μικρή επιφάνεια της να δεχτεί τις τεράστιες δυνάμεις των κυμάτων.

Όλα τα τμήματα της διάταξης από την αγκύστρωση του πυθμένα της θάλασσας μέχρι τη λεία επιφάνεια του είναι κατασκευάζονται από φάιμπεργκλας, που είναι ένα υλικό σχεδιασμένο για τη μείωση της αντίστασης απέναντι στα θαλάσσια κύματα. Η αντίσταση της συσκευής στη κατακόρυφη ταλάντωση των κυμάτων, που χρησιμοποιείται για τη κίνηση των αντλιών, μπορεί να απενεργοποιηθεί κατά τη διάρκεια καταιγίδας με το άνοιγμα μιας βαλβίδας στην ακτή που απελευθερώνει τη ροή του νερού.

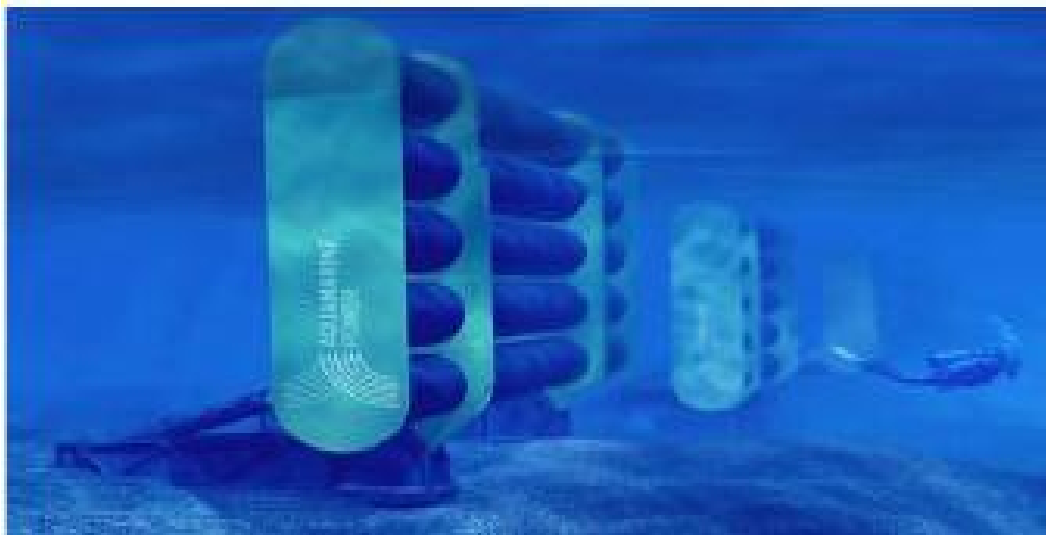
Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα είναι οι μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης της συσκευής. Δεν έχει αδιάβροχα σφραγισμένα τμήματα, ούτε ρουλεμάν ή αρθρώσεις με λιπαντικά. Το συμπιεσμένο θαλασσινό νερό χρησιμοποιείται και ως λιπαντικό για την αντλία. Μετά από 14 μήνες δοκιμών ανοιχτής θαλάσσης στη NovaScotia, μια τέτοια συσκευή αποσυναρμολογήθηκε και εξετάστηκε ως προς τις ενδεχόμενες φθορές. Κατά την εταιρία δεν υπήρξαν ανησυχητικά αποτελέσματα και φθορές στα επιμέρους τμήματα της αντλίας, αν και το μοντέλο είχε κατασκευαστεί από μαλακό πλαστικό PVC που συνήθως φθείρεται εύκολα. Επιπρόσθετα οι θαλάσσιοι οργανισμοί που αναπτύχθηκαν πάνω στη συσκευή βελτίωσαν την



απόδοση της, αυξάνοντας τη μάζα των πλωτών σωμάτων που παράγουν ενέργεια, αφού αυτή η παράμετρος είχε συμπεριληφθεί στον σχεδιασμό του μετατροπέα.

6.5 Σύστημα Oyster (Τεχνολογία οριζόντιας κίνησης).

Το Oyster είναι ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας, της σκωτσέζικης εταιρίας AquamarinePower, που εγκαθίσταται στον πυθμένα της θάλασσας σε κοντινή απόσταση από την ακτή. Για το λόγο αυτό αρχικά συγκεκριμένη τεχνική αναφέρεται ως παράκτια. Ο μετατροπέας έχει σχεδιαστεί ώστε να αλληλεπιδρά αποδοτικά με τις δυνάμεις των κυμάτων των ρηχών νερών. Αυτή η συσκευή έχει σχεδιαστεί ειδικά για εγκατάσταση σε νερά κοντά στην ακτή, καθώς τα ρηχά νερά έχουν ευκολότερη πρόσβαση και εκεί δεν εμφανίζονται τα επικίνδυνα μεγάλα κύματα.



Εικόνα 79: Σειρά εγκατεστημένων μονάδων Oyster πολλαπλών μετατροπέων.

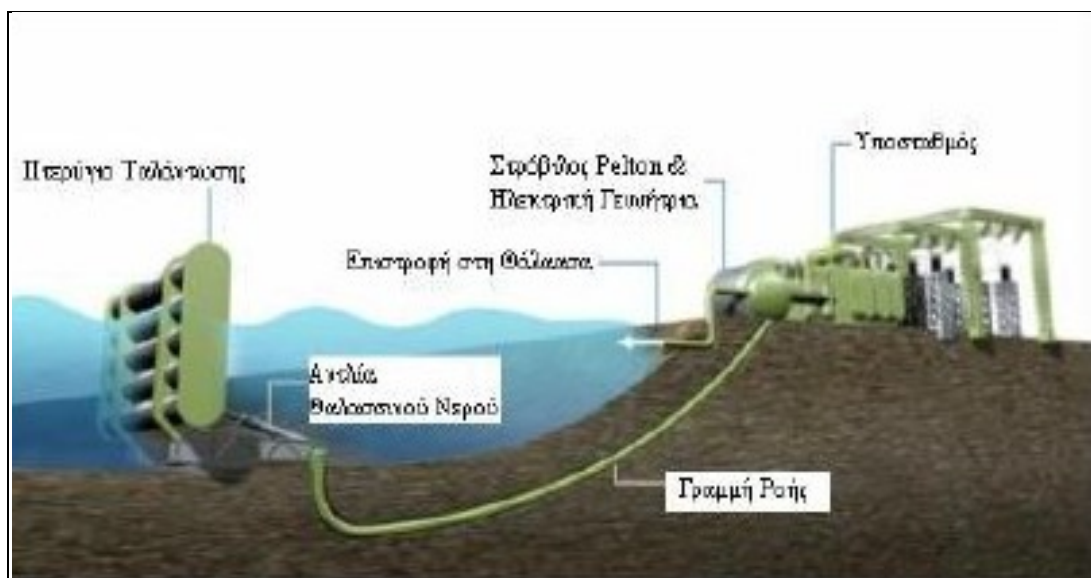
Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αιχμής της κάθε μονάδας Oyster είναι στο εύρος (300 – 600)kW ανάλογα με τη τοποθεσία εγκατάστασης και τη διαμόρφωση της. Μια «φάρμα κυμάτων» εμπορικής κλίμακας αποτελούμενη από 10 μονάδες Oyster™ εγκατεστημένες σε σειρές θα παράγει μέχρι και 6 MW ηλεκτρικής ενέργειας.

Η αρχή λειτουργίας του μετατροπέα Oyster™ είναι απλή. Η συσκευή αποτελείται από ένα είδος πτέρυγας ταλάντωσης εγκατεστημένο στον πυθμένα της θάλασσας σε βάθος 12m. Αυτή η συσκευή αποσπά την ενέργεια των διερχόμενων θαλάσσιων κυμάτων και τη διαβιβάζει ως υδραυλική ισχύ θαλασσινού νερού σε μία υδροηλεκτρική μονάδα μετατροπής στην ακτή. Αυτό επιτυγχάνεται με την κίνηση εμβόλων διπλής δράσης που τροφοδοτούν με συμπιεσμένο θαλασσινό νερό τη μονάδα (PowerTake-Off) του Oyster, όπως γίνεται και με τις συμβατικές υδροηλεκτρικές γεννήτριες. Η συγκεκριμένη διάταξη πολλαπλών πτερυγίων είναι σχεδιασμένη με κύρια έμφαση σε ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης. Για το λόγο αυτό αν και μπορεί να φαίνεται ογκώδης είναι ελαφριά κατασκευή αποτελούμενη από πολύ λίγα τμήματα.



Πιο αναλυτικά η διάταξη αποτελείται καταρχήν από μια μικρή βάση που σταθεροποιείται στο βυθό της θάλασσας και από το πτερύγιο ταλάντωσης με τις αντλίες εμβόλου. Το αποτύπωμά της στον βυθό είναι πολύ μικρό, ενώ η μεγάλη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της εξόδου της σε σχέση με το μέγεθος της, την καθιστά οικονομικά αποδοτική. Η διάταξη θεωρείται κατάλληλη και για ανοικτή θάλασσα όπου θα ταλαντώνεται κοντά στον πυθμένα μακριά από τα μεγάλα κύματα, επιτρέποντας έτσι την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αδιάλειπτα ακόμα και σε ακραίες καιρικές συνθήκες. Η συσκευή αλληλεπιδρά απευθείας με την ενισχυμένη ορμητική κίνηση των κυμάτων κοντά στην ακτή, παράγοντας αποδοτικά ηλεκτρική ενέργεια ακόμα και στις μικρότερες και ηπιότερες θάλασσες.

Ως προς το βάθος εγκατάστασης, τα μοντέλα Oyster™ έχουν σχεδιαστεί για βάθη περίπου 10m σε θαλάσσιες περιοχές όπου το μέσο κυματικό κλίμα είναι μεγαλύτερο από 15kW/m. Επίσης για την ορθή επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης των συσκευών θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν παράγοντες όπως η προέλευση των θαλασσίων κυμάτων, οι γεωτεχνικές συνθήκες, η σύνδεση με το δίκτυο. Για αυτό τον λόγο η εταιρία ερευνά διάφορες περιοχές για να διαπιστώσει την καταλληλότητα τους για μια μελλοντική εγκατάσταση μιας τέτοιας διάταξης. Όπως και άλλες τεχνολογίες που περιγράφηκαν η συγκεκριμένη τεχνολογία αναπτύσσεται και για δευτερεύουσες εφαρμογές όπως για παράδειγμα την παράλληλη παραγωγή ηλεκτρισμού και γλυκού νερού για μια απομακρυσμένη νησιωτική κοινότητα. Η τεχνολογία αυτή είναι κατάλληλη και για αφαλάτωση θαλασσινού νερού με τη διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης. Οι συσκευές θα μπορούν να τροφοδοτούν μια μονάδα αντίστροφης όσμωσης, τόσο με θαλασσινό νερό όσο και με την αναγκαία ηλεκτρική ενέργεια, καθιστώντας ουσιαστικά ανεξάρτητη τη μονάδα από εισαγόμενα καύσιμα και μειώνοντας τους εκπεμπόμενους ρύπους.



Εικόνα 80: Σχηματική αναπαράσταση διάταξης Oyster.

Η συσκευή έχει σχεδιαστεί από υλικά και επιμέρους τμήματα που έχουν αποδειχθεί υψηλή αξιοπιστία τόσο για την υδροηλεκτρική μονάδα όσο και για την υποθαλάσσια εγκατάσταση. Η φυσική κίνηση και η λειτουργία του σε κοντινή



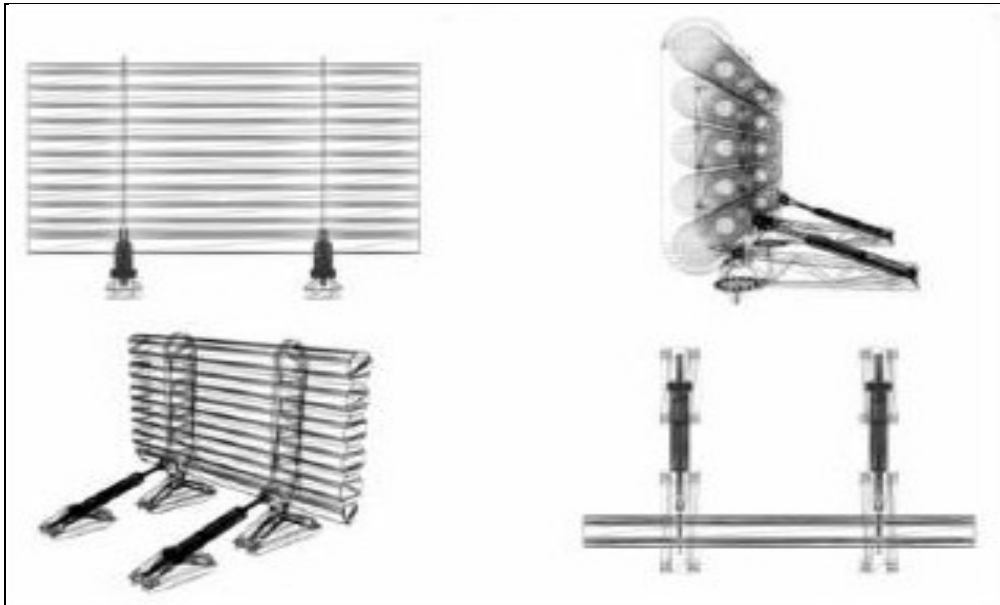
απόσταση από την ακτή, του επιτρέπουν να αποφεύγει τα μεγάλα κυματικά φορτία που εμφανίζονται σε άλλους μετατροπείς κατά τη διάρκεια καταιγίδων. Ο σχεδιασμός του έχει υποβληθεί σε αυστηρές δοκιμές από ανεξάρτητους εξειδικευμένους φορείς για την επαλήθευση της αποδοτικότητας της τεχνολογίας σε όλες τις συνθήκες, ενώ η διάρκεια ζωής της συσκευής εκτιμάται περίπου στα 25 χρόνια.

Αναφορικά με τη συνθήκη λειτουργίας το Oyster αντλεί θαλασσίνο νερό υπό υψηλή πίεση απευθείας σε μια υδροηλεκτρική μονάδα ισχύος, μειώνοντας ουσιαστικά το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Η ελαφριά συσκευή ταλάντωσης είναι σχεδιασμένη για μαζική παραγωγή, ελαχιστοποιώντας το κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας. Το σύστημα έχει μια από τις καλύτερες αναλογίες ισχύος προς βάρος από όλες τις εναλλακτικές τεχνολογίες, μπορεί να εγκατασταθεί και να αποσυρθεί μέσα σε 24 ώρες. Η απλότητα του σχεδιασμού και η προσβασιμότητα της τοποθεσίας του, καθιστούν τη συντήρηση της συσκευής απλή και οικονομική.

Πάντοτε όμως ανακύπτουν θέματα συζήτησης αναφορικά με τις οικολογικές επιπτώσεις στο βυθό της θάλασσας και την επίδραση που έχουν τέτοιες ογκώδεις κατασκευές στο οικοσύστημα του βυθού της θάλασσα. Ως προς το θέμα αυτό μια μονάδα διαστάσεων 18m x 12m x 2m για ένα μετατροπέα Oyster πλήρους κλίμακας, η συσκευή καταλαμβάνει σχετικά μικρή έκταση στον πυθμένα της θάλασσας. Η λειτουργία του είναι αθόρυβη και δε περιέχει τοξικές ουσίες, ενώ επίσης δεν παρουσιάζει εκπομπές CO₂.

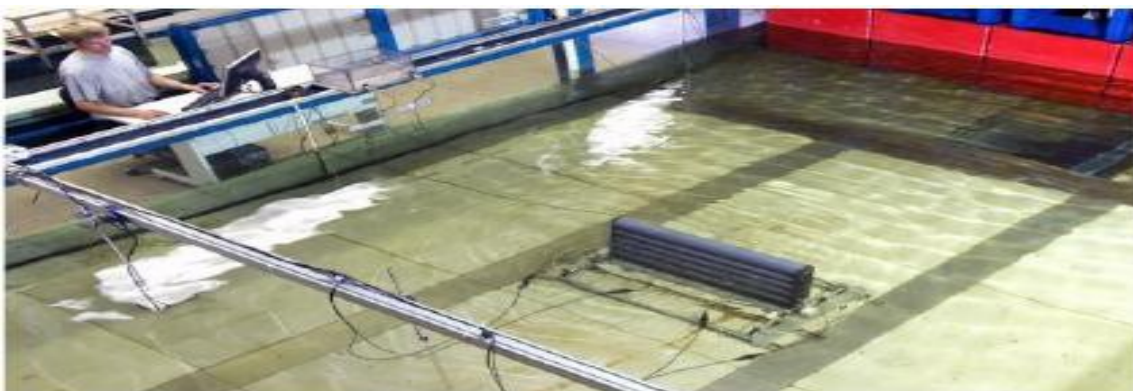
Το κυματικό κλίμα κοντά στις ακτές συνήθως είναι πιο σταθερό και προβλέψιμο σε σχέση με εκείνο της ανοικτής θάλασσας, καθώς το μειωμένο βάθος των υδάτων φιλτράρει τις πιο ενεργητικές θάλασσες και μειώνει τη διάδοση των θαλάσσιων κυμάτων προς τη κατεύθυνση τους.

Το Oyster έχει σχεδιαστεί για να μεγιστοποιεί το ποσό της ενέργειας που συλλαμβάνει για τη θάλασσα της συγκεκριμένης επιλεγμένης τοποθεσίας εγκατάστασης. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από αξιόπιστα και αποδεδειγμένα επιμέρους τμήματα. Ο έλεγχος της εγκατάστασης από απόσταση εξασφαλίζει διαρκώς τη μέγιστη απόδοση που μπορεί να επιτευχθεί. Αυτό βελτιώνει την απόδοση του συστήματος και επιτρέπει στη διάταξη να συλλαμβάνει ένα μεγάλο ποσοστό της μέσης ετήσιας ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων. Η συσκευή όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα είναι σχεδιασμένη και κατασκευασμένη ώστε να διατηρεί αδιάλειπτα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε σχεδόν όλες τις κυματικές συνθήκες. Αυτό είναι και ένα από τα σπουδαιότερα πλεονεκτήματα που διαθέτει έναντι άλλων τεχνολογιών.



Εικόνα 81: Όψεις των ταλαντούμενων πτερυγίων με ενσωματωμένες αντλίες.

Μέχρι το μοντέλο που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία η εταιρία είχε ένα σπουδαίο παρελθόν στην έρευνα και ανάπτυξη. Έτσι για παράδειγμα στα πρώτα χρόνια της δεκαετίας του 2000 διενεργήθηκαν δοκιμές σε δεξαμενή κυματισμών στο Queen's University Belfast, χρησιμοποιώντας μοντέλα ταλαντωτών κλίμακας 1:40 και 1:20. Η υπολογιστική μοντελοποίηση και απόδοση, καθώς και τα αποτελέσματα από δοκιμές φορτίων, χρησιμοποιήθηκαν για τον βασικό σχεδιασμό και τα φορτία λειτουργίας της πειραματικής εγκατάστασης. Αργότερα το 2007 πραγματοποιήθηκαν δοκιμές δεξαμενής, υπολογισμοί κόστους, έρευνα και ανάπτυξη για τη μοντελοποίηση και επαλήθευση των προβλέψεων απόδοσης μιας συστοιχίας τέτοιων συσκευών. Τα αποτελέσματα αυτά οδήγησαν στον τελικό σχεδιασμό και διαμόρφωση της τεχνολογίας Oyster™ για «φάρμες κυμάτων» εμπορικής κλίμακας. Με την κατασκευή συστοιχίας συσκευών δοκιμάστηκε η λειτουργία στη Σκωτία σε μια μονάδα εγκατεστημένης ισχύος πάνω από 3 MW, ως το πρώτο βήμα για περαιτέρω εμπορική εφαρμογή στην Ευρώπη. Στο αναμένεται ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία θα οδηγήσει στην εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας από τις λεγόμενες «φάρμες κυμάτων» ισχύος από 5 έως 20 MW με συντελεστή φορτίου πάνω από 40%.



Εικόνα 82: Δοκιμή μοντέλου Oyster εργαστηριακής κλίμακας σε δεξαμενή κυματισμών.



6.6 Σύστημα WaveRoller.

Στα επιφανειακά κύματα, τα μόρια του νερού κινούνται κυκλικά. Ερχόμενη προς την ακτή, η ενέργεια των κυμάτων πυκνώνει λόγω της μείωσης του βάθους. Κάτω από το επιφανειακό φούσκωμα του κύματος, σε βάθος μισού μήκους του φουσκώματος, η κυκλική κίνηση των μορίων του νερού γίνεται πιο ελλειπτική, ενώ στον βυθό της θάλασσας τα μόρια του νερού λικνίζονται μπρος-πίσω. Το WaveRoller της φινλανδικής εταιρίας AW-Energy συλλαμβάνει αυτή τη κινητική ενέργεια χρησιμοποιώντας ένα ειδικά σχεδιασμένο κινούμενο πτερύγιο, εγκατεστημένο στον πυθμένα της θάλασσας. Αυτή η ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό με τη χρήση παραδοσιακών τεχνολογιών.

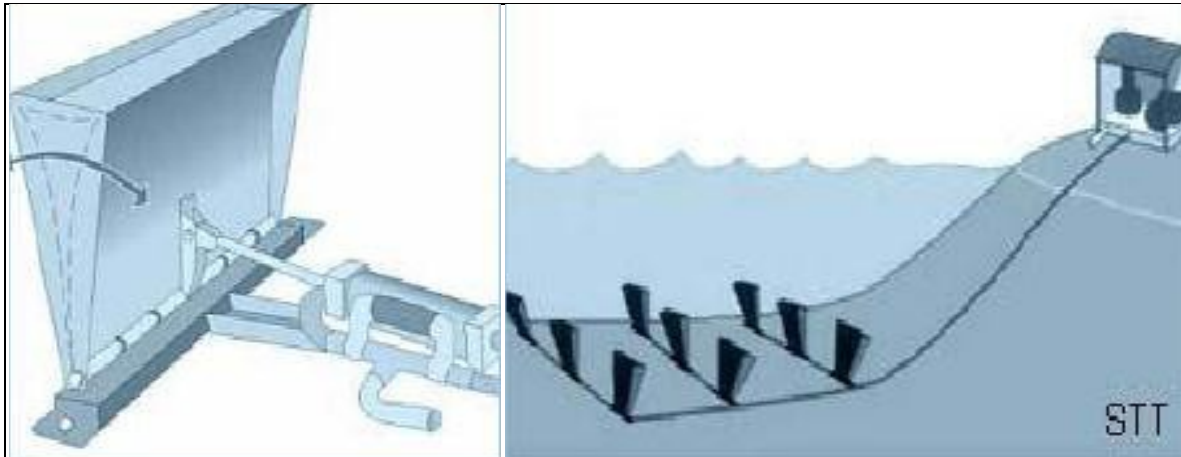


Εικόνα 83: Μονάδα WaveRoller τοποθετημένο στον πυθμένα.

Στην Εικ.44 δίνεται μια μονάδα WaveRoller με τα βασικά τμήματα που την αποτελούν δηλ. το πτερύγιο, την αντλία και τη βάση εγκατάστασης.

Η κίνηση των κυμάτων στο βυθό δίνουν κίνηση στο πτερύγιο της συγκεκριμένης διάταξης και η κινητική ενέργεια που παράγεται μεταφέρεται στην αντλία – έμβολο. Στη συνέχεια η ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω υδραυλικού συστήματος και μεταφέρεται σε μια γεννήτρια. Η διάταξη μπορεί να τοποθετηθεί και σε συστοιχίες για μεγαλύτερη απόδοση με κάθε συστοιχία να αποτελείται από 3-5 συσκευές – πτερύγια τα οποία έχουν το ίδιο τελικό σημείο ως κοινό σύστημα παραγωγής (Εικ.45).

Με τον τρόπο αυτό η εγκατάσταση μπορεί να γίνει και τμηματικά και να ελέγχεται κάθε φορά η απόδοση μετατροπής ενέργειας και βαθμιαία να προστίθενται περισσότερες όμοιες συσκευές. Αυτό αποτελεί και πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής αφού δεν υπάρχει περιορισμός στο μέγεθος της εγκατάστασης. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα τμηματικής συντήρησης της όλης εγκατάστασης αφού ένα πτερύγιο μπορεί να τεθεί εκτός λειτουργίας ενώ θα συνεχίζεται η λειτουργία των υπολοίπων συσκευών.



Εικόνα 84: Ο μηχανισμός μετάδοσης και ένα πάρκο πανομοιότυπων διατάξεων σε συστοιχίες.

Ο σχεδιασμός του WaveRoller είναι κατάλληλος για λειτουργία σε ένα ευρύ φάσμα κυματικών συνθηκών σε σύγκριση με άλλες υπάρχουσες τεχνολογίες ενέργειας κυμάτων. Αυτό σημαίνει ότι η λειτουργία της διάταξης δεν εξαρτάται ιδιαίτερα από την τοποθεσία εγκατάστασης αφού μπορεί να διαχειριστεί ευρεία γκάμα κυματικών χαρακτηριστικών (π.χ μεγάλες περιόδοι κύματος). Επίσης η ισχύς της συλλεγόμενης κυματικής ενέργειας μπορεί να διατηρείται σχετικά σταθερή με μικρότερες διακυμάνσεις από άλλες διατάξεις με περιορισμό της κίνησης των πτερυγίων εντός συγκεκριμένων ορίων. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να εξασφαλίζεται και σχετικά σταθερή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Ως προς την επίδραση στο υδάτινο περιβάλλον και το οικοσύστημα το WaveRoller χαρακτηρίζεται ως φιλικό αφού:

- Ολόκληρη η εγκατάσταση είναι τοποθετημένη κάτω από την επιφάνεια του νερού και για αυτό δεν είναι ορατή έξω από τη θάλασσα. Το τυπικό βάθος εγκατάστασης είναι περίπου 7 με 15 m, κάτι το οποίο σημαίνει ότι μπορούν για παράδειγμα να περάσουν από πάνω του αλιευτικά σκάφη χωρίς πιθανότητα σύγκρουσης ή αγκύρωσης πάνω σε τμήματα της διάταξης.
- Τα πτερύγια του WaveRoller ακολουθούν τη φυσική κίνηση των κυμάτων.
- Η εγκατάσταση δεν παράγει κανένα θόρυβο ως προς την επιφάνεια της θάλασσας ή την ακτή.
- Το WaveRoller έχει σχεδιαστεί χρησιμοποιώντας υλικά φιλικά προς το περιβάλλον και δεν περιέχει επικίνδυνες ρυπογόνες ουσίες.

Αναφορικά με οικονομικά δεδομένα η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι σχεδιασμένη για υψηλή απόδοση. Ένα πτερύγιο WaveRoller παράγει περίπου 13 kW ηλεκτρικής ενέργειας σε καλές κυματικές συνθήκες. Με βάση αυτή την απόδοση, εκτιμάται ότι το κόστος επένδυσης είναι περίπου 3.000 € ανά kW στο πειραματικό στάδιο. Ο στόχος για την εμπορική φάση του WaveRoller είναι ένα επενδυτικό κόστος μεταξύ 800 με 1300 € ανά kW και κόστος παραγωγής ενέργειας μεταξύ 0,03 με 0,05€ ανά kWh. Η εταιρία δραστηριοποιείται από το 1999 σε υλοποίηση και δοκιμές μοντέλων με τη συγκεκριμένη τεχνική μετατροπής κυματικής σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι δοκιμές έχουν γίνει σε πραγματικές συνθήκες στην περιοχή Porkkala της Φινλανδίας, ενώ έχουν γίνει και αρκετές δοκιμές πρωτοτύπων σε εργαστηριακή



κλίμακα. Έχουν γίνει δοκιμές ακόμα πρωτοτύπου στον κόλπο RodaGrundet για την επιβεβαίωση της απόδοσης συλλογής της ενέργειας. Αργότερα το 2004 ένα μοντέλο αξιολογήθηκε σε δεξαμενή κυματισμών στο Laboratory of WaterResources στο Helsinki University of Technology για τη μελέτη της υδροδυναμικής και τον λεπτομερή σχεδιασμό των πτερυγίων.



Εικόνα 85: Διαδικασία κατασκευής και δοκιμών στο εργαστήριο (LabofWaterResHelsinkiUniversityofTechnology).



Εικόνα 86: Δοκιμές σε δεξαμενή και δοκιμές μετρήσεων Doppler (LabofWaterResHelsinkiUniversityofTechnology).



Εικόνα 87: Δοκιμές πρωτότυπου κλίμακας 1:3 στον Ειρηνικό Ωκεανό (2004) .



Εικόνα 88: Δοκιμή στον Ατλαντικό Ωκεανό (Okney 2005).



Εικόνα 89: Σχεδιασμός και κατασκευή διάταξης WaveRoller (2006).

6.7 Σύστημα WaveStar (Δανία).

Το WaveStar είναι ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας που ανήκει στην κατηγορία των σημειακών απορροφητών και μπορεί να χαρακτηριστεί και ως τεχνολογία ακτογραμμής αν και μπορεί επίσης να τοποθετηθεί και υπεράκτια για μεγαλύτερες αποδόσεις. Ως σημειακός απορροφητής λειτουργεί με βάση την τεχνική κατακόρυφης ταλάντωσης. Διαθέτει τη δυνατότητα εκμετάλλευσης της ενέργειας ολόκληρου του μήκους κύματος. Αποτελείται από μια στενόμακρη πλατφόρμα στην κάθε πλευρά της οποίας υπάρχουν εγκατεστημένες 20 ημισφαιρικές σημαδούρες που έχουν ένα μέρος τους βυθισμένο στην θάλασσα. Κάθε σημαδούρα είναι συνδεδεμένη με έναν υδραυλικό κύλινδρο.

Με το πέρασμα των κυμάτων οι σημαδούρες ανυψώνονται διαδοχικά και θα σταλθεί υδραυλικό υγρό υπό πίεση στο σύστημα μετάδοσης. Με τον τρόπο αυτό τίθεται σε κίνηση ένας υδραυλικός κινητήρας συνδεδεμένος με μια ηλεκτρογεννήτρια για τη μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια. Το κάθε πλωτό σώμα είναι τοποθετημένο στη βάση του δικού του υδραυλικού κυλίνδρου. Όταν ένα πλωτό ανυψώνεται, ένα πιστόνι στο κύλινδρο πρεσάρει λάδι μέσα στο κοινό σύστημα μετάδοσης της μηχανής με



πίεση μέχρι και 200 bar. Η πίεση αυτή θέτει σε κίνηση έναν υδραυλικό κινητήρα που είναι συνδεδεμένος με μία γεννήτρια που παράγει ηλεκτρισμό. Λόγω του ότι η διάταξη έχει μήκος όσο αρκετά μήκη κύματος, η διπλή συστοιχία των πλωτών τμημάτων (σημαδούρες) θα συλλέγει συνεχόμενα ενέργεια. Τα πιο σημαντικά τμήματα της συσκευής στεγάζονται στο περίβλημα της γεννήτριας πάνω στη πλατφόρμα. Η γεννήτρια, το σύστημα μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας στεγάζονται σε χώρους πάνω στην πλατφόρμα προστατευμένα από το αλάτι της θάλασσας, μειώνοντας όσο το δυνατόν αποτελέσματα της διάβρωσης. Η όλη συστοιχία στηρίζεται σε βυθισμένους πυλώνες.

Η διάταξη μπορεί να παράγει ηλεκτρισμό από συνολικά 40 ανεξάρτητα πλωτά σώματα. Στην περίπτωση αστοχίας ενός ή περισσοτέρων η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να συνεχίζεται έστω και μειωμένη. Ακόμα και στην περίπτωση που το 75% των πλωτών σωμάτων τεθεί εκτός λειτουργίας, η ηλεκτροπαραγωγή μπορεί να συνεχίζεται. Έχει σχεδιαστεί για διάρκεια ζωής περίπου 50 χρόνια, ενώ υπολογίζεται μία γενική επιθεώρηση από την εταιρία περίπου κάθε 10 χρόνια, κατά την οποία η μηχανή θα ρυμουλκείται στη στεριά ώστε να αποφευχθούν δαπανηρές εργασίες στη θάλασσα. Η διάταξη δεν έχει αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον.



Εικόνα 90: Εγκατάσταση διάταξης WaveStar.

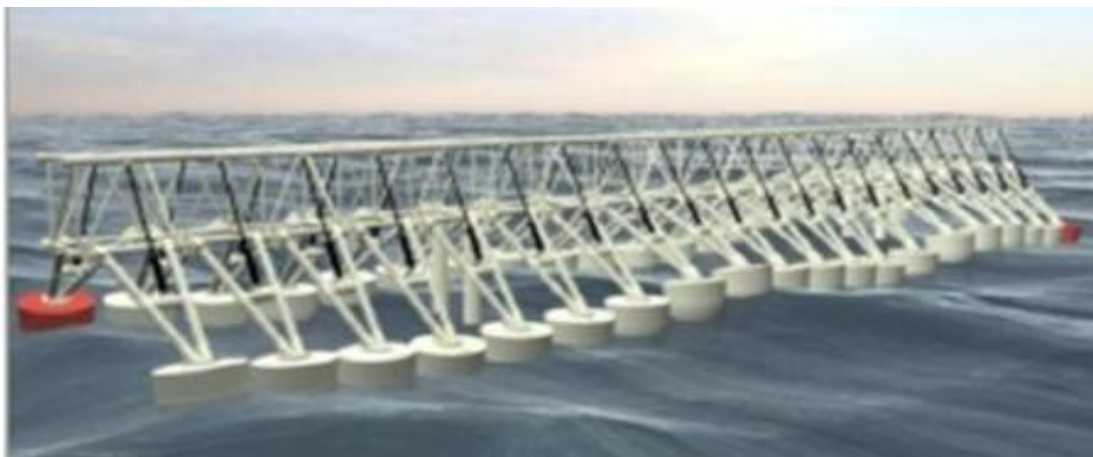


Εικόνα 91: Τοποθετημένη σε λειτουργία μονάδα WaveStar .



Η συγκεκριμένη διάταξη – συστοιχία διαθέτει πλεονεκτήματα όπως:

- Προστατεύεται από ακραία καιρικά φαινόμενα όταν τα κύματα ξεπεράσουν ένα ορισμένο ύψος. Σε τέτοιες καταστάσεις με τη βοήθεια αυτοματισμών όλα τα πλωτά σώματα ανυψώνονται έξω από τη θάλασσα. Για παράδειγμα και επειδή η διάταξη μπορεί να λειτουργεί και σε απομακρυσμένες θάλασσες (υπεράκτια) η εταιρία θέτει όριο το ύψος κυμάτων στα 8m. Σε κυματισμούς τέτοιου ύψους, τα πλωτά τμήματα ανυψώνονται σε μία ασφαλή θέση 20m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.
- Πρόκειται για σχετικά ελαφριά κατασκευή. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό από οικονομικής άποψης αφού όσο βαρύτερο είναι μία τέτοια μηχανή τόσο ακριβότερη είναι, ιδίως όσον αφορά την υλοποίηση ενός σχεδίου μεγάλης κλίμακας. Έχει υπολογιστεί μία τιμή παραγωγής ανά μεγαβάτ αντίστοιχη με αυτή των ανεμογεννητριών.
- Το μεγαλύτερο τμήμα της διάταξης βρίσκεται πάνω από τη στάθμη της θάλασσας. Επειδή η μηχανή στηρίζεται εξ' ολοκλήρου έξω από το νερό πάνω σε σιδερένιες κολώνες, εκτός μόνο από τα πλωτά σώματα, δεν χρειάζεται να κατασκευαστεί από ακριβά αδιάβροχα υλικά ειδικά για υποβρύχια χρήση. Αυτού του είδους τα υλικά έχουν επίσης και πολύ υψηλό κόστος συντήρησης.



Εικόνα 92: Συστοιχία διάταξης WaveStar σε λειτουργία.



Εικόνα 93: Σύστημα WaveStar σε θέση ασφαλείας.



Το 2004 ξεκίνησαν οι δοκιμές μοντέλου κλίμακας 1:40 σε δεξαμενή. Το 2005 κατασκευάστηκε μοντέλο κλίμακας 1:10 με 40 ημισφαιρικές σηματοδούρες διαμέτρου 1m. Η εγκατεστημένη ηλεκτρογεννήτρια είχε ονομαστική ισχύ 5.5 kW. Από την εγκατάσταση του μοντέλου τον Απρίλιο του 2006 έχουν καταγραφεί περισσότερες από 15000 ώρες λειτουργίας. Τον Φεβρουάριο του 2010 έγινε σύνδεση του WaveStar με το εγκατεστημένο δίκτυο της περιοχής. Στα άμεσα σχέδια της ιδιοκτήτριας εταιρείας είναι η κατασκευή και εγκατάσταση στην Βόρεια θάλασσα ενός μοντέλου μεγάλης κλίμακας για βάθος 20 μέτρων. Οι ημισφαιρικές σηματοδούρες θα έχουν διάμετρο 10m και η ηλεκτρογεννήτρια ονομαστική ισχύ 3MW.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η διάταξη μπορεί να παράγει ηλεκτρισμό ακόμα και από πολύ μικρά κύματα. Αυτό το μοντέλο χρειάζεται κύματα με ελάχιστο ύψος μόνο 10 εκατοστών. Κατά αυτή την έννοια θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και ως τεχνολογία ακτογραμμής ή παράκτια.

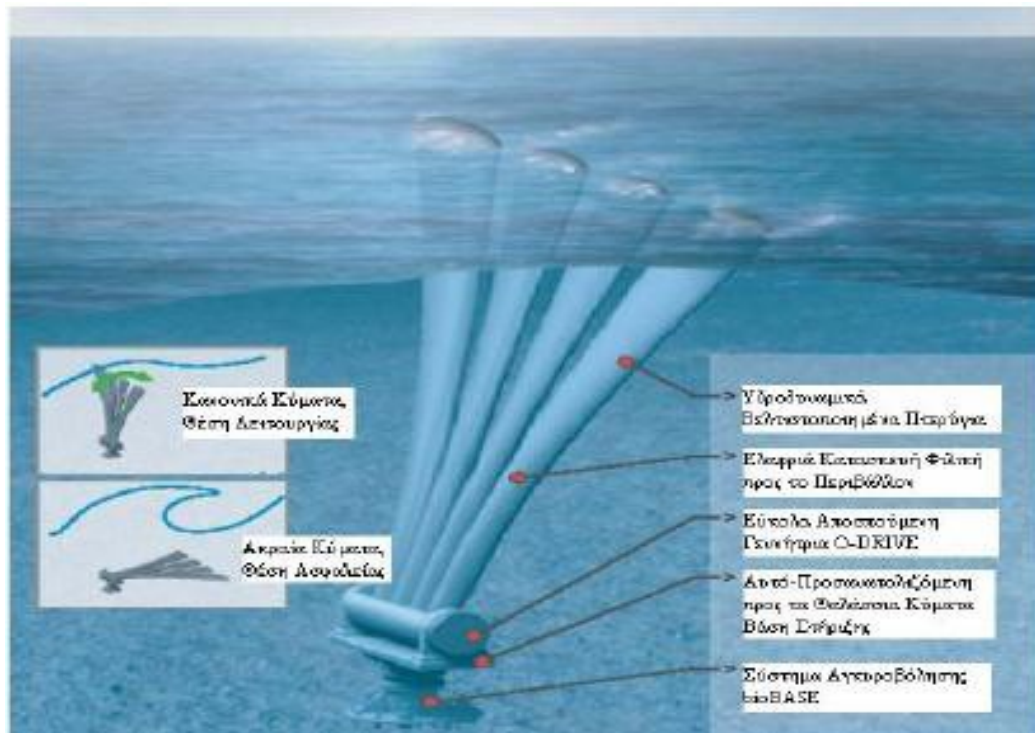
Κατά τις δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες προέκυψε ότι η μηχανή κυμάτων παράγει ενέργεια στο 90% του χρόνου και ότι λειτουργεί με μέγιστη ισχύ το 30% του χρόνου. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει δοκιμαστεί για περισσότερες από 4.000 ώρες στους πρώτους έξι μήνες καθημερινής λειτουργίας ξεπερνώντας έντονες καταιγίδες.

Γενικά εκτιμάται ότι αν διπλασιαστεί το μέγεθος του WaveStar®, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα αυξηθεί 11 φορές περίπου, ενώ όσο μεγαλύτερο είναι τόσο μεγαλύτερα κύματα μπορεί να αντέξει και σε τόσο

Για να γίνει ανταγωνιστική η διάταξη σε σύγκριση με τις ανεμογεννήτριες, στο άμεσο μέλλον θα πρέπει να μειωθεί το κόστος ανά κιλοβατώρα 4 φορές. Αντίστοιχα στο ξεκίνημα της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών για να γίνει οικονομικά πρόσφορη λύση έπρεπε να μειώσει τις τιμές ανά κιλοβατώρα 7 φορές για να φτάσει στο επίπεδο τιμών που βρίσκεται σήμερα.

6.8 Σύστημα BioWave.

Το bioWAVE™ της αυστραλιανής εταιρίας BioPowerSystemsPtyLtd αποτελεί μια ακόμα τεχνολογία εκμετάλλευσης της παλλόμενης κίνησης των κυμάτων. Είναι εμπνευσμένη από τη μορφή των θαλασσίων φυτών των ωκεανών και έχουν προσαρμοστεί κατάλληλα στις συνθήκες που επικρατούν εκεί υπό την επίδραση κυμάτων στον ωκεανό. Η συσκευή αντί να αντιστέκεται στις δυνάμεις του ωκεανού, κινείται μαζί με αυτές μετατρέποντας ενέργεια συνεχώς, χωρίς να χρειάζεται κάποια βαριά και ακριβή μηχανική κατασκευή.



Εικόνα 94: Βασικά μέρη της συσκευής - θέσεις λειτουργίας ασφαλείας.

Τα βασικά τμήματα που συναποτελούν τη διάταξη biowave είναι το σύστημα αγκυροβόλησης, η αυτοπροσανατολιζόμενη βάση στήριξης που κινείται ανάλογα με τη διεύθυνση των κυμάτων, η γεννήτρια που βρίσκεται πάνω στον άξονα, καμπυλωμένες ράβδοι από φιλικό και ελαφρύ υλικό που καταλήγουν σε πτερυγία στην επιφάνεια της θάλασσας.

Η υδροδυναμική αλληλεπίδραση των πτερυγίων με το πεδίο ροής της κυματικής ταλάντωσης έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να απορροφά τη μέγιστη ενέργεια. Αυτό το σύστημα έχει πολλά πλεονεκτήματα. Για παράδειγμα, είναι το μόνο σύστημα κυματικής ενέργειας που συλλαμβάνει ένα μεγάλο ποσοστό της προσπίπτουσας κυματικής ενέργειας, χωρίς να χρησιμοποιεί μια μεγάλη άκαμπτη κατασκευή. Είναι επίσης η μόνη συσκευή τέτοιου είδους που απορροφά τη κυματική ενέργεια σε ένα μεγάλο εύρος, από τη βάση της στον πυθμένα ως και την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ συνεχώς προσανατολίζεται αυτόματα προς την κατεύθυνση των κυμάτων.

Το συγκεκριμένο σύστημα μετατρέπει την ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων σε μηχανική ενέργεια μέσω της ταλάντωσης γύρω από έναν άξονα. Για τη μετατροπή αυτών των ταλαντώσεων χαμηλής ταχύτητας και μεγάλης ροπής σε ισχύ AC, αναπτύχθηκε μια ειδική ηλεκτρική γεννήτρια (O-DRIVE). Αυτή είναι αρθρωτή και μπορεί εύκολα να αποσυνδεθεί και να επανασυνδεθεί κατά τη συντήρηση, συνδυάζει ένα απλό παλινδρομικό μηχανισμό με μια σύγχρονη γεννήτρια μόνιμων μαγνητών και ένα τροχό υψηλής αδράνειας, με αποτέλεσμα την αδιάλειπτη παραγωγή εξομαλυσμένης AC ισχύος.

Σε ακραίες καιρικές συνθήκες, συμπεριλαμβανομένου και τυφώνων, η διάταξη μπορεί να λαμβάνει εντολή αυτόματα για την παύση της λειτουργίας της, και την οριζόντιωση σε ασφαλή θέση παράλληλα με τον πυθμένα της θάλασσας. Έτσι αποκλείεται η επικίνδυνη έκθεση σε ακραίες δυνάμεις και καιρικές συνθήκες.



Διάφορα μοντέλα βρίσκονται υπό ανάπτυξη, με απόδοση 500kW, 1000kW 2000 kW, ανάλογα με τις επικρατούσες κυματικές συνθήκες των τοποθεσιών εγκατάστασης.

Η συσκευή bioWAVE™ παρουσιάζει τα παρακάτω βασικά πλεονεκτήματα

- Λίγα κινούμενα μέρη,
- Χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης,
- Αυτόνομη λειτουργία χωρίς απαιτήσεις πληρώματος,
- Χαμηλές απαιτήσεις ασφάλισης και συντήρησης,
- Δυνατότητα θέσης ασφάλειας για την αποφυγή μεγάλων φορτίων.

Επίσης η συγκεκριμένη διάταξη είναι φιλική προς το περιβάλλον αφού:

- Είναι οπτικά αόρατη, μικρός χώρος κατάληψης βυθού,
- Αργές φυσικές κινήσεις αθόρυβη λειτουργία ως προς το οικοσύστημα,
- Μηδενική εκπομπή ρυπογόνων ουσιών στο θαλάσσιο περιβάλλον.

Τέλος ως προς την απόδοση η συγκεκριμένη συσκευή

- εξασφαλίζει υψηλά επίπεδα ισχύος λόγω του συνεχούς προσανατολισμού και ευθυγράμμισης με τη διεύθυνση διάδοσης των κυμάτων,
- διαθέτει μεγάλο εύρος ταλάντωσης των πτερυγίων (μέχρι 2MW ανά μονάδα),
- απευθείας μετατροπή ισχύος στο βυθό.

6.9 Σύστημα Power Buoy (ΗΠΑ).

Η συγκεκριμένη διάταξη ανήκει στην κατηγορία των σημειακών απορροφητών. Κατασκευάζεται από την εταιρία *OceanPower Technologies*. Αρχικά η εταιρία κατασκεύαζε συσκευές σχετικά χαμηλής ισχύος της τάξης των 40kW. Τα τελευταία χρόνια η εταιρία έχει προχωρήσει στην κατασκευή συσκευών μεγαλύτερης ισχύος. Μέχρι το 2012 είχε κατασκευάσει το PB150, μια διασυνδεδεμένη συσκευή με ονομαστική ισχύ 150 kW ενώ σε προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης βρίσκεται και η συσκευή που ονομάζεται PowerTower ή Mark-4, ονομαστικής ισχύος 500 kW.

Οι συσκευές αυτές στην πραγματικότητα λειτουργούν ως πλωτές σημαδούρες αγκυροβολημένες στον πυθμένα που κινούνται υπό την επίδραση των κυμάτων. Αποτελούνται από ένα πλωτό μέρος, έναν στύλο και μια πλάκα. Το πλωτό μέρος ανεβοκατεβαίνει ανάλογα με την ισχύ των κυμάτων. Η σχετική κίνηση ανάμεσα στην πλωτή σημαδούρα και το στύλο ο οποίος παραμένει σταθερός λόγω των δυνάμεων που του ασκεί η ανυψωτική πλάκα, οδηγεί ένα μηχανικό σύστημα που είναι εγκατεστημένο στο στύλο. Το σύστημα εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια που του προσδίδεται από την προσβολή των κυμάτων και τη μετατρέπει σε μηχανική εκ περιστροφής αρχικά. Στη συνέχεια γίνεται η μετατροπή σε ηλεκτρική μέσω της οδήγησης μιας ηλεκτρογεννήτριας. Στο στύλο προβλέπεται χώρος για μπαταρίες ώστε να επιτυγχάνεται παροχή ισχύος από τις συσκευές PowerBuoy ακόμα και σε παρατεταμένες περιόδους απουσίας κυματισμού.

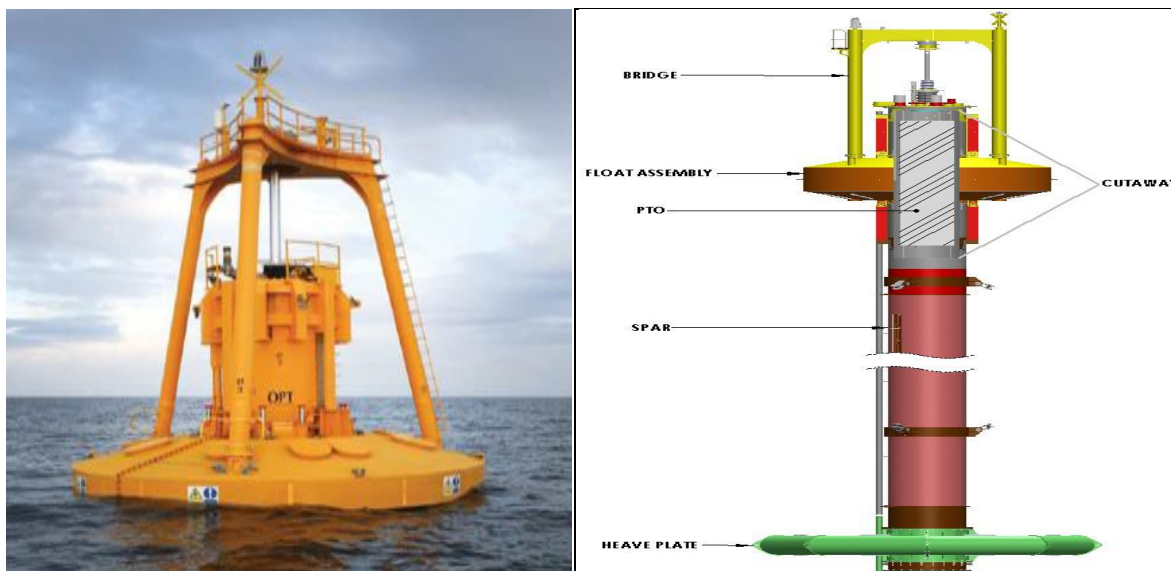
Στις συσκευές αυτής της τεχνολογίας το μέγεθος του πλωτού μέρους διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην κίνηση τους. Η ανυψωτική κίνηση του μετατροπέα μπορεί να περιοριστεί σημαντικά αν το μήκος το πλωτού τμήματος ξεπεράσει το ένα πέμπτο του μήκους των κυμάτων με τα οποία αλληλεπιδρά, με



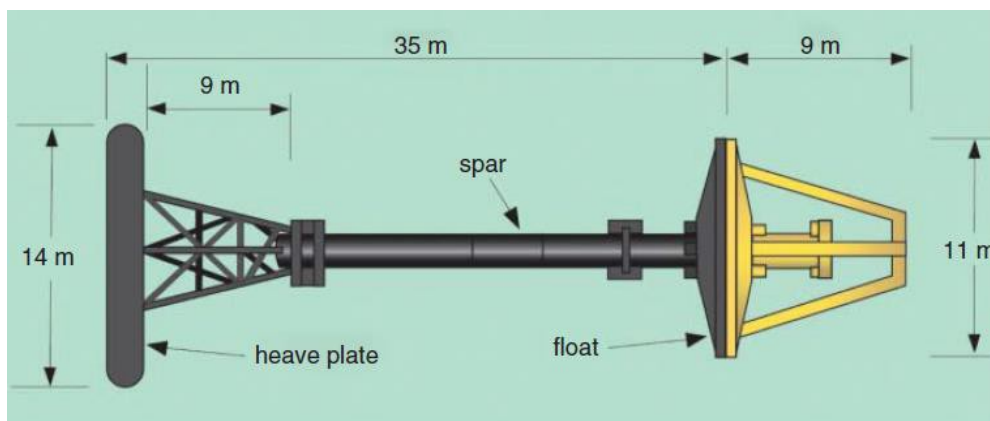
προφανείς συνέπειες στην αποδοτικότητα τους. Από τις δοθείσες διαστάσεις του PB150 γίνεται αντιληπτό ότι είναι κατάλληλο για κύματα μεγάλου μήκους.

Η συσκευή PB 150 που εγκαταστάθηκε το 2011 στα ανοιχτά της Σκωτίας είναι σχεδιασμένη για λειτουργία σε βάθος 55 μέτρων ή και μεγαλύτερο. Το συγκεκριμένο μοντέλο φθάνει σε βάθος 35 μέτρων κάτω από τη στάθμη της θάλασσας, ενώ η διάμετρος του πλωτού τμήματός του φθάνει στα 11 μέτρα.

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της συσκευής είναι ότι χάρη στην αξονική συμμετρία που εμφανίζει είναι δυνατό να αλληλεπιδρά με κύματα ανεξαρτήτως της κατεύθυνσης αυτών. Ως αποτέλεσμα το πλάτος σύλληψης της συσκευής είναι μεγαλύτερο από τις φυσικές του διαστάσεις αφού η συσκευή αλληλεπιδρά με όλο το περιβάλλον κυματικό πεδίο. Η διάταξη είναι σχεδιασμένη να παράγει ηλεκτρισμό αλληλεπιδρώντας με κύματα σημαντικού ύψους Κύματος (SWH) 1-6m. Κατά την διάρκεια δοκιμών στη Βόρεια θάλασσα, σε έξι μήνες παρήγαγε 45 kW κατά μέσο όρο με αλληλεπίδραση με κύματα σημαντικού ύψους κύματος 2m.



Εικόνα 95: Διάταξη PowerBuoy σε λειτουργία - διάγραμμα. [05^Α]



Εικόνα 96: Διαστασιολόγηση συσκευής PB150.



6.10 Σύστημα AquaBuoy (ΗΠΑ).

Το AquaBuoy είναι μια διάταξη τεχνολογίας μετατροπής της κυματικής ενέργειας. Κυρίως απευθύνεται σε εφαρμογή ανοικτής θάλασσας. Πολλές τέτοιες πανομοιότυπες διατάξεις μπορούν να αποτελέσουν ένα πάρκο σε μορφή συστάδας δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο τις λεγόμενες «Φάρμες Κυμάτων» σε απόσταση ακόμα και αρκετών μιλίων από την ακτή. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από μια τέτοια διάταξη μπορεί να προκύψει από ένα πολύ εκτεταμένο εύρος ισχύος. Για παράδειγμα η ηλεκτρική ισχύς μπορεί να βρίσκεται σε ένα εύρος μερικών εκατοντάδων kW έως και μερικών εκατοντάδων MW. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να διανέμεται σε παράκτιες περιοχές και είναι κατάλληλη για εφαρμογή ακόμα και σε απομονωμένα δίκτυα.



Εικόνα 97: Μοντέλο AquaBuoy με ενσωματωμένες ΑΠΕ.

Από τεχνολογικής άποψης η συγκεκριμένη διάταξη είναι ένα είδος σημειακού απορροφητή, λόγω του ότι έχει μικρή επιφάνεια απορρόφησης ως προς το μήκος των θαλάσσιων κυμάτων. Η μεταφορά ενέργειας γίνεται με τη μετατροπή της κάθετης συνιστώσας της κινητικής ενέργειας των κυμάτων σε θαλασσινό νερό υπό πίεση με τη βοήθεια αντλιών διπλής δράσης. Το συμπιεσμένο νερό οδηγείται σε ένα σύστημα μετατροπής που αποτελείται από έναν στρόβιλο Pelton συνδεδεμένο με μια ηλεκτρική γεννήτρια. Η ισχύς μεταφέρεται στην ακτή με υποθαλάσσια γραμμή μεταφοράς όπως συμβαίνει με όλες τις διατάξεις τεχνολογίας σηματοδούρας (buoy).

Η όλη διάταξη αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη που είναι η πλωτή σηματοδούρα, ο σωλήνας επιτάχυνσης, το έμβολο και η αντλία τύπου μάνικας. Ο σωλήνας επιτάχυνσης είναι ένας κάθετος κύλινδρος, στερεωμένος κάτω από το σώμα της σηματοδούρας, είναι ανοικτός και στα δύο άκρα του ώστε να επιτρέπει την ανεμπόδιστη είσοδο και έξοδο του νερού της θάλασσας προς κάθε φορά. Το έμβολο είναι τοποθετημένο στο μέσο του σωλήνα επιτάχυνσης και πρόκειται για έναν πλατύ δίσκο ουδέτερης πλευστότητας. Όταν η σηματοδούρα είναι σε στάση, το πιστόνι



συγκρατείται στο μέσο λόγω της εξισορροπημένης έντασης δύο αντλιών τύπου μάνικας που είναι τοποθετημένες στις αντίθετες πλευρές του εμβόλου (στο πάνω και στο κάτω μέρος του) και εκτείνονται μέχρι το πάνω και το κάτω μέρος του σωλήνα επιτάχυνσης αντίστοιχα.



Εικόνα 98: Η λειτουργία του AquaBuoy και η προετοιμασία καθελκυσμού.

Η αντλία τύπου μάνικας είναι μια μάνικα από καουτσούκ ενισχυμένο με ασφάλι, της οποίας ο εσωτερικός όγκος μειώνεται όταν μάνικα τεντώνεται, λειτουργώντας σαν αντλία. Το πρεσαρισμένο νερό της θάλασσας αποβάλλεται συνεχώς σε έναν αποταμιευτή υψηλής πίεσης και στη συνέχεια τροφοδοτείται σε ένα στρόβιλο Pelton που οδηγεί μια γεννήτρια. Ο παραγόμενος ηλεκτρισμός μεταφέρεται στην ακτή με τη βοήθεια ενός τυπικού υποθαλάσσιου καλωδίου. Αυτά τα τρία βασικά τμήματα, δηλαδή ο σωλήνας επιτάχυνσης, το πιστόνι και οι 2 αντλίες τύπου μάνικας, αποτελούν το σύστημα ΡΣΟ (PowerTake-Off) του AquaBuOY. Οι κύκλοι εργασιών συντήρησης και αντικατάστασης είναι σχεδιασμένοι ώστε να παρατείνουν την ζωή του συστήματος για παραπάνω από 20 χρόνια.

Στα βασικά πλεονεκτήματα της διάταξης συγκαταλέγονται

- Ευελιξία Κατασκευής: Ο μετατροπέας AquaBuOY αποτελείται από επιμέρους μονάδες και μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα μεγέθη εγκαταστάσεων, από μία μικρή συστάδα με AquaBuOYs μέχρι μια μεγάλη φάρμα με εκατοντάδες AquaBuOYs σε σειρές. Έτσι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες κιλοβάτ μέχρι μερικές εκατοντάδες μεγαβάτ.
- Αντοχή Υλικών: Όλα τα τμήματα του μετατροπέα έχουν αποδειχθεί τεχνολογικά και χρησιμοποιούνται σε θαλάσσιες εφαρμογές σε ολόκληρο τον κόσμο, δεκαετίες τώρα. Σα επιμέρους τμήματα της τεχνολογίας AquaBuOY



έχουν δοκιμαστεί στον ωκεανό από τους αρχικούς κατασκευαστές άλλα και από την βιομηχανία πετρελαίου ανοιχτής θαλάσσης.

- Ικανότητα Επιβίωσης : Μια εγκατάσταση με AquaBuOYs σε συστοιχία αποτελείται από μικρούς μετατροπείς που είναι παρόμοιοι με σημαδούρες πλοήγησης, που είναι γνωστές για την ικανότητα επιβίωσης τους εδώ και αρκετές δεκαετίες. Κατά την διάρκεια του πρόσφατου τσουνάμι, παρόμοιες θαλάσσιες κατασκευές που βρισκόντουσαν στην ανοιχτή θάλασσα επέζησαν αφού ανυψώθηκαν πάνω από το φονικό κύμα, ακριβώς όπως θα έκανε και ένα AquaBuOY. Αντίθετα οποιοδήποτε παράκτιο σύστημα θα είχε υποστεί καταστροφικές ζημιές. Επίσης η διαρροή λαδιών που είναι σχετικά συχνό φαινόμενο σε τέτοιες συσκευές, δεν θα παρεμπόδιζε την λειτουργία του AquaBuOY, σε αντίθεση με κάποια συσκευή παράκτιας τεχνολογίας.
- Μεγιστοποιημένη Έξοδος Ηλεκτρικής Ενέργειας: Το AquaBuOY είναι σχεδιασμένο ώστε να μεγιστοποιεί την έξοδο του σε μέτριες κυματικές συνθήκες και όχι σε ακραίες. Αυτό αποτρέπει τα επιπλέον έξοδα για τον περαιτέρω σχεδιασμό που θα χρειαζόταν για να μπορεί να απορροφά την κυματική ενέργεια σε περίπτωση σοβαρών καταιγίδων.

Το πρωτότυπο AquaBuOY 1.0 κατασκευάστηκε και προωθήθηκε μετά τα τεχνολογικά μέσα και δυνατότητες του 2006. Στα τέλη Αυγούστου του 2007 ολοκληρώθηκε η κατασκευή του AquaBuOY 2.0, ενώ Σεπτέμβριο του 2007 τέθηκε σε λειτουργία στη θάλασσα έξω από το Newport του Oregon. Από τις δοκιμές του μοντέλου αποφασίστηκε και η κατασκευή ενός τρίτης γενιάς AquaBuOY 3.0 αφού τα αποτελέσματα από το AquaBuOY 2.0, αν και γενικά θετικά οδήγησαν σε δυνατότητες βελτίωσης του μοντέλου 2.0.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Κυματική Ενέργεια και Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης – Μετατροπής Θαλασσίων Κυμάτων
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

ΜΟΥΤΣΑΤΣΟΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ
ΠΡΟΣΚΕΦΑΛΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ





7. Κυματική Ενέργεια στην Ελλάδα.

Στον ελλαδικό χώρο η ανάπτυξη της κυματικής τεχνολογίας ακόμα και σήμερα βρίσκεται στα σπάργανα. Πέρα από μια αξιόλογη υπολογιστική μελέτη ενός μοντέλου που θα μπορούσε να λειτουργήσει σε ελληνικές θάλασσες εφαρμοσμένες προσπάθειες δεν έχουν επιτευχθεί ακόμα (Κούρτζης 2013). Εξαίρεση αποτελεί η προσπάθεια που γίνεται στην Κρήτη και πιο συγκεκριμένα στο λιμάνι του Ηρακλείου από τον ίδιο το φορέα (Λιμένα Ηρακλείου) σε συνεργασία με τη γερμανική εταιρία SINNPower.

Η Γερμανία αν και έχει αργήσει στην ανάπτυξη τεχνολογιών εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας πιθανώς λόγω της μικρής ακτογραμμή της και καλά αναπτυγμένη ηλιακή και αιολική βιομηχανία, το 2014 ανέπτυξε ένα σύστημα το οποίο επιπλέει εξ ολοκλήρου πάνω από τη γραμμή του νερού, αποφεύγοντας εσκεμμένα τη διάβρωση και τακτική συντήρηση η οποία είναι πολύ πιο δύσκολο να χειριστεί υποβρύχια. Η ιδέα είναι πολύ απλή - η κίνηση πάνω-κάτω από τα κύματα σηκώνει τα επιπλέοντα σώματα των επιμέρους ενοτήτων. Τα επιπλέοντα σώματα με τη σειρά της τα ανασηκώνει μια ράβδος που περνά μέσα από μια μονάδα γεννήτριας. Με αυτό τον τρόπο παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια. Πρόκειται για ένα αρθρωτό σύστημα που είναι αρκετά απλό να εγκατασταθεί σε κάθε ακτή, προσαρμόσιμο για την προμήθεια μικρών δικτύων αλλά και δημοσίων.

Το άνοιγμα της Γερμανίας στην εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας μέσω της συγκεκριμένης εταιρίας υποβοηθάται από εθνικούς πόρους της χώρας. Μάλιστα αξίζει να σημειωθεί ότι η εταιρία λαμβάνει επιχορήγηση συμμετέχοντας σε ερευνητικό πρόγραμμα που έχει εγκριθεί από την ομοσπονδιακή κυβέρνηση ύψους 1εκ. ευρώ για τη διερεύνηση αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας στην Ελλάδα.

7.1 Μετατροπείας της εταιρίας SinnPower.

Η πατενταρισμένη διάταξη που κατασκευάζει η εταιρεία, ανήκει στην κατηγορία τεχνολογίας σημειακού απορροφητή σε λειτουργία κατακόρυφης ταλάντωσης. Ουσιαστικά πρόκειται για μια τεχνολογία πλωτήρα - σημαδούρας (buoy). Η βασική αρχή λειτουργίας είναι απλή: Η κίνηση των κυμάτων ανυψώνει τα πλωτά σώματα των επιμέρους ενοτήτων. Τα πλωτά σώματα με τη σειρά τους ανυψώνουν μια ράβδο που διέρχεται από μια μονάδα γεννήτριας. Με τον τρόπο αυτό η κινητική ενέργεια της ράβδου μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Περισσότερα δεδομένα για τον τρόπο μετατροπής δεν είναι διαθέσιμα αλλά είναι γνωστό ότι οι τεχνολογίες πλωτήρα - σημαδούρας βασίζονται στη λειτουργία εμβόλου το οποίο μπορεί να πρεσάρει είτε κάποιο λάδι μέσα σε κλειστό κύλινδρο ή ακόμα αέρα ή νερό ο οποίος κινεί κάποια ρευστοδυναμική μηχανή – αεριοστρόβιλο που στη συνέχεια μια γεννήτρια μετατρέπει την κινητική ενέργεια εκ περιστροφής σε ηλεκτρική.

Ο δομοστοιχειωτός μετατροπείας κυμάτων ενέργειας είναι κατασκευασμένος από τυποποιημένα εξαρτήματα μαζικής παραγωγής και όχι μόνο πιο οικονομικά αποδοτικό αλλά και ευκολότερο στη μεταφορά και συντήρηση. Με αυτόν τον τρόπο, ο μετατροπείας ενέργειας κυμάτων μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σε χώρες με λιγότερο ανεπτυγμένη υποδομή, όπου αντικαθιστά τις γεννήτριες ντίζελ που καταστρέφουν το κλίμα. Σε σχέση με άλλους μετατροπείς που βασίζονται κατά κύριο



λόγο σε μεγάλες και ακριβές εγκαταστάσεις υψηλής τεχνολογίας και μικρής ευελιξίας για την προσαρμογή στις ανάγκες των πελατών και στο κλίμα του κύματος στον συγκεκριμένο χώρο, η γερμανική εταιρία SINNPower ακολουθεί διαφορετική πολιτική.

Όπως όλες οι διατάξεις μετατροπής της κυματικής ενέργειας η συγκεκριμένη διάταξη εξοικονομεί κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και εκπομπές CO₂. Ο μοναδικός συνδυασμός της σταθερής, ισχυρής πρωτογενούς ενέργειας στα κύματα των ωκεανών και της προσέγγισης χαμηλού κόστους της μαζικής κατασκευής αρθρωτής τεχνολογίας της SINNPower, επιτρέπει ένα ενεργειακό σύστημα που καλύπτει αξιόπιστα τόσο τα βασικά φορτία όσο και τις κορυφές (μειώνοντας το κόστος της μπαταρίας) και έχει χαμηλότερο κόστος ζωής (LCOE) από τους ανταγωνιστές της (κυρίως γεννήτριες ντίζελ). Ανάλογα με την ισχύ κύματος στην τοποθεσία και τις ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας του πελάτη, ο αριθμός και το μέγεθος των μονάδων του μετατροπέα κυμάτων ενέργειας ρυθμίζονται ξεχωριστά. Με αυτόν τον τρόπο, ο μετατροπέας ενέργειας κυμάτων μπορεί πάντα να παρέχει τη βέλτιστη παροχή ενέργειας με το χαμηλότερο κόστος.

Κάθε γεννήτρια εξοικονομεί περίπου 780 τόνους CO₂ κάθε χρόνο - το ισοδύναμο 195 ταξίδια αυτοκινήτων γύρω από τη γη. Επί του παρόντος, οι γεννήτριες ντίζελ στις παράκτιες περιοχές έχουν χωρητικότητα περίπου 22 gigawatts. Η αντικατάσταση όλων των γεννητριών ντίζελ στις παράκτιες περιοχές με τους μετατροπέες ενέργειας SINNPower θα ισοδυναμούσε με το θετικό κλιματικό αποτέλεσμα όλων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη Γερμανία.

Από τον Δεκέμβριο του 2015, η SINNPower εγκατέστησε ένα μόνο δομοστοιχείο μετατροπέα κυμάτων ενέργειας στο αρχικό της μέγεθος στο λιμάνι του Ηρακλείου στην Κρήτη για να ελέγξει τη λειτουργικότητα και την αντίσταση στη διάβρωση των εξαρτημάτων. Οι μακροχρόνιες δοκιμές συνεχίστηκαν από την άνοιξη του 2016 για να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία της συστοιχίας μετατροπέων ενέργειας κυμαίνόμενου κύματος.

Στην τυποποιημένη έκδοση, το πλωτό σώμα μιας μεμονωμένης μονάδας έχει διάμετρο 2 μέτρων, ολόκληρη η μονάδα έχει ύψος 10 μέτρα. Οι ενότητες συνδέονται σε μια σειρά μεταβλητού μεγέθους, ανάλογα με τα μήκη κύματος στην τοποθεσία. Όταν η συστοιχία μετατροπέων ενέργειας κύματος επιπλέει σε μερικές εκατοντάδες μέτρα από την ακτή, εμφανίζεται κοντά στον ορίζοντα σαν μια μικρή βάρκα.

Η συνολική δαπάνη της εταιρίας για την ανάπτυξη διατάξεων μετατροπής κυματικής ενέργειας ήταν κάτω από 3 εκατομμύρια ευρώ. Αυτό είναι ιδιαίτερα αξιοσημείωτο σε σύγκριση με τους μεγαλύτερους ανταγωνιστές στον τομέα, οι οποίοι προσπάθησαν ανεπιτυχώς να επιτύχουν την ίδια τεχνική κατάσταση με χρηματοδοτική δαπάνη 117 εκατ. Ευρώ και διάρκεια άνω των 19 ετών. Για περισσότερο από δύο χρόνια σημαντική πρόοδος επιτεύχθηκε στην ανάπτυξη των μηχανικών και ηλεκτρικών εξαρτημάτων και αυτοματισμών όπως και στις συνδέσεις. Η δεύτερη γενιά δομοστοιχείων ενέργειας κύματος λειτούργησε ομαλά και παρήγαγε ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο δικό της σύστημα offgrid. Με την επιτυχή υλοποίηση στοιχείων δεύτερης γενιάς, η εταιρία μπορεί τώρα να προσφέρει μια μακροπρόθεσμη λύση για την προμήθεια συστημάτων mini-grid ή off-grid ικανοποιώντας ανάγκες των πελατών.

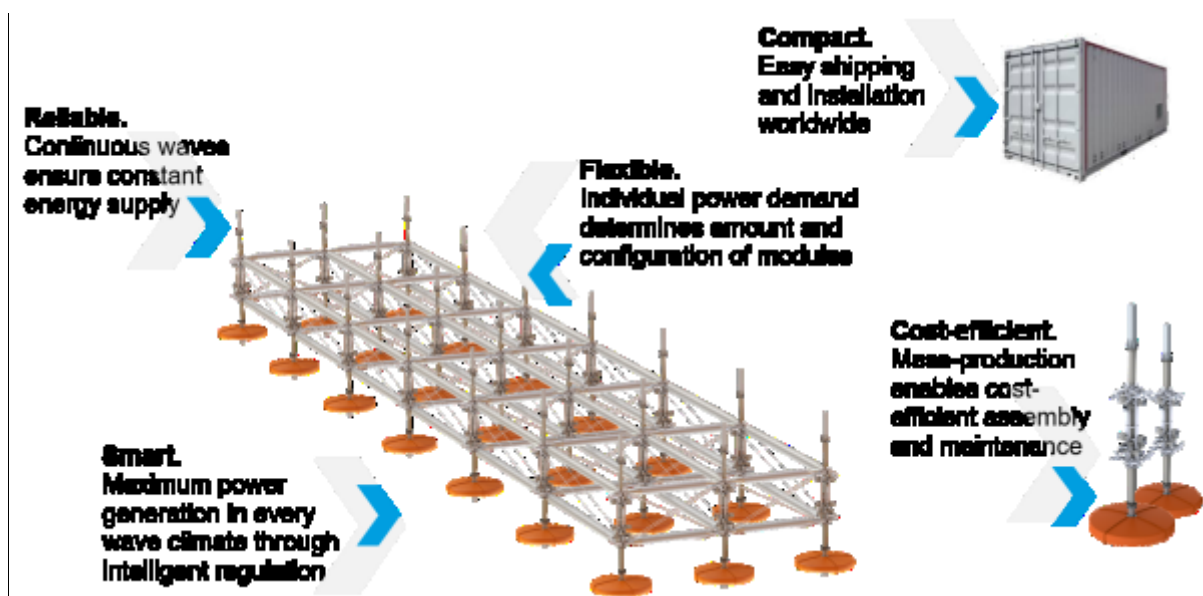


7.2 Χαρακτηριστικά - Πλεονεκτήματα του μετατροπέα SinnPower.

Αναφορικά με τη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον συγκεκριμένο μετατροπέα θα πρέπει να σημειωθεί ότι η έξοδος του μετατροπέα ενέργειας κυμάτων εξαρτάται κυρίως από τη δύναμη των κυμάτων στην περιοχή. Ο μετατροπέας ενέργειας χρησιμοποιεί δύο πλεονεκτήματα των ωκεανών όπως το ότι η ενέργεια που περιέχεται στα κύματα είναι πολύ πιο συγκεντρωμένη από την ενέργεια στον αέρα και τον ήλιο. Ταυτόχρονα, τα ωκεάνια κύματα είναι πολύ πιο συνεχή από τις εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο, ο μετατροπέας ενέργειας κυμάτων μπορεί να παράγει αρκετό ηλεκτρικό ρεύμα για να τροφοδοτήσει αξιόπιστα ένα ξενοδοχειακό θέρετρο ή μια μικρή κοινότητα.

Ως προς τη δυνατότητα εγκατάστασης ενός μεμονωμένου μετατροπέα ή συστοιχίας ο μετατροπέας ενέργειας κυμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στις ακτές σε όλο τον κόσμο. Αυτό είναι και το πλεονέκτημα που διαθέτει ως προς άλλες πιο στιβαρές κατασκευές που προορίζονται για παράκτια ή υπεράκτια εγκατάσταση. Κύματα που είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για παραγωγή ενέργειας βρίσκονται και σε ακτές και ιδιαίτερα στην περίπτωση hot spots. Όταν η αιολική ενέργεια που έχει συσσωρευτεί στο νερό των ωκεανών σε μεγάλη απόσταση από την ακτή έχει «φορτώσει» τα κύματα με μεγάλη ισχύ, αυτή μπορεί να γίνει εκμεταλλεύσιμη σε ικανοποιητικό βαθμό στην ακτή. Αυτή είναι και η θέση (concept) του συγκεκριμένου μετατροπέα κυματικής ενέργειας.

Ακόμα και στην περίπτωση καταιγίδας ο μετατροπέας ενέργειας κυμάτων έχει σχεδιαστεί για να αντέχει το μέγιστο ύψος κύματος ενός συγκεκριμένου τόπου συν ένα περιθώριο ασφαλείας. Οι δοκιμές στη δεξαμενή κύματος του Πανεπιστημίου της Φλωρεντίας έδειξαν ότι το σύνηθες σύστημα πρόσδεσης είναι σε θέση να αντέξει το ισοδύναμο των κυμάτων θραύσης ύψους 7 μέτρων.



Εικόνα 99: Συστοιχία μετατροπέων για υψηλότερου βαθμού εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας.



7.3 Λιμένας Ηρακλείου – Τοποθέτηση μετατροπέα.

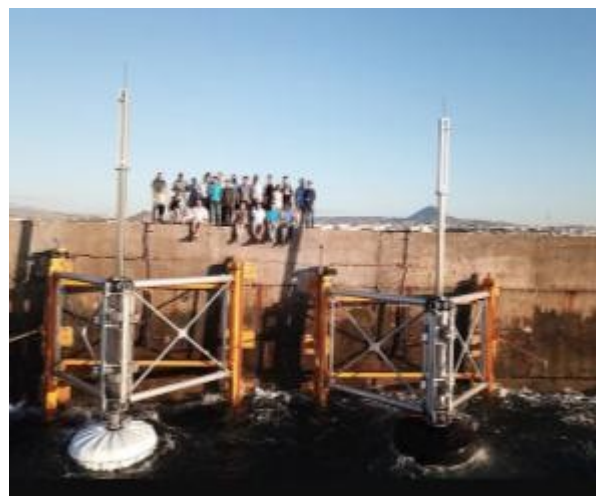
Στις 5 Ιουλίου 2018, σε επίσημη τελετή με 70 διεθνείς επισκέπτες, η δεύτερη γενιά της κατοχυρωμένης με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας τεχνολογίας κυμάτων ενέργειας SINNPower, χρηματοδοτούμενη από τη γερμανική ομοσπονδιακή κυβέρνηση, τέθηκε σε λειτουργία με επιτυχία στο Ηράκλειο της Ελλάδας. Το πλεονέκτημα μιας τέτοιας μονάδας είναι ότι μπορεί να παράγει ελεγχόμενη και σταθερή ενέργεια από τα κύματα.

Χρησιμοποιώντας την οικονομική υποστήριξη του Ομοσπονδιακού Υπουργείου Οικονομίας και Ενέργειας της Γερμανίας (BMW) και μια πρόσφατη επένδυση από το Schneider Kapital Global Impact Fund, η εταιρία σχεδιάζει να εγκαταστήσει τρία επιπλέον δομοστοιχεία στον τοίχο του κυματοθραύστη στο λιμάνι του Ηρακλείου. Αυτό εξυπηρετεί το στόχο της συλλογής δεδομένων σχετικά με τη λειτουργικότητα και την ηλεκτρική απόδοση των μονάδων υπό διαφορετικές συνθήκες κύματος.

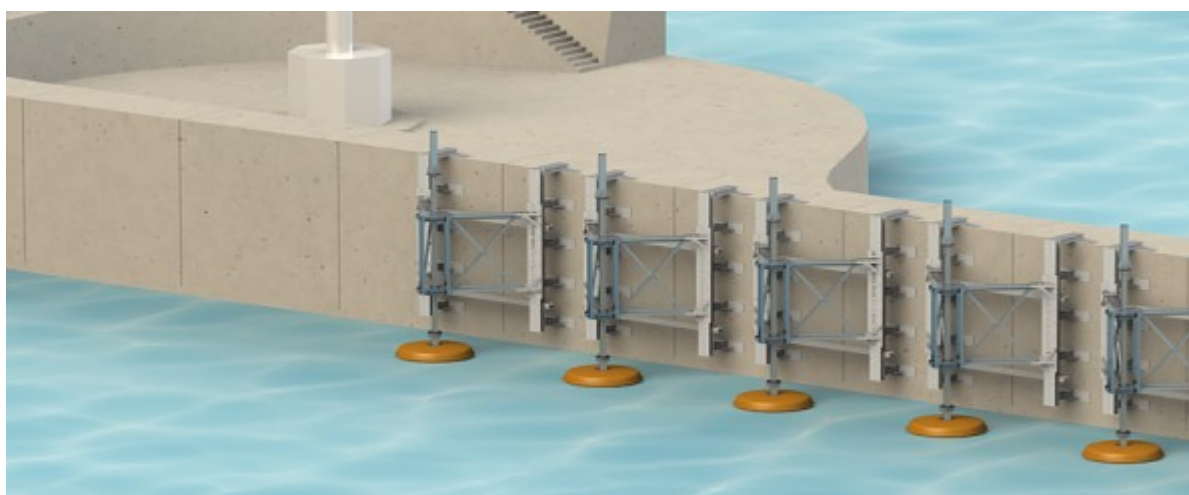
Το σχέδιο για μια δέσμη ενεργειών κυμαινόμενων κυμάτων, που θα κατασκευαστεί μεταξύ 2019 και 2020, βρίσκεται ήδη στο στάδιο της προετοιμασίας. Αυτές οι πλωτές συστοιχίες θα προετοιμάσουν το έδαφος για την εφαρμογή της εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας σε ένα μεγαλύτερο βαθμό σε εγκαταστάσεις ακτογραμμής αν και ο μακροπρόθεσμος στόχος είναι να αξιοποιηθεί το αχρησιμοποίητο δυναμικό, για παράδειγμα ο χώρος μεταξύ των μεγάλων αιολικών πάρκων ανοικτής θάλασσας, με τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο.

Σκοπός του ερευνητικού έργου είναι να δοκιμάσει στην πράξη την ηλεκτρική διασύνδεση αρκετών γεννητριών σε δομοστοιχεία παραγωγής ενέργειας. Για να γίνει αυτό, η μετάφραση δηλ. της ακανόνιστης ταλαντευόμενης κίνησης των κυμάτων σε ηλεκτρικό ρεύμα που συμμορφώνεται με το δίκτυο, πρόκειται να δοκιμαστεί αρχικά ένα μικρό δίκτυο των πέντε σταθερών εγκατεστημένων μονάδων δοκιμής.

Μετά την επιτυχή ολοκλήρωση της δοκιμής στις ενότητες τοποθέτησης σε τοίχο κύματος, η εταιρία σε συνεργασία με τους τοπικούς φορείς (Λιμένα Ηρακλείου, Πολυτεχνείο Κρήτης, Μεσογειακό Παν/μιο Κρήτης) σχεδιάζει να δοκιμάσει μια πλωτή εκδοχή της τεχνολογίας του μετατροπέα κυμάτων ενέργειας. Ο προγραμματισμένος μετατροπέας ενέργειας κυμαινόμενου κύματος θα αποτελείται από 18 μονάδες.



Εικόνα 100: Η διαδικασία της τοποθέτησης δομοστοιχείων μετατροπής κυματικής ενέργειας.



Εικόνα 101: Εικονογράφιση της εγκατάστασης πέντε δομοστοιχείων στον κυματοθραύστη του λιμένα Ηρακλείου.

Οι δοκιμές με το πρωτοποριακό πρωτότυπο του μετατροπέα ενέργειας κύματος στον λιμενοβραχίονα του λιμανιού του Ηρακλείου γίνονται από το 2015 και αυτό γιατί ο συγκεκριμένος τύπος έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα σε δοκιμές ανοιχτής θάλασσας με μεγάλη επιτυχία. Έτσι η δημιουργία νέων στοιχείων σχετικά με αυξημένη απόδοση οδηγεί την τεχνολογική εξέλιξη στον τομέα μετατροπής κυματικής ενέργειας.

Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η ταλάντωση που εκτελούν ομάδες της συστοιχίας μετατροπέων καθώς και το μήκος κύματος που εκμεταλλεύονται. Όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα το ταίριασμα της συχνότητας του κύματος στην κατεύθυνση διάδοσής του με τη συχνότητα της κατακόρυφης κίνησης των δομοστοιχείων οδηγεί σε μεγαλύτερη απόδοση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.



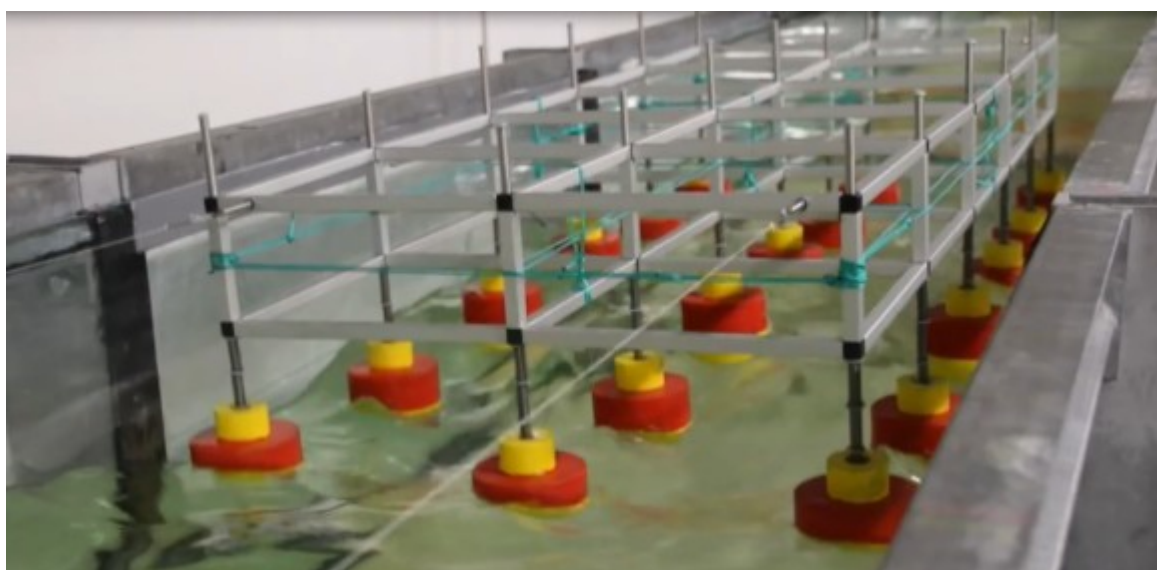
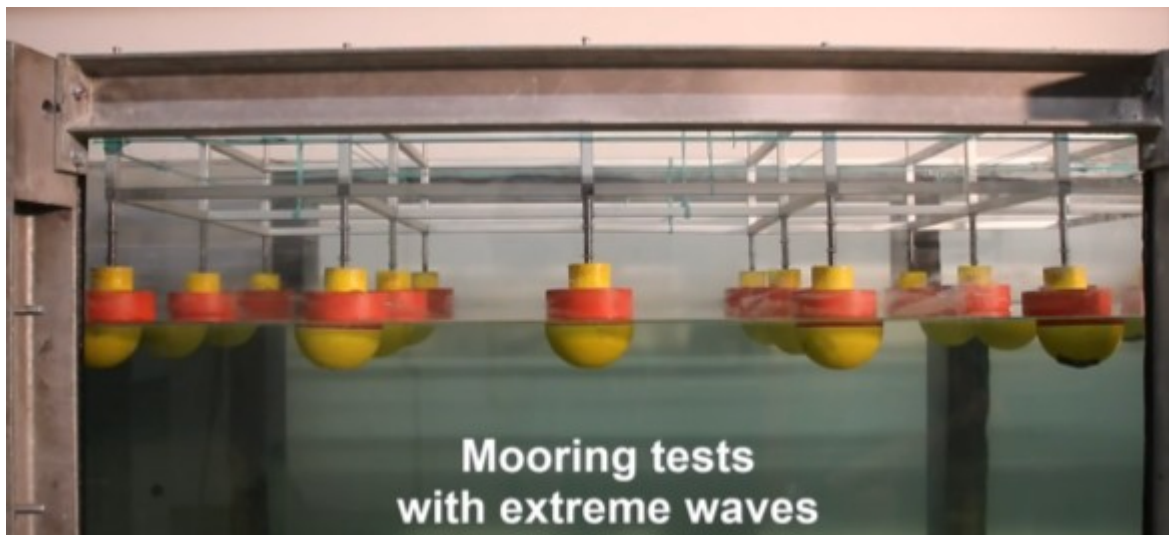
Εικόνα 102: Φάρμα - Συστοιχίες μετατροπών (WEC's).

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί η πολύ σημαντική συνεισφορά στην έρευνα καταρχήν που προηγείται της κατασκευής και δοκιμής σε πραγματική κλίμακα. Έτσι για παράδειγμα δοκιμές των διατάξεων αρχικά έγιναν στο Πολυτεχνείο της Φλωρεντίας σε εργαστήριο Υδραυλικής στο οποίο η φάρμα τοποθετήθηκε σε κανάλι και με εφαρμογή θεωρίας ομοιότητας πραγματικοί κυματισμοί προσομοιώθηκαν ώστε να δοκιμαστεί η αντοχή και η όλη συμπεριφορά της συστοιχίας δομοστοιχείων. Στις εικόνες που ακολουθούν δίνονται στιγμιότυπα των δοκιμών από τις οποίες προέκυψε ότι η διάταξη είναι άρτια για α δοκιμαστεί σε πραγματικές πλέον συνθήκες.

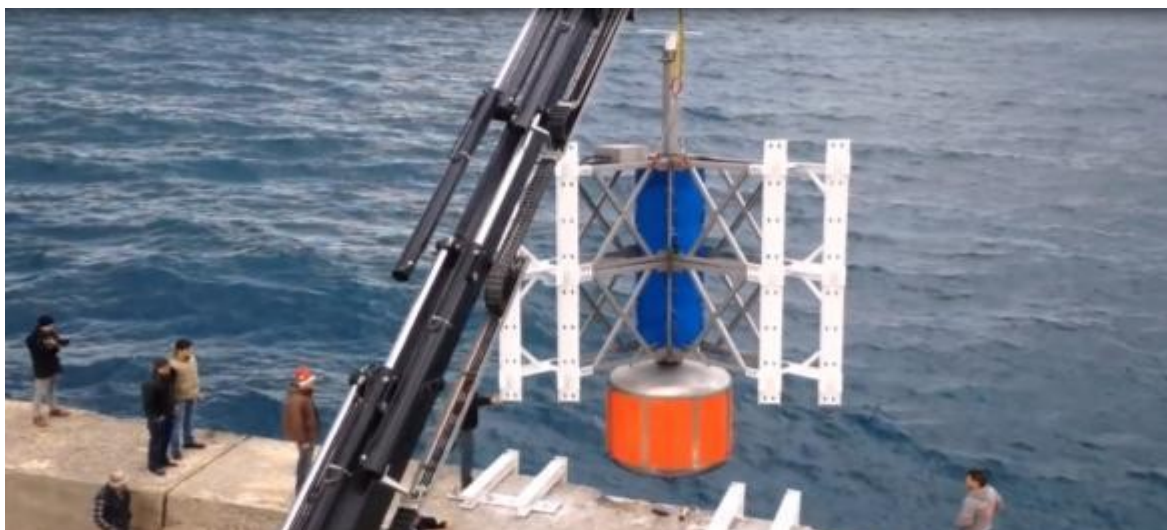
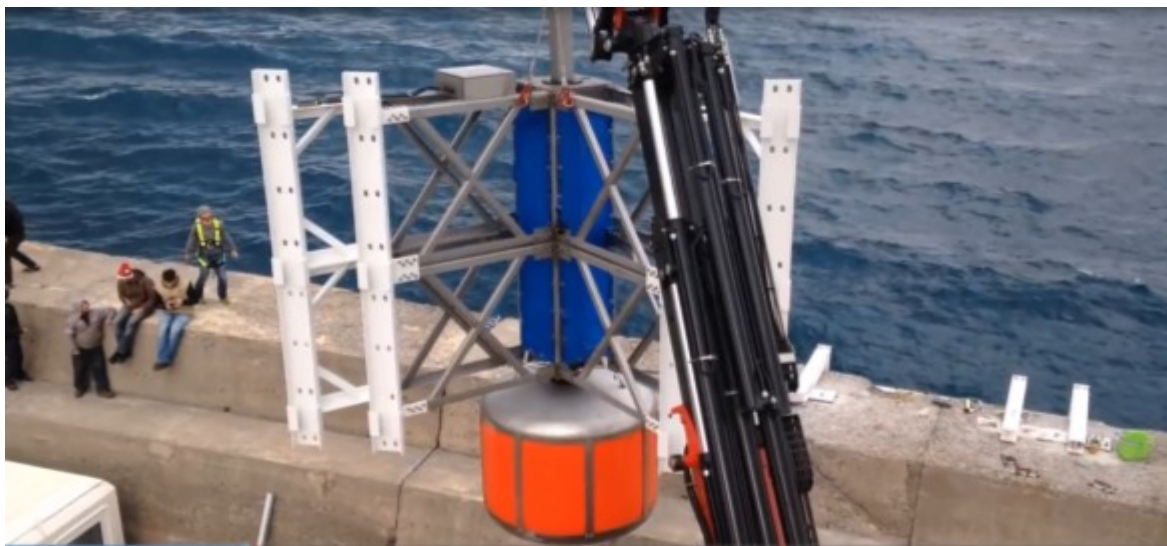
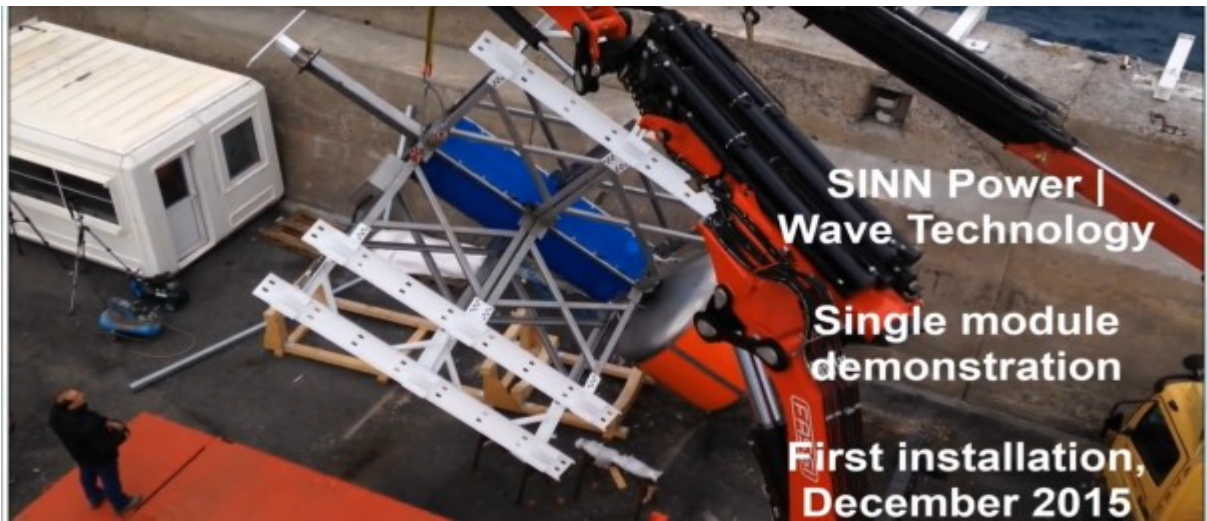


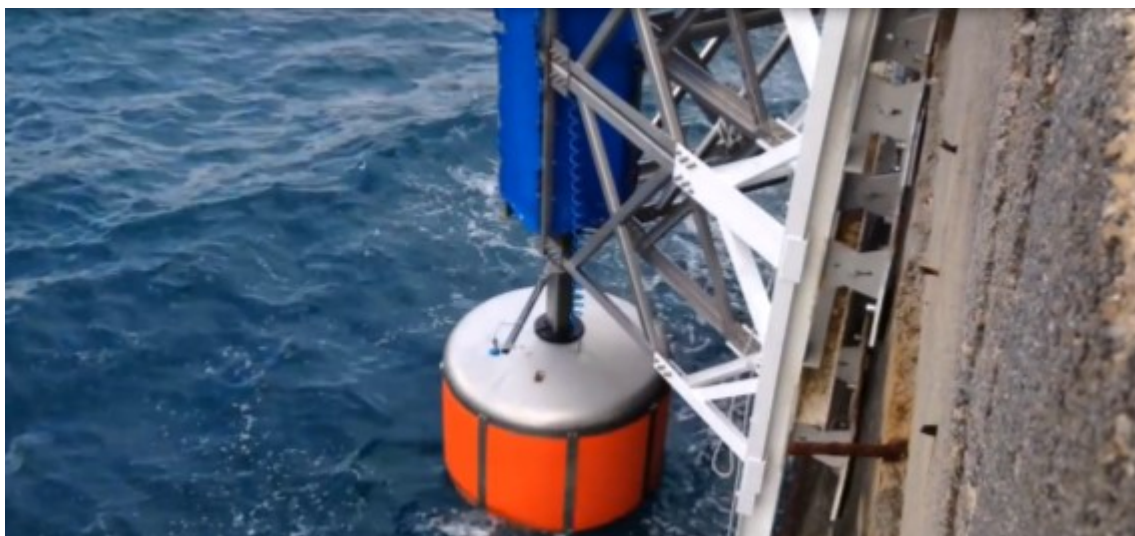


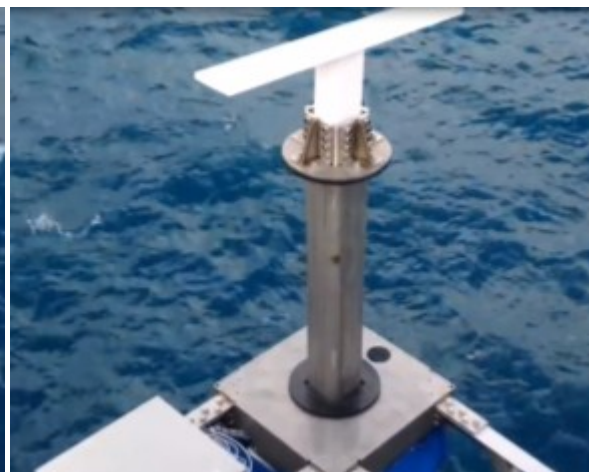
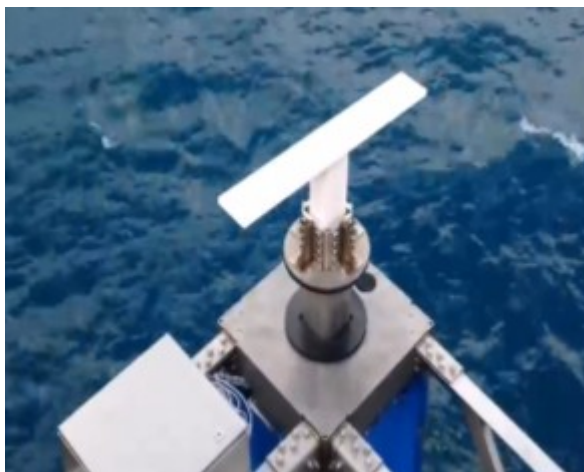
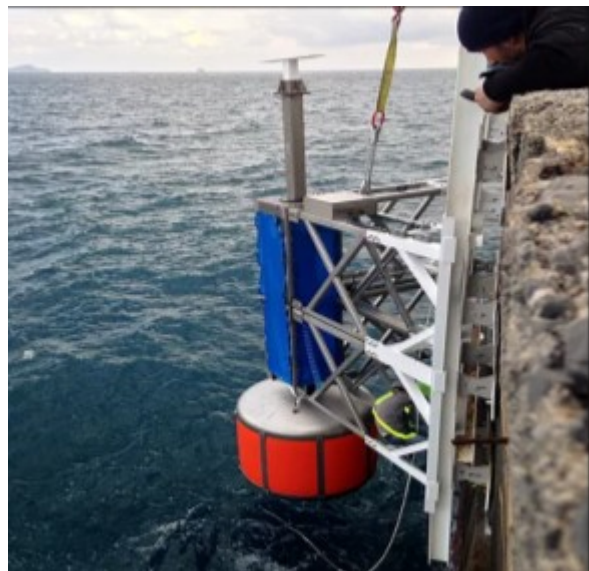
Εικόνα 103: Δοκιμές σε κλίμακα Εργαστηρίου στη Φλωρεντία.













Εικόνα 104: Το δομοστοιχείο εγκατεστημένο - Ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός (on board).



8. Συμπεράσματα - Ανασκόπηση.

Είναι γνωστό ότι βασική πηγή - κινητήρια δύναμη για την τεχνολογική ανάπτυξη του ανθρώπου αποτελεί η ενέργεια. Επίσης οι ενεργειακές ανάγκες του ανθρώπου αυξάνονται ολοένα στο πέρασμα του χρόνου αφού οι ρυθμοί της τεχνολογικής ανάπτυξης πλέον είναι πολύ αυξημένοι. Από την άλλη πλευρά τα ενεργειακά αποθέματα των πηγών δεν είναι ανεξάντλητα, οπότε η ορθή διαχείριση της ενέργειας σχετίζεται άμεσα με την καλύτερη ποιότητα ζωής με το βλέμμα στο μέλλον. Κατά αυτή την έννοια και με στόχο πλέον την ποιότητα ζωής η συμμετοχή των ΑΠΕ διαδραματίζει κομβικό ρόλο και μέχρι σήμερα αρκετά υπολογίσιμες προσπάθειες έχουν γίνει τόσο σε εθνικό όσο και παγκόσμιο επίπεδο.

Στην εργασία μελετήθηκε μία εκ των ΑΠΕ, η κυματική ενέργεια και μάλιστα η εκμετάλλευση της κυματικής μόνο από την κίνηση των κυμάτων. Υπάρχει ακόμα η εκμετάλλευση της κυματικής από τα φαινόμενα παλίρροιας που στην παρούσα εργασία δεν συζητήθηκαν. Αυτό το αντικείμενο θα μπορούσε να αναλυθεί διεξοδικά σε μια επόμενη εργασία. Γενικότερα η θαλάσσια ενέργεια όπως είναι η κυματική ενέργεια είναι κάθε πηγή ενέργειας, άμεση ή έμμεση, που προέρχεται από τα ωκεάνια ύδατα. Όπως είναι γνωστό η Γή σκεπάζεται κατά τα 3/4 από ωκεανούς.

Η εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας ακόμα και στις μέρες μας αν και αποτελεί ίσως την πλέον καθαρή μορφή ενέργειας, εντούτοις δεν βρίσκεται στις προτεραιότητες ως λύση του ενεργειακού προβλήματος στις περισσότερες χώρες του κόσμου. Εξαιρέση αποτελούν οι χώρες του Ηνωμένου Βασιλείου, όπως η Αγγλία και η Σκωτία περισσότερο που λόγω του ότι βρέχονται από «το ρεύμα του κόλπου» παράλληλα διαθέτουν και πολύ ισχυρό κυματικό δυναμικό προς εκμετάλλευση.

Επομένως τα ωκεάνια ύδατα σε συνδυασμό με τον άνεμο μπορούν να δώσουν λύση στο άμεσο μέλλον στο ενεργειακό πρόβλημα της ανθρωπότητας. Η κυματική ενέργεια ως ΑΠΕ έχει δύο βασικά πλεονεκτήματα ως προς τις συμβατικές πηγές ενέργειας (ορυκτά καύσιμα), μπορεί να γίνει αντικείμενο εκμετάλλευσης με τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον και δεύτερο και πολύ πιο σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι βρίσκεται ανεξάντλητη σε πολλά σημεία του πλανήτη. Έτσι τα τελευταία χρόνια υπάρχει πολύ σημαντικό ενδιαφέρον τόσο από επιστήμονες – ερευνητές όσο και από εταιρίες για την προώθηση της εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας.

Η κυματική ως μορφή ενέργειας πολλά πλεονεκτήματα όπως το ότι είναι μια αδιάλειπτη – συνεχής πηγή ενέργειας που θα μπορούσε να αποτελεί προμηθευτή στο άμεσο μέλλον συμμετέχοντας ενεργά στη μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων σε παγκόσμια κλίμακα. Η κυματική ενέργεια είναι πιο συγκεντρωμένη και λιγότερο μεταβλητή πηγή ενέργειας με την έννοια ότι σε κάθε τόπο το κυματικό δυναμικό βρίσκεται εντός κάποιων ορίων εντός των οποίων μπορούν να λειτουργούν κατάλληλα ρυθμισμένες διατάξεις. Διαθέτει υψηλή πυκνότητας ισχύος που είναι μια πολύ ελπιδοφόρα ιδιότητα αφού με την πρόοδο της τεχνολογίας τείνει προς χαμηλότερο κόστος. Επίσης οι ανάγκες συντήρησης των διατάξεων εκμετάλλευσης είναι μικρές και γίνονται σε μακρά χρονικά διαστήματα.

Σύμφωνα με τις εκτιμήσεις του παγκόσμιου συμβουλίου ενέργειας περίπου 2TW δηλ. διπλάσια ποσότητα ισχύος της σημερινής παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα μπορούσε να παράγεται από τους ωκεανούς και μόνο, με εκμετάλλευση της κυματικής. Κατά τις ίδιες εκτιμήσεις υπολογίζεται ότι 1εκ. GWh αποτελεί το ισοδύναμο των κυμάτων που πλήττουν τις ακτές της Αυστραλίας σε



ετήσια βάση. Ακόμα το 25% της σημερινής κατανάλωσης της Μ. Βρετανίας θα μπορούσε να καλύπτεται από την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας. Ειδικότερα ο φορέας Marine Foresight Panel της Μ. Βρετανίας εκτιμά ότι το 0.1% της διαθέσιμης θαλάσσιας ενέργειας θα μπορούσε να καλύψει έως και 5 φορές την παγκόσμια ζήτηση σε ενέργεια (<https://thinkglobalgreen.org/wave-power/>). Στη συγκεκριμένη πηγή μπορεί κανείς να αναγνωρίσει την πρόοδο που επιτυγχάνεται όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια στην ανάπτυξη τεχνολογιών εφαρμόσιμων σε πολλά μέρη του κόσμου προς εκμετάλλευση της κυματικής. Πλέον ειδικά στην Ευρώπη και Αμερική αρχίζει να διαφαίνεται ένας ανταγωνισμός μεταξύ των εταιριών για όλο και αποδοτικότερες διατάξεις με περιορισμένο κύκλο συντήρησης σε μακρά χρονικά διαστήματα, με στόχο πάντα μια ανταγωνιστική τιμή της kWh ως προς άλλες ανανεώσιμες πηγές ώστε η χρήση της κυματικής να αποτελέσει ελκυστική λύση σε οικονομικό επίπεδο.

Η ενεργειακή πυκνότητα των κυμάτων υπερβαίνει εκείνη του ανέμου περίπου 10 φορές, αυξάνοντας έτσι την διατιθέμενη ποσότητα ενέργειας. Επίσης με τη βοήθεια της Μετεωρολογίας υπάρχει η δυνατότητα πρόβλεψης των κυμάτων ώστε να υπάρχει αντιστοίχιση μεταξύ προσφοράς και ζήτησης σε μεγάλα χρονικά διαστήματα μειώνοντας τις απαιτήσεις αποθήκευσης που θα οδηγούσαν σε πρόσθετο κόστος.

Παρά όμως τα πλεονεκτήματα, υπάρχουν και μειονεκτήματα όπως το κόστος κατασκευής των έργων υποδομής το οποίο πολλές φορές είναι υπέρογκο σε σχέση με την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Στόχος είναι στο άμεσο μέλλον η παραγόμενη kWh από την κυματική ενέργεια να φθάσει να έχει κόστος συγκρίσιμο με άλλες ΑΠΕ ενώ σήμερα μοιάζει να είναι αρκετές φορές έως και 6-7 φορές πιο ακριβή. Αυτός ο στόχος είναι που οδηγεί τους ερευνητές αλλά και τις εταιρίες σε πατενταρισμένες διατάξεις μετατροπής της κυματικής σε ηλεκτρική ενέργεια με πιο αποτελεσματικό - αποδοτικό τρόπο και χαμηλότερο κόστος. Οι προσπάθειες στις μέρες μας γίνονται προς αυτή την κατεύθυνση και συνδέονται τόσο με φθηνά αλλά αξιόπιστα υλικά υψηλής αντοχής στις δύσκολες κλιματολογικές συνθήκες της θάλασσας, τρόπους μετατροπής οικονομικότερους και πιο εύκολη και όσο το δυνατό μικρότερου κόστους συντήρηση. Με αυτή την έννοια επιζητείται ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας που θα συνδυάζει υψηλή απόδοση, οικονομία στην κατασκευή και ασφαλή στις δυσκολότερες συνθήκες λειτουργίας.

Ενώ λοιπόν έχει αποδειχθεί η αξιοπιστία πολλών διατάξεων – μετατροπέων το κόστος παραμένει συγκριτικά υψηλό (0,08-0,1 €/kWh), ωστόσο η περαιτέρω τεχνολογική εξέλιξη αναμένεται να οδηγήσει στη μείωσή του, σύμφωνα με τις εκτιμήσεις για την κάθε τεχνολογία ξεχωριστά. Προς το σκοπό αυτό, η εμπορική εκμετάλλευση της ενέργειας του θαλάσσιου κυματισμού στο κοντινό μέλλον θεωρείται πλέον εφικτή και ίσως αναγκαία, σε συνδυασμό με τα καταστροφικά αποτελέσματα που βιώνει όλο και πιο συχνά η ανθρωπότητα της υπερθέρμανσης του πλανήτη, λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου. Η ορθή διαχείριση της ενέργειας καθώς και η εισαγωγή και άλλων ΑΠΕ στην κατανάλωση αποτελεί στρατηγικό στόχο κάθε χώρας.

Αναφορικά με τις περιβαλλοντικές αλληλεπιδράσεις των τεχνολογιών κυματικής ενέργειας, αυτές φαίνεται να είναι περιορισμένες, όταν γίνεται σωστός προγραμματισμός και η επιλογή θέσης της εκμετάλλευσης γίνεται με σύνεση. Απαιτείται σοβαρή διερεύνηση στις επιπτώσεις του θορύβου στο θαλάσσιο οικοσύστημα.



Ο θόρυβος θα μπορούσε να είναι μια δυνητικά αρνητική επίπτωση αλλά μέχρι σήμερα ακόμα δεν υπάρχουν ικανοποιητικά δεδομένα που να βεβαιώνουν κάτι τέτοιο θα μπορούσε να αποτελέσει ένα σημαντικό πεδίο έρευνας.

Προβλήματα επίσης μπορεί να δημιουργούνται από τη χρήση ηλεκτρικών καλωδίων αλλά και της διαδικασίας αγκύστρωσης, όμως η διαχείρισή τους είναι στις μέρες μας αρκετά εύκολη.

Η ορθή επιλογή της θέσης μιας μεμονωμένης διάταξης ή μιας φάρμας μετατροπών αποτελεί ίσως το σημαντικότερο πρόβλημα. Ο τομέας της αλιείας αλλά και η εμπορική ναυτιλία αφαιρούν σίγουρα δυνητικό χώρο για τοποθέτηση αλλά και αυτό το εμπόδιο μπορεί να αρθεί. Για παράδειγμα στην ΑΟΖ της πατρίδα μας σε ανοικτή θάλασσα η περιοχή της νοτιοδυτικής Ελλάδας νοτίως της Πελοποννήσου και βορειοδυτικά της Κρήτης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κάλλιστα λόγω και του υψηλού κυματικού δυναμικού που εμπεριέχεται στη συγκεκριμένη περιοχή.

Θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψιν η ακτογραμμή χιλιάδων χιλιομέτρων των ελληνικών νησιών και βραχονησίδων, η ενεργειακή εκμετάλλευση των οποίων θα μπορούσε να συμβάλει στην κατοχύρωση ζωνών που τίθενται υπό αμφισβήτηση από τον «αιώνιο» απειλητικό γείτονα εξ ανατολών. Είναι γνωστό ότι σε πολλά ελληνικά νησιά υπάρχουν ακτές μη προσπελάσιμες από στεριά οι οποίες θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο ενεργειακής εκμετάλλευσης χωρίς να ενοχλείται ο τουρισμός, που στις μέρες μας αποτελεί την ατμομηχανή της οικονομικής ανάπτυξης στη χώρα μας.

Επίσης με τον τρόπο αυτό θα μπορούσε να δημιουργηθεί ένα νέο είδος «τεχνολογικού» τουρισμού που θα προσελκύει ερευνητές, επιστήμονες από ερευνητικά τεχνολογικά ιδρύματα, πανεπιστήμια από όλο τον κόσμο, προκειμένου να δουν τις εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας. Πλέον των παραπάνω το σημαντικότερο αποτέλεσμα σε μια τέτοια κατάσταση θα ήταν η ενεργειακή αυτονομία και ανάπτυξη των ελληνικών απομονωμένων νησιών της χώρας μας που σε συνδυασμό με τεχνικές αφαλάτωσης νερού και τη συμβολή της αιολικής ενέργειας θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ενεργειακή αυτάρκεια.

Βασική προέκταση μιας τέτοιας πολιτικής θα ήταν η δημιουργία πολλών νέων θέσεων εργασίας για Έλληνες μηχανικούς και τεχνολόγους διαφόρων κατηγοριών που θα μπορούσαν να απασχοληθούν στην πατρίδα, αντί να παίρνουν το δρόμο της ξενιτιάς όπως έχει συμβεί στα χρόνια της δεκαετούς οικονομικής κρίσης 2008 – 2018 που έπληξε τις ελληνικές οικογένειες, οι οποίες είδαν τα καλύτερα μυαλά να φεύγουν στο εξωτερικό και να γίνονται αντικείμενο εκμετάλλευσης από αυτούς που έφεραν την κρίση στη χώρα μας (Γερμανία, Γαλλία) έχοντας δαπανήσει μηδενικούς πόρους για την εκπαίδευση των «έτοιμων» επιστημόνων που τέθηκαν στη δούλεψή τους.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ Κυματική Ενέργεια και Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης – Μετατροπής Θαλασσίων Κυμάτων
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

ΜΟΥΤΣΑΤΣΟΣ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ
ΠΡΟΣΚΕΦΑΛΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ





Βιβλιογραφία

1. Αθανασούλης Γ., και Σκασουρλής Ε. (1992). *Άτλας Ανέμου και Κύματος Βορειοανατολικής Μεσογείου Θαλάσσης*. Αθήνα: Ε.Μ.Π.
2. Κούρτζης Θ. Χρήστος (2013), «Αριθμητική μοντελοποίηση και διερεύνηση λειτουργίας και ενεργειακής απόδοσης μη – εμβολοφόρου αντλητικής διάταξης για ανάκτηση κυματικής ενέργειας με σύστημα πλωτήρα και εμβυθισμένου κατακόρυφου σωλήνα.» Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Τομέας Ρευστών
3. Μανάλης Αντώνιος Ευάγγελος (2012), «Κυματική και Ωκεάνια Ενέργεια – Σημερινή πραγματικότητα και μελλοντικές προοπτικές» Πτυχιακή Εργασία, ΤΕΙ ΚΑΒΑΛΑΣ, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Ηλεκτρολογίας
4. Μαρτίν – Φερνάντεζ Στεφάνια, (2014), «Η εφαρμογή της κυματικής ενέργειας στην παραγωγή της συνολικής απαιτούμενης ενέργειας» Πτυχιακή Εργασία ΤΕΙ Πειραιά, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστικών Συστημάτων,
5. Ντάβαλης Γεώργιος (2016) «Κυματική Ενέργεια: Τεχνολογίες Εκμετάλλευσης και Ελληνικό Κυματικό Δυναμικό» Διπλωματική Εργασία Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας.
6. Σουκισιάν, Τ., Χατζηνάκη, Μ., Κορρές, Γ., Παπαδόπουλος, Α., Κάλλος, Γ., και Αναδρανιστάκης Ε. (2007). *Άτλας Ανέμου και Κύματος των Ελληνικών Θαλασσών*. Ελ. Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών, 300 σελ
7. Phillips, O.M. (1957). On the generation of waves by turbulent wind. *Journal of Fluid Mechanics*. 2(5): 417–445.
8. Miles, J.W. (1960). On the Generation of Surface Waves by Turbulent Shear Flows. *Journal of Fluid Mechanics, Vol. 7, Pt. 3*, pp. 469-478.
9. Dean, R.G., Dalrymple, R.A. (2004). *Coastal Processes with Engineering Applications*. ISBN 0-511-03791-0 eBook, Cambridge University Press.
10. Holthuijsen, L.H. (2007). *Waves in oceanic and Coastal waters*. Cambridge University Press, ISBN-13 978-0-511-27021-5 (eBook).
11. Kamphuis, J.W. (2000). *Introduction to Coastal Engineering and Management*, Advanced Series on Ocean Engineering: Volume 16, World Scientific Publishing Co.
12. Kana, T.W., White, T.E. and McKee, P.A. (2004). Management and engineering guidelines from groin rehabilitation. *Journal of Coastal Research, SI 33*, p. 57-82
13. Phillips, O.M. (1966, 1977). *Dynamics of the upper ocean*. Cambridge: Cambridge University Press.
14. Reeve, D., Chadwick, A. and Fleming, Ch. (2004). *Coastal Engineering, Processes, theory and design practice*. Spon Press, ISBN 0-203-64735-1 Master e-book ISBN.
15. U.S. Army Corps of Engineers, (2002). *Coastal Engineering Manual*. Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
16. US Army Corps of Engineers, (1992). *Coastal groins and nearshore breakwaters. Engineering Manual*. Report EM 1110-2-1617



Ιστοσελίδες σχετικές.

- Wave Dragon, www.wavedragon.net
- Waveroller, www.aw-energy.com
- WaveStar, www.wavestarenergy.com
- PELAMIS, www.pelamiswave.com
- Oyster, www.aquamarinepower.com
- OPT Powerbuoy, www.oceanpowertechologies.com
- Limpet, www.wavegen.co.uk
- CETO, www.carnegiewave.com
- AWS converter, www.awsocan.com
- OWEC, www.owec.com
- DEXA, <http://www.dexawave.com/index.php?page=1>
- Leancon, <http://www.leancon.com>
- Poseidon's Organ, <http://www.poseidonorgan.com/>
- AquaBuoy, <http://peswiki.com/index.php/Directory:AquaBuOY>
- Finavera, <http://www.finavera.com/en/home>
- <http://www.sde.co.il/energy.html>
- <http://www.cwavpower.com/index.html>
- Wave-Roller, <http://www.aw-energy.com/index.html>
- BioWAVE, <http://www.biopowersystems.com/index.html>
- Oceanlinx, <http://www.oceanlinx.com/default.asp>
- CES, <http://www.oceanmotion.ws/>
- OWEC, <http://www.owec.com/index.html>
- Sperboy, <http://www.sperboy.com/>
- SyncWave, <http://www.syncwaveenergy.com/index.html>
- SSG, <http://www.waveenergy.no/index.htm>
- Waveberg, <http://waveberg.com/>
- www.wavesenergy.com
- www.energypress.gr
- www.ecocrete.gr
- www.allaboutenergy.gr/
- www.alternative-energy-news.info
- www.aquaret.com
- www.dpenergy.com
- <http://www.thinkglobalgreen.org/WAVEPOWER.html>
- <http://www.cres.gr> Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας
- <http://www.offshorecenter.dk/> . Peter Blach, Newsletter ON/OFF 10, Offshore Center Denmark, May 2007,
- OPT PowerBuoy, <http://www.oceanpowertechologies.com/tech.htm>
- WaveMaster, <http://www.oceanwavemaster.com/about.htm>
- OWEL, <http://www.owel.co.uk/print/background.htm>
- LabBuoy, <http://www.cres.gr/kape/pdf/Labbuoy.pdf>
- AWS Converter, <http://www.waveswing.com/>
- CETO, <http://www.ceto.com.au/home.php>
- SDE, <http://www.sde.co.il/energy.html>



Trotman Unit, <http://www.trotmanunitwavepower.com/index.html>
Float Wave Electric Power System, <http://www.atecom.ru/we/>
Oyster, <http://www.aquamarinepower.com/>
Brandl Generator, http://brandlmotor.de/brandlgenerator_eng.htm
Floating Wave Generator, <http://www.gedwardcook.com/wavegenerator.html>
FO³, http://www.sintef.no/content/page1____3757.aspx,
<http://www.seewec.org/index.html> McCabe Wave Pump,
http://www.ocsenergy.anl.gov/documents/docs/OCS_EIS_WhitePaper
www.allaboutenergy.gr/Gaianthrakes.html