



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Δ.Π.Μ.Σ. «ΝΑΥΤΙΚΗ & ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ & ΕΠΙΣΤΗΜΗ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΚΙΖΑΡΗ ΝΙΚΟΛΑ

«Εκτίμηση κυματικού δυναμικού στις ελληνικές θάλασσες»



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. ΤΑΚΒΟΡ ΣΟΥΚΙΣΙΑΝ
ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Καθ. ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΜΑΥΡΑΚΟΣ

Αθήνα, 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Δ.Π.Μ.Σ. «ΝΑΥΤΙΚΗ & ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ & ΕΠΙΣΤΗΜΗ»

«Εκτίμηση κυματικού δυναμικού στις ελληνικές θάλασσες»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Γκιζάρη Νικόλ

Συνεπιβλέποντες: Δρ. Τακβόρ Χ. Σουκισιάν
Ερευνητής ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε

Σπυρίδων Α. Μαυράκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την2012

(Υπογραφή)

.....
Δρ. Τακβόρ Χ. Σουκισιάν
Ερευνητής ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε

(Υπογραφή)

.....
Σπυρίδων Α. Μαυράκος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

(Υπογραφή)

.....
Κων/νος Μπελιμπασάκης
Αναπλ.Καθηγητής Ε.Μ.Π

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σήμερα, στην Ευρώπη περίπου το 20% της ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) κυρίως λόγω της απεριόριστης διαθεσιμότητά τους, αλλά και τη συμβολή τους στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία ασχολείται με μια νέα και άγνωστη κυρίως στη χώρα μας, ανανεώσιμη πηγή ενέργειας με σημαντικές προοπτικές εκμετάλλευσης στο άμεσο μέλλον σε ολόκληρο το κόσμο. Πρόκειται για την ενέργεια που περιέχεται στους θαλάσσιους κυματισμούς. Η Ελλάδα η οποία διαθέτει μεγάλη ακτογραμμή, μήκους περίπου 16.000Km, το υψηλό αιολικό δυναμικό πάνω από το Αιγαίο Πέλαγος δημιουργεί αρκετά έντονη κυματική δραστηριότητα στην περιοχή, με εκτιμώμενες μέσες ετήσιες τιμές κυματικής ισχύος ανά μέτρο μετώπου κύματος της τάξης των 4-11 kW/m (Clement Alain et al., 2002). Το κεφάλαιο 1 αποτελείται από κάποιες εισαγωγικές πληροφορίες σχετικά με την προέλευση και την δημιουργία των θαλάσσιων κυμάτων καθώς και με τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της ενέργειας. Στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφ.2) αναφέρεται η ιστορική αναδρομή της κυματικής ενέργειας. Η ιδέα για την εκμετάλλευση του θαλάσσιου κυματισμού δεν είναι νέα. Η πρώτη ευρεσιτεχνία για την κατασκευή συσκευής που θα εκμεταλλεύεται την κυματική ενέργεια, έγινε από τον Γάλλο μηχανικό Pierre Girard, το 1799. Στην Ευρώπη η εντατική έρευνα και η μελέτη για την ανάπτυξη της κυματικής ενέργειας άρχισε, μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση, το 1973. Από το 1990, υπήρξε πραγματική αναγέννηση στον τομέα της κυματικής ενέργειας, η οποία έχει οδηγηθεί τα τελευταία χρόνια, πιο κοντά στην εμπορευματοποίηση από ποτέ άλλοτε. Οι κυματικές συσκευές για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας κατηγοριοποιούνται με βάση την τοποθεσία εγκατάστασης τους και χαρακτηρίζονται ως: επάκτιες, παράκτιες ή ως υπεράκτιες. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται μερικές συσκευές κυματικής απόσπασης και κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους (6 γνωστοί τύπου λειτουργίας). Πολλές από αυτές τις τεχνολογίες έχουν εξελιχθεί αρκετά, άλλες βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο και άλλες έχουν φτάσει στο σημείο εμπορικής εκμετάλλευσης. Στο κεφάλαιο 4, παρουσιάζεται η θεωρητική εκτίμηση του κυματικού δυναμικού τόσο σε απλό αρμονικό κυματισμό που αποτελεί την απλούστερη μαθηματική προσέγγιση για την μελέτη των δισδιάστατων επιφανειακών κυματισμών βαρύτητας, «γραμμική θεωρία κυματισμών- Αίγυ» όσο και σε ρεαλιστικές καταστάσεις θάλασσας, εισάγοντας την έννοια του μοντέλου τυχαίας φάσης. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση του κυματικού δυναμικού στις ελληνικές θάλασσες. Αυτή η προσπάθεια εκτίμησης πραγματοποιείται λαμβάνοντας μεταγενέστερες εκτιμήσεις (hindcast δεδομένα) από το κυματικό μοντέλο WAM, αλλά και από επιτόπιες μετρήσεις του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ. Στο κεφάλαιο 5, περιγράφεται τόσο το σύστημα ΠΟΣΕΙΔΩΝ, όσο και ο τρόπος λειτουργίας του κυματικού μοντέλου, ενώ προσδιορίζεται και η βασική σχέση που θα χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του κυματικού δυναμικού. Στο κεφάλαιο 6, παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού του κυματικού δυναμικού στις ελληνικές θάλασσες, χρησιμοποιώντας hindcast δεδομένα για μια περίοδο 10 ετών (1995-2004). Τα δεδομένα αυτά έχουν παραχθεί από αριθμητικά μοντέλα υψηλής χρονικής και χωρικής ανάλυσης και παρουσιάζονται στον βιβλίο “Ατλαντας ανέμου και κύματος των ελληνικών θαλασσών”(Soukissian et al,2007; Soukissian et al.,2008). Στην συνέχεια, από τις επιτόπιες μετρήσεις που λαμβάνονται μέσω του δικτύου παρακολούθησης ΠΟΣΕΙΔΩΝ και είναι υπό την μορφή μετρήσεων μακρών χρονοσειρών καλύπτοντας μια περίοδο από 5 έως 12 χρόνια (1999-2011), εκτιμάται το κυματικό δυναμικό 5 συγκεκριμένων πλωτών μετρητικών σταθμών (buoys), οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι σε περιοχές βαθέων υδάτων. Η εκτίμηση του κυματικού δυναμικού πραγματοποιείται με την χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Matlab και παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα από αυτές τις μετρήσεις. Στο επόμενο κεφάλαιο (Κεφ.7) ακολουθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων του κυματικού μοντέλου με τα αποτελέσματα από τις επιτόπιες μετρήσεις, με σκοπό να γίνει μια λεπτομερή ανάλυση του κυματικού δυναμικού των ελληνικών θαλασσών. Τέλος, στο κεφάλαιο 8 συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν και αναφέρονται τα κυριότερα συμπεράσματα από αυτήν την μελέτη. Το παράρτημα Α, αποτελείται από ένα συγκεντρωτικό πίνακα των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα θαλάσσια κύματα, χωρισμένους ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας και την περιοχή εγκατάστασης, μαζί με τα

βασικότερα χαρακτηριστικά και τις πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν για τη κάθε μία ξεχωριστά. Συμπερασματικά, η εκμετάλλευση του κυματικού δυναμικού στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία και η ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων, θα μπορούσε να αποτελέσει μια βιώσιμη και τεχνολογικά εφικτή λύση για την ηλεκτροδότηση της χώρας από Α.Π.Ε..

ABSTRACT

Currently in Europe approximately 20% of its electricity comes from renewable energy sources (RES); mainly because of their unlimited availability and contribution to the reduction of atmospheric pollution. This work deals with this relatively new and unfamiliar in Greece renewable energy source which simultaneously has significant potential for exploitation in the near future worldwide: the energy contained in ocean waves. Greece, with an approximately 16.000 km long coastline, has a high wind potential over the Aegean Sea which gives rise to relatively intense wave climate of 4–11 kW/m annual average power (Clement Alain et al., 2002). Chapter 1 consists of introductory information about the origin and generation of sea waves and the main advantages of this particular energy source. In Chapter 2 the history of wave energy is described. The idea of converting the energy of ocean surface waves is not new. The first patent for construction device that exploits the wave energy was made by French engineer Pierre Girard, in 1799. In Europe intensive research and development study of wave energy conversion began, however, after the dramatic increase in oil prices in 1973. Since 1990, there was a real renaissance in the field of wave energy, which has led in recent years, closer to commercialization than ever before. The wave devices for the exploitation of wave energy are categorized by their installation area as: onshore, coastal or offshore. In Chapter 3 some wave energy converters are presented and categorized according to how they operate (6 known types of operation). Many of these technologies have evolved considerably, others are experimental, and some have reached the point of commercialization. Chapter 4 presents the theoretical estimation of the wave potential both for a simple harmonic wave which is regarded as the simplest mathematical approach to study two-dimensional surface gravity waves (linear wave theory), as well as for a real sea-state, introducing the concept of the model random phase. The assessment of the wave potential in the Greek seas is taking place using hindcast data from the wave model WAM and in situ wave measurements obtained through the POSEIDON system. In Chapter 5, the POSEIDON system is described along with the WAM wave model. In Chapter 6 the way for estimating the wave potential in the Greek seas is presented, using hindcast data for a period of 10 years (1995-2004). The data were derived from numerical wave simulation models of high spatial and temporal resolution and are published in the form of a Wind and Wave Atlas (Soukissian et al., 2007; Soukissian et al., 2008). Moreover, using in-situ wave measurements obtained through POSEIDON marine monitoring network that are in the form of long time series covering a period from 5 to 12 years (1999-2011), the wave potential at 5 specific deep-water locations, is estimated. The estimation of the wave potential is carried out using the Matlab programming and the numerical results of these measurements are presented. In the next chapter (Chap.7) a comparison of the results obtained through the wave model with results obtained from in-situ wave measurements is attempted. Finally, Chapter 8 summarizes the obtained numerical results and the main conclusions drawn from this study. Annex A consists of a compilation of technologies producing electricity from sea waves, divided according to the operating mode and installation area, along with the main features of the engravings and the information gathered for each one separately. In conclusion, the use of the wave potential in the Greek seas, according to the results presented in this work and the development of hybrid systems of wind and wave energy could be a technologically viable solution for the electrification of Greece by RES.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη με επιβλέποντα τον Δρ. Τακβόρ Χ. Σουκισιάν και μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής τον Καθ. Σπυρίδωνα Μαυράκο και Αναπλ. Καθηγητή Κων/νο Μπελιμπασάκη του τμήματος Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Η εκπόνηση της εργασίας πραγματοποιήθηκε στις εγκαταστάσεις του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσιών Ερευνών στην Ανάβυσσο Αττικής. Ειδικά τα δεδομένα που αφορούν το κυματικό δυναμικό παραχωρήθηκαν, για χρήση στη παρούσα διπλωματική εργασία, από το Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας του ΕΛ.ΚΕ.Θ.Ε..

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Τακβόρ Χ. Σουκισιάν για την συνεργασία και τη πολύτιμη καθοδήγηση του. Η συνεργασία του υπήρξε καθοριστική για την επιτυχή ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Τέλος ευχαριστώ την οικογένεια μου για την ηθική και υλική στήριξη που μου παρέχει όλα αυτά τα χρόνια.

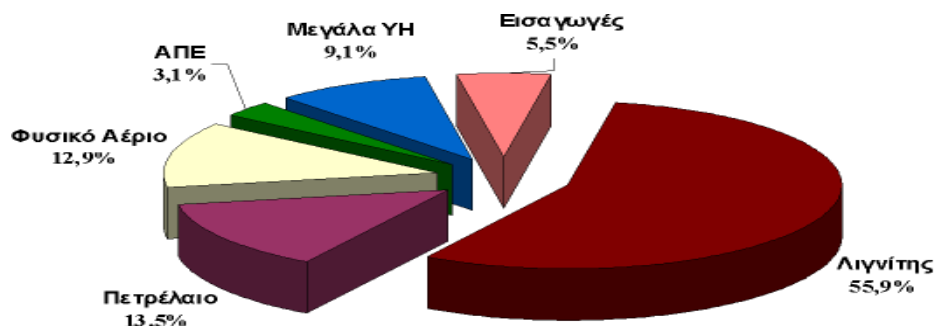
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή
2. Ιστορική αναδρομή στην χρήση κυματικής ενέργειας
3. Συσκευές εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας
 - 3.1. Εξασθενητής κυματισμών
 - 3.2. (Αξονοσυμμετρικός) Σημειακός Απορροφητήρας
 - 3.3. Ταλαντευόμενη υδάτινη στήλη
 - 3.4 Μετατροπείς Οριζόντιας Κυματικής Παλινδρόμησης
 - 3.5. Υποθαλάσσια συσκευή διαφορικής υδροστατικής πίεσης
 - 3.6. Συσκευή υπερχείλισης
 - 3.7. Άλλες συσκευές
4. Θεωρητική εκτίμηση κυματικού δυναμικού
 - 4.1. Εκτίμηση κυματικού δυναμικού για απλούς αρμονικούς κυματισμούς
 - 4.2. Εκτίμηση κυματικού δυναμικού σε ρεαλιστικές καταστάσεις θάλασσας
5. Μεθοδολογία και δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν
 - 5.1. Κυματικά δεδομένα (ΠΟΣΕΙΔΩΝ)
 - 5.2. Το κυματικό μοντέλο (Wave Model)
 - 5.3. Μέθοδος εκτίμησης κυματικού δυναμικού
6. Εκτίμηση κυματικού δυναμικού στις ελληνικές θάλασσες και αριθμητικά αποτελέσματα
 - 6.1. Εκτίμηση κυματικού δυναμικού από δεδομένα hindcast
 - 6.2. Εκτίμηση κυματικού δυναμικού από επιτόπιες μετρήσεις
 - 6.2.1. Ανάλυση κυματικών δεδομένων
7. Σύγκριση μετρήσεων με αποτελέσματα κυματικού μοντέλου
8. Συμπεράσματα
9. Βιβλιογραφία
10. Παράρτημα Α: Συγκεντρωτικός πίνακας τεχνολογιών

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ενέργεια αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινής μας ζωής. Η θερμική, η ηλεκτρική και η κινητική ενέργεια είναι ορισμένες μορφές ενέργειας που χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο επί καθημερινής βάσης. Είναι λοιπόν αποδεκτό, ότι η αξιοποίηση της ενέργειας διασφαλίζει ένα υψηλό βιοτικό επίπεδο και η έλλειψή της θα είχε αρνητικές συνέπειες για την ανάπτυξη της σημερινής κοινωνίας. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που χρησιμοποιείται παγκοσμίως προέρχεται από τα ορυκτά καύσιμα. Τα ορυκτά καύσιμα βρίσκονται μέσα στο ανώτερο στρώμα της γήινης κρούστας. Είναι γενικά αποδεκτό ότι σχηματίστηκαν από τα απολιθωμένα υπολείμματα νεκρών ζώων και φυτών από την έκθεση τους σε θερμότητα και πίεση στο γήινο φλοιό επί εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια. Τα ορυκτά καύσιμα περιλαμβάνουν το πετρέλαιο, τον άνθρακα, το φυσικό αέριο, τον λιγνίτη και την τύρφη και αποτελούν καλή ενεργειακή ύλη γιατί με την καύση τους παράγουν μεγάλα ποσά ενέργειας.

Στη χώρα μας, η μόνη αξιοσημείωτη εγχώρια πηγή ορυκτών καυσίμων είναι ο λιγνίτης. Παρόλο που ο ελληνικός λιγνίτης είναι ένα φτωχής ποιότητας καύσιμο, αποτελεί την κύρια ενεργειακή πηγή της χώρας και χρησιμοποιείται σχεδόν εξ' ολοκλήρου στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Ο λιγνίτης είναι οργανικής προελεύσεως πέτρωμα, του οποίου το κύριο στοιχείο είναι ο άνθρακας. Περιέχει επίσης, υδρογόνο, οξυγόνο και άζωτο. Στην Ελλάδα ορυχεία λιγνίτη βρίσκονται στην περιοχή της Πτολεμαίδας, Αμύνταιου, Φλώρινας, Μεγαλόπολης, Ελασσόνας, Αλιβέρι Εύβοιας και Δράμας. Τα βιομηχανικά αξιοποιήσιμα κοιτάσματα λιγνίτη υπολογίζονται σε 3,2 δισεκατομμύρια τόνους ή 450 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου. Τα συνολικά γεωλογικά αποθέματα λιγνίτη στη χώρα μας ανέρχονται σε 5 δισεκατομμύρια τόνους και υπολογίζεται ότι επαρκούν για περισσότερο από 45 χρόνια (www.dei.gr).



Σχήμα 1: Παραγωγή ηλεκτρισμού στην Ελλάδα ανά τύπο μονάδων (2005).

Πηγή: <http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi31.html>

Η αύξηση του πληθυσμού της γης, αλλά και η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, οδήγησαν σε ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας, με τη μεγαλύτερη αυξητική τάση να παρατηρείται στις αναπτυσσόμενες χώρες (Ινδία, Κίνα, κλπ). Η παραγωγή ενέργειας από την καύση ορυκτών καυσίμων, η οποία χρησιμοποιείται για ηλεκτρισμό, θέρμανση και μεταφορές, έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στις συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα από κάθε άλλη ανθρώπινη δραστηριότητα. Είναι πολύ πιθανόν μελλοντικά να παρατηρηθεί σημαντική κατανάλωση ή ακόμα ο ρυθμός κατανάλωσης να είναι τόσο γρήγορος που οι γεωτρήσεις και οι εξορύξεις να μην επαρκούν για την κάλυψη της ζήτησης.

Εκτιμάται πως η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων παγκοσμίως για το 2008 ήταν 33,5% πετρέλαιο, 26,8% άνθρακας και 20,9% φυσικό αέριο και καλύπτουν το 81,2% των

ενεργειακών αναγκών (Energy in Sweden, 2010). Οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας καλύπτουν το 18,8%, όπως φαίνεται στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1), με μόνο 12,8% να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας:

Πηγή	Τοις εκατό
Πετρέλαιο	33,5%
Άνθρακα	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

Οι ορυκτές καύσιμες ύλες δημιουργούνται μέσω υπόγειας θέρμανσης και πίεσης, χρειάζονται εκατομμύρια χρόνια για να σχηματιστούν και εξαντλούνται με πολύ ταχύτερο ρυθμό από τον ρυθμό με τον οποίο σχηματίζονται. Γι' αυτό το λόγο, τα ορυκτά καύσιμα θεωρούνται μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η επιτακτική ανάγκη για άμεση μείωση τέτοιων μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι δεδομένη. Πρώτος λόγος της άμεσης αυτής ανάγκης, είναι οι κατά καιρούς διεθνείς κρίσεις πετρελαίου και οι ξέφρενες πορείες της τιμής του. Δεύτερος λόγος είναι η ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου που οδήγησε στις κλιματικές αλλαγές και η ανάγκη για τον άμεσο περιορισμό των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, αζώτου και άλλων αερίων που ελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα, όπως νιτρικά, θειικά ή ανθρακικά οξέα, τα οποία είναι υπεύθυνα για τον σχηματισμό της όξινης βροχής (www.ypeka.gr). Η τεχνολογία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε.) αποτελεί μία βιώσιμη και τεχνολογικά εφικτή λύση, γιατί παράγει ενέργεια από μετατροπή φυσικών πόρων σε χρήσιμες μορφές ενέργειας (Fengzhen C. et al., 2007).

Οι Ευρωπαίοι ηγέτες το 2008 συμφώνησαν ότι μέχρι το 2020, θα πρέπει να μειώσουν την εξάρτησή τους από τα ορυκτά καύσιμα, το 20% της ενέργειας των κρατών τους να παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και να μειώσουν τις εκπομπές ρύπων τουλάχιστον κατά 20% σε σχέση με το 1990 (www.ypeka.gr). Στις 13 Δεκεμβρίου 2011, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή παρουσίασε τον Ενεργειακό Οδικό Χάρτη για το 2050, που περιλαμβάνει σειρά σεναρίων για την επίτευξη 85% μείωσης των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου στον ενεργειακό τομέα, στο πλαίσιο της συμφωνίας για συνολική μείωση των εκπομπών κατά 80-95% προκειμένου να αποτραπούν οι χειρότερες επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών (www.energypress.gr; <http://ec.europa.eu>)

Ειδικά για την Ελλάδα, ο στόχος για τις εκπομπές αερίων ρύπων του θερμοκηπίου είναι μείωση κατά 4% στους τομείς εκτός εμπορίας σε σχέση με τα επίπεδα του 2005 και 18% διεύρυνση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση (Υπουργείο Ανάπτυξης, 2007). Η Ελληνική κυβέρνηση στο πλαίσιο υιοθέτησης συγκεκριμένων αναπτυξιακών και περιβαλλοντικών πολιτικών, με το Νόμο 3851/2010 τον Ιούνιο του 2010, προχώρησε στην αύξηση του εθνικού στόχου συμμετοχής των ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας στο 20%, ο οποίος και εξειδικεύεται σε 40% συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, 20% σε ανάγκες θέρμανσης-ψύξης και 10% στις μεταφορές. (www.ypeka.gr). Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2) συνοψίζεται το ποσοστό χρήσης Α.Π.Ε το 2005 και το απαιτούμενο αυτό ποσοστό το 2020 ανά χώρα.

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

Με τον όρο Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, εννοούμε μορφές ενέργειας που προέρχονται από φυσικούς διαθέσιμους πόρους οι οποίοι ικανοποιούν τις ακόλουθες απαιτήσεις: i) βρίσκονται σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον, ii) δεν εξαντλούνται και iii) συνεχώς ανανεώνονται. Για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση και μπορούν να μετατρέπονται σε ηλεκτρική ή θερμική ενέργεια. Οι μορφές των Α.Π.Ε είναι:

1. Αιολική Ενέργεια
2. Ηλιακή Ενέργεια (Θερμικά Ηλιακά, Φωτοβολταϊκά)
3. Υδροηλεκτρική ενέργεια
4. Στοιχεία Καυσίμου (υδρογόνο)
5. Ενέργεια από την θάλασσα (υπεράκτια αιολική ενέργεια, κυματική ενέργεια, θαλάσσια ρεύματα-παλιρροιακά και μη-, παλιρροιακή ενέργεια, ενέργεια από θερμοκρασιακές διαφορές του νερού των ωκεανών)
6. Γεωθερμική Ενέργεια
7. Βιομάζα

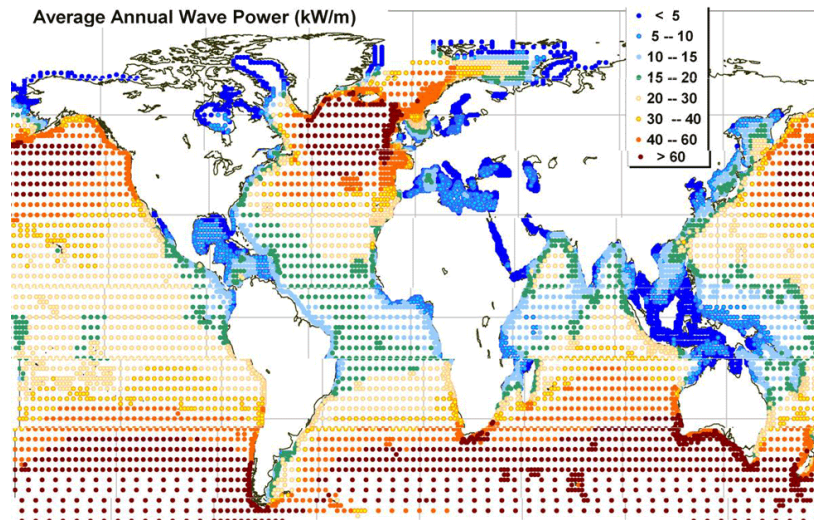
Μία μορφή Α.Π.Ε, η οποία μέχρι σήμερα ελάχιστα έχει αξιοποιηθεί, είναι η ενέργεια των θαλάσσιων κυματισμών. Η ιδέα της μετατροπής της ενέργειας των επιφανειακών θαλάσσιων κυματισμών σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια είναι αρκετά παλιά. Όμως οι εντατικές

προσπάθειες για το σκοπό αυτό άρχισαν μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση, το 1973. (Pontes et al., 2001, Clement Alain et al,2002, Falnes, 2007)

Η κυματική ενεργεία είναι η μορφή ενέργειας που προκύπτει από την κινητική ενέργεια των κυματισμών. Οι θαλάσσιοι κυματισμοί είναι το μέσον διάδοσης μιας μορφής ενέργειας από ένα σημείο σε ένα άλλο και δημιουργούνται από μια δύναμη διέγερσης. Η ενέργεια των κυμάτων παράγεται κυρίως από την ταλάντωση τους στην επιφάνεια της θάλασσας. Οι κυματισμοί δημιουργούνται από την μεταφορά ενέργειας από τον άνεμο που πνέει πάνω από τις υδάτινες μάζες (ανεμογενή κύματα) και διαταράσσει την επιφάνεια δημιουργώντας κορυφές και κοιλάδες που διαδίδονται κατά την διεύθυνση πνοής του. Η μεταφορά της ενέργειας από τον άνεμο καθορίζει το μέγεθος των κυματισμών και αυτό εξαρτάται από την ένταση (ταχύτητα), τη διάρκεια πνοής των ανέμων καθώς και το ελεύθερο μήκος πνοής (Harrison et al., 2005). Το καλύτερο κυματικό δυναμικό παρουσιάζεται στην εύκρατη ζώνη (γεωγραφικό πλάτος μεταξύ 30° και 60° και στα δύο ημισφαίρια) με κυματική ισχύ μεταξύ 20 – 70 kW/m μετώπου του κυματισμού ή και υψηλότερη (CRES, 2002). Ιδιαίτερα στις ακτές της δυτικής Ευρώπης (μέση ισχύ της τάξης των 40-70 kW/m ανά μέτρο μετώπου κύματος), ανοικτά των ακτών του Καναδά και των ΗΠΑ, καθώς και τις νότιες ακτές της Αυστραλίας και της Ν. Αμερικής. Βασική προϋπόθεση χρήσης αυτής της ενέργειας είναι η κατασκευή συσκευών ικανών να μετατρέπουν την κινητική ενέργεια σε ηλεκτρική.

Ο θαλάσσιος κυματισμός συγκεντρώνει τα περισσότερα πλεονεκτήματα που χαρακτηρίζουν τις ΑΠΕ: χαμηλοί δείκτες ρύπανσης σε επίπεδο κύκλου ζωής, αποκέντρωση της παραγωγής ενέργειας, ανεξάρτηση από εισαγωγές ορυκτών καυσίμων, δεν παράγονται απόβλητα, προοπτικές οικονομικής ανάπτυξης σε απομακρυσμένες ή/και υποβαθμισμένες περιοχές, δημιουργία θέσεων εργασίας, ο κυματισμός στην ανοιχτή θάλασσα μπορεί να προβλεφθεί σχετικά ικανοποιητικά και ακόμη κι όταν σταματήσει η πνοή του ανέμου και οι ανεμογεννήτριες πάψουν να λειτουργούν, ο κυματισμός της θάλασσας μπορεί να διαρκέσει για αρκετές ακόμη ώρες. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις (ακουστική ή οπτική όχληση, επιπτώσεις σε χλωρίδα και πανίδα) από την εγκατάσταση τεχνολογιών κυματικής ενέργειας θεωρούνται ήπιες (Iglesias et al., 2009). Το βασικό μειονέκτημα της κυματικής ενέργειας είναι το γεγονός ότι η κυματική ενέργεια ποικίλλει σημαντικά στα διάφορα μέρη του κόσμου (www.wavesenergy.com). Λόγω των τυχαίων θαλάσσιων κυματισμών ως προς το ύψος, τη φάση και την διεύθυνσή τους, είναι δύσκολο να επιτευχθεί μέγιστη απόδοση μιας συσκευής σε όλο το εύρος των συχνοτήτων διέγερσής της από τους θαλάσσιους κυματισμούς (Μαυράκος, 2007). Ένα ακόμα μειονέκτημα των συσκευών κυματικής ενέργειας είναι το υψηλό κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος (Λεμονής, 2002).

Οι θαλάσσιες μάζες που καλύπτουν το 75% της επιφάνειας του πλανήτη είναι μια τεράστια αποθήκη ενέργειας. Τα θαλάσσια κύματα, είναι μια ανεξάντλητη πηγή, όπως όλες οι Α.Π.Ε. και παρουσιάζουν την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα. Υπολογίζεται ότι η αξιοποίηση μόλις του 1% του κυματικού δυναμικού του πλανήτη θα κάλυπτε στο τετραπλάσιο την παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση. Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό για τα κράτη μέλη της Ε.Ε. υπολογίζεται συνολικά σε 150-230 TWh/έτος. Στις ακτές των Ευρωπαϊκών χωρών της Μεσογείου το υψηλότερο κυματικό δυναμικό (υποτίθεται ότι) βρίσκεται στις ελληνικές θάλασσες και κυμαίνεται μεταξύ 4 – 11 kW/m (Clement Alain et al., 2002).



Εικόνα 1: Παγκόσμιο ετήσιο κυματικό δυναμικό
Πηγή: www.wrsc.org/presentation/china-energy-geography

Σκοπός εργασίας:

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, γίνεται μια προσπάθεια εκτίμησης του κυματικού δυναμικού στις ελληνικές θάλασσες, χρησιμοποιώντας hindcast δεδομένα για μια περίοδο 10 ετών (1995-2004). Τα δεδομένα αυτά έχουν παραχθεί από αριθμητικά μοντέλα υψηλής χρονικής και χωρικής ανάλυσης και παρουσιάζονται στο βιβλίο “Ατλαντας ανέμου και κύματος των ελληνικών θαλασσών” (Soukissian et al., 2007; Soukissian et al., 2008). Στην συνέχεια, από τις επιτόπιες μετρήσεις που λαμβάνονται μέσω του δικτύου παρακολούθησης ΠΟΣΕΙΔΩΝ και είναι υπό την μορφή μετρήσεων μακρών χρονοσειρών καλύπτοντας μια περίοδο που κυμαίνεται από 5 έως 12 χρόνια (1999-2011), θα προσδιοριστεί το κυματικό δυναμικό 5 συγκεκριμένων πλωτών μετρητικών σταθμών. Τέλος, ακολουθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων του κυματικού μοντέλου με τα αποτελέσματα από τις επιτόπιες μετρήσεις, με σκοπό να γίνει μια λεπτομερή ανάλυση του κυματικού δυναμικού των ελληνικών θαλασσών.

2. ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ιδέα για την εκμετάλλευση του θαλάσσιου κυματισμού δεν είναι νέα. Η πρώτη ευρεσιτεχνία για την κατασκευή συσκευής που θα εκμεταλλεύεται την κυματική ενέργεια, έγινε από τον Γάλλο μηχανικό Pierre Girard, το 1799 που δεν κατασκευάστηκε όμως ποτέ. Ένα από τα πρώτα και πιο κατατοπιστικά έγγραφα σχετικά με την ενέργεια των κυμάτων παρουσιάστηκε σε συνέδριο της Αμερικανικής Εταιρείας Μηχανολόγων Μηχανικών στο Σαν Φρανσίσκο το 1892 από τον AW Stahl (www.deadalus.gr). Από το 1855 έως το 1973 είχαν κατατεθεί μόνο στο Ηνωμένο Βασίλειο 340 ευρεσιτεχνίες χωρίς αξιόλογα αποτελέσματα. Η συντονισμένη έρευνα όμως στον τομέα αυτό ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1970, μετά την μεγάλη πετρελαϊκή κρίση, όταν διάφορες χώρες της Δυτικής Ευρώπης με ακτές προς τον Αν. Ατλαντικό, όπου εντοπίζονται ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα κυματικού δυναμικού, ξεκίνησαν εντατικές έρευνες για την ανάπτυξη τεχνολογιών εκμετάλλευσης της ενέργειας των κυμάτων (Pontes et al., 2001, Clement Alain et al, 2002, Falnes, 2007).

Διάφορα ερευνητικά προγράμματα με την στήριξη των κυβερνήσεων, στο Ηνωμένο Βασίλειο, την Πορτογαλία, την Ιρλανδία, την Νορβηγία, την Σουηδία και την Δανία, στόχευαν στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας. Οι προσπάθειες που γίνονται στον τομέα της έρευνας και της ανάπτυξης της ενέργειας των κυματισμών έχουν κερδίσει την υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, η οποία, από το 1986, παρακολουθεί αυτή την εξέλιξη που πραγματοποιείται. Από τα μέσα της δεκαετίας του 1990 υπήρξε μια αναγέννηση στον τομέα της κυματικής ενέργειας. Η Επιτροπή το 1993 υποστήριξε το πρώτο συνέδριο για την κυματική ενέργεια στο Εδιμβούργο της Σκωτίας. Η ουσιαστική όμως στήριξη της Επιτροπής ξεκίνησε το 1994 με το τέταρτο πρόγραμμα-πλαίσιο στήριξης (4th FP). Στην συνέχεια, ακολούθησε μια σειρά από διεθνή συνέδρια (Λισσαβόνα, Πορτογαλία, 1995, Πάτρα, Ελλάδα, 1998 και Aalborg, Δανία, 2000), όπου η Επιτροπή συνέβαλε σημαντικά στον συντονισμό των δραστηριοτήτων σε όλη την Ευρώπη. Παρά τις διάφορες απογοητεύσεις, οι συνεχιζόμενες προσπάθειες των χωρών και οι εμπειρίες τους, οδήγησαν την κυματική ενέργεια τα τελευταία χρόνια, πιο κοντά στην εμπορική εκμετάλλευση από ποτέ.

Οι ευρωπαϊκές χώρες με τα υψηλότερα εκμεταλλεύσιμα επίπεδα κυματικής ενέργειας είναι η Νορβηγία, η Σουηδία, η Πορτογαλία, η Μ. Βρετανία, η Ιρλανδία, η Δανία κ.α. με μέσες τιμές κυματικής ενέργειας, η οποία σε ορισμένες περιοχές ξεπερνάει τα 70-80 kW/m σε ετήσια βάση. Συνολικά, το εκμεταλλεύσιμο ενεργειακό δυναμικό κατά μήκος των ακτών των κρατών μελών της Ε.Ε. εκτιμάται σε συνολικά 320-330 GW (Χαβιαρόπουλος et al, 2001). Στις χώρες αυτές διεξάγεται εντατική έρευνα για εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας εδώ και 25 χρόνια περίπου και έχει οδηγήσει στην υλοποίηση πιλοτικών ηλεκτροπαραγωγικών σταθμών ονομαστικής ισχύος 50 - 500 kW.

Στην Νορβηγία παρουσιάζονται ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα κυματικής ενέργειας (400 TWh σε ετήσια βάση). Η έρευνα για την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας ξεκίνησε στην χώρα το 1973, από τον Kjell Budal και τον Johannes Falnes από το Νορβηγικό Ινστιτούτο Τεχνολογίας που σχεδίασαν τον πρώτο σημειακό απορροφητή (Point Absorber), ενώ η κρατική επιχορήγηση ξεκίνησε συστηματικά το 1978 (www.wikipedia.org). Κατά την διάρκεια της δεκαετίας του 1980 αναπτύχθηκαν στην Νορβηγία, δύο παράκτιοι ηλεκτροπαραγωγικοί σταθμοί κυματικής ενέργειας, ο "Multi-Resonant Oscillating Water Column" ισχύος 500 kW και ο "Tapchan" ισχύος 350 kW. Ο "Multi-Resonant Oscillating Water Column" σταμάτησε την λειτουργία του το 1988 έπειτα από σοβαρές ζημιές που υπέστη ενώ η διάταξη TapChan που εγκαταστάθηκε σε ένα νησί κοντά στο Bergen, συνεχίζει να λειτουργεί μέχρι σήμερα, παρέχοντας ηλεκτρική ισχύ στο τοπικό δίκτυο.

Στην Σουηδία εντοπίζονται περιοχές με αξιοποιήσιμους πόρους κυματικής ενέργειας της τάξης 5-10 TWh σε ετήσια βάση. Η έρευνα στον τομέα της κυματικής ενέργειας ξεκίνησε το 1976, ενώ το 1979 ιδρύθηκε η «ερευνητική ομάδα κυματικής ενέργειας». Μέσα στην

δεκαετία του 1980, σημαντικό επίτευγμα της ομάδας αυτής, ήταν το πλωτό σύστημα IPS (Interproject Service) και το σύστημα Hose-Pump.

Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό της Πορτογαλίας εκτιμάται στις 45 TWh ανά έτος, ενώ σημαντικοί είναι και οι εκμεταλλεύσιμοι πόροι στην περιοχή των Αζόρων νήσων στον Ατλαντικό. Η ερευνητική δραστηριότητα στην Πορτογαλία, διεξάγεται από το 1986 με σημαντικό επίτευγμα τον ηλεκτροπαραγωγικό σταθμό τύπου μετατροπέα «ταλαντευόμενης στήλης νερού» (Coastal Oscillating Water Column) στις νήσους Αζόρες, ονομαστικής ισχύος 400 kW, ο οποίος τροφοδοτεί το νησί Pico. Το 2003 η πορτογαλική εταιρεία, Enersis, χρηματοδοτεί πρόγραμμα για την εμπορική εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας (εγκατάσταση συσκευής Pelamis) στην Βόρεια Πορτογαλία, θέτοντας την χώρα πρωτοπόρα στην ενέργεια από τα κύματα.

Το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο κυματικό δυναμικό στην Μ. Βρετανία εκτιμάται στις 1.000 TWh ανά έτος. Τα υψηλά αυτά επίπεδα κυματικής ενέργειας οδήγησαν σε συντονισμένη προσπάθεια για την εκμετάλλευση της, ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1970. Το 1977 ο καθηγητής Stephen Salter του Πανεπιστημίου του Εδιμβούργου κατασκεύασε μια πρωτότυπη συσκευή (Salter's Duck) εκμετάλλευσης της κυματικής ενέργειας, μια προσπάθεια που έληξε σε πρώτη φάση άδοξα το 1983 με τη διαπίστωση ότι η τεχνολογία δεν ήταν ώριμη και το κόστος πολύ υψηλό (www.alternative-energy-news.info/pelamis-offshore-wave-energy-portugal/). Στην συνέχεια, το 1991, στην Μ. Βρετανία αναπτύσσεται, η «ταλαντευόμενη στήλη Limpet», η οποία λειτούργησε με επιτυχία στο νησί Islay της Σκωτίας σε μικρή όμως κλίμακα (75 kW) και το 1996 πραγματοποιήθηκε η πρώτη δοκιμή της αντλίας McCabe ισχύος 140 KW στα ανοικτά της νοτιοδυτικής Ιρλανδίας και αντιμετώπισε προβλήματα με ισχυρά κύματα τα οποία προκάλεσαν τη ρήξη των υδραυλικών σωλήνων. Ένα βελτιωμένο πρωτότυπο με ισχυρότερους σωλήνες δοκιμάστηκε με μεγαλύτερη επιτυχία κατά το 1999. Το 2000 σε απόσταση 300 περίπου μέτρων από την παλαιότερη πειραματική μονάδα της «ταλαντευόμενης στήλης Limpet» έγινε εγκατάσταση μεγαλύτερου σταθμού ισχύος 500 kW "Limpet500" (Clement Alain et al., 2002, Currie R., 2002).

Η Ελλάδα συγκαταλέγεται στις χώρες με αξιοποιήσιμους πόρους κυματικής ενέργειας και σύμφωνα με πρόσφατα επιστημονικά ευρήματα, η περιοχή του Αιγαίου Πελάγους παρουσιάζει από τα υψηλότερα επίπεδα κυματικού δυναμικού στην Μεσόγειο, ενέργεια που μέχρι σήμερα παραμένει ανεκμετάλλευτη. Στην Ελλάδα οι δραστηριότητες που σχετίζονται άμεσα με την εκμετάλλευση της κυματικής ενέργειας αφορούν κυρίως Πανεπιστημιακού επιπέδου έρευνα, δραστηριότητες του τμήματος Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ και του ΕΛΚΕΘΕ (κυρίως για την μοντελοποίηση ή την μέτρηση του κυματικού κλίματος σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο) καθώς και μεμονωμένες δραστηριότητες διαφόρων ιδιωτών (Χαβιαρόπουλος et al, 2001). Στην Ελλάδα ισχύει ήδη από το 2008 το Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικό Σχεδιασμού (ΦΕΚ 2464/3-12-2008) "Σχεδιασμός για Α.Π.Ε", στο οποίο περιλαμβάνονται όροι και προϋποθέσεις για την εκμετάλλευση υπεράκτιων σταθμών αιολικής, όχι όμως για σταθμούς εκμετάλλευσης της θαλάσσιας ενέργειας, για τους οποίους αναμένεται έκδοση σχετικής μελέτης (www.ecocrete.gr).

3. ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι κυματικές συσκευές κατηγοριοποιούνται με βάση την τοποθεσία εγκατάστασης τους και χαρακτηρίζονται ως: επάκτιες (onshore), παράκτιες (coastal ή nearshore) ή ως υπεράκτιες (offshore) (www.aquaret.com).

Επάκτιες Συσκευές (onshore): Οι επάκτιες συσκευές είναι σταθερές ή εγκατεστημένες στην ακτογραμμή, με βασικό πλεονέκτημα την εύκολη εγκατάσταση και συντήρηση τους. Οι επάκτιες συσκευές δεν απαιτούν αγκυροβολήσεις σε μεγάλο βάθος υδάτων (λιγότερα και από 10 μέτρα), ούτε υποθαλάσσια ηλεκτρικά καλώδια μεταφοράς. Ωστόσο, υπόκεινται σε ένα κυματικό καθεστώς σημαντικά μικρότερης ισχύς. Ακόμα, η εγκατάσταση τέτοιων διατάξεων μπορεί να περιοριστεί από τα φυσικά χαρακτηριστικά της ακτής (πχ. γεωλογία ακτογραμμής).

Παράκτιες Συσκευές (coastal): Οι παράκτιες συσκευές εγκαθίστανται σε μέτριο βάθος υδάτων (περίπου 20 με 30 μέτρα), σε απόσταση μέχρι και 500μέτρα από την ακτή. Ο πυθμένας θα πρέπει να είναι ισόπεδος από άμμο, σκύρα ή ιλύ χωρίς κάλυψη από πέτρες για το στρώσιμο ηλεκτρικών καλωδίων μεταφοράς στην ακτή. Οι παράκτιες συσκευές υπόκεινται σε θαλάσσια κύματα υψηλότερης ισχύος σε σχέση με τις επάκτιες συσκευές.

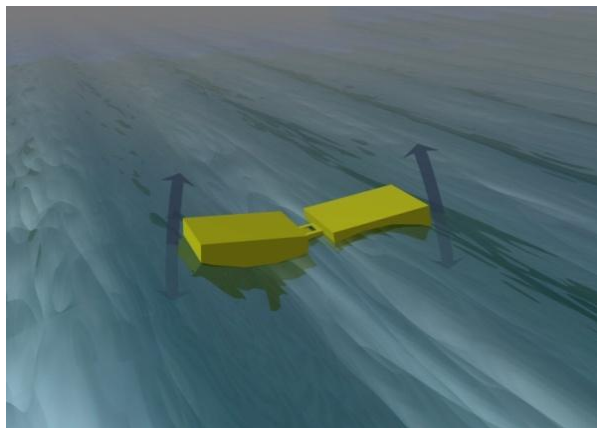
Υπεράκτιες Συσκευές (offshore): Οι υπεράκτιες συσκευές εκμεταλλεύονται τα πιο ισχυρά κυματικά επίπεδα σε μεγάλο βάθος υδάτων (μεγαλύτερο από 40 μέτρα).

Μια άλλη κατηγοριοποίηση των συσκευών κυματικής ενέργειας είναι ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους. Σύμφωνα με αυτή την κατηγοριοποίηση, στην συνέχεια συνοψίζονται τα ως τώρα γνωστά συστήματα απόσπασης κυματικής ενέργειας:

Όλα τα στοιχεία και οι πληροφορίες των τεχνολογιών που παρουσιάζονται παρακάτω προέρχονται από τις ίδιες τις εταιρείες, επομένως η εγκυρότητα των τεχνολογικών και αναπτυξιακών εκτιμήσεων εξαρτάται από τους ίδιους τους πιθανούς χρήστες.

3.1. Εξασθηνητής κυματισμών- Wave attenuator:

Είναι πλωτή συσκευή ευθυγραμμισμένη κάθετα προς το μέτωπο του κύματος. Με τις κινήσεις του κυματισμού, η συσκευή ουσιαστικά επιπλέει επί των διερχόμενων κυματισμών και αποσπά την ενέργεια τους με την επιλεκτική δέσμευση των κινήσεων καθ' όλο το μήκος της (Εικόνα 3.1.1.). Παράδειγμα παράκτιας συσκευής εξασθηνητή κυματισμών είναι η συσκευή Waveberg, ενώ παραδείγματα υπεράκτιων συσκευών είναι Pelamis, Dexa, Crestwing, Floating Wave Generator. Προηγούμενα σχέδια, ήταν η Κυματική Αντλία McCabe Wave Pump, η συσκευή Sea Clam και η Cockerell Raft (στο στάδιο ανάπτυξης της ιδέας-www.aquaret.com).



Εικόνα 3.1.1.: Λειτουργία Εξασθηνητή κυματισμών
Πηγή: www.aquaret.com

The Waveberg

Ο εφευρέτης John Berg μετά από 25 χρόνια έρευνας, παρουσίασε τον μετατροπέα κυματικής ενέργειας Waveberg. Το Waveberg είναι ένα αρθρωτό σύστημα συνδεδεμένων πλωτών σωμάτων με μεγάλη διάρκεια ζωής 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. Υπολογίζεται ότι κάθε μονάδα πλήρους κλίμακας μπορεί να παράγει 100-300kW ηλεκτρικής ενέργειας, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Το βασικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας Waveberg είναι, πως σε αντίθεση με άλλες συσκευές, είναι σχεδιασμένο για να κινείται με τη ροή των κυμάτων, να γλιστράει πάνω τους χωρίς να αντιστέκεται σε αυτά (www.waveberg.com; Previsic, 2004).



Εικόνα 3.1.2.: Το δοκιμαστικό μοντέλο Waveberg πριν από την ρυμούλκηση του στην επιλεγμένη τοποθεσία εγκατάστασης έξω από τις ακτές της Florida το 1996.

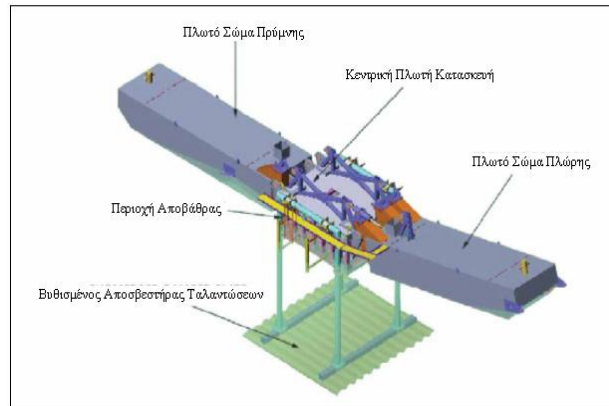
Πηγή: www.waveberg.com

Ένα πρωτότυπο μοντέλο Waveberg μεγάλης κλίμακας πέρασε επιτυχώς μια σκληρή δοκιμή κατά τη διάρκεια μιας καταστροφικής καταιγίδας κοντά στις ακτές της Φλόριντα το 1997. Τα τεράστια κύματα στα οποία υποβλήθηκε, αύξησαν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του, ενώ δεν προκάλεσαν καμιά ζημιά στη συσκευή. 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). Συγκεκριμένα ένα μελλοντικό πρότζεκτ (το 2015) αφορά τη Χαβάη για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας ύψους 1,2MW χρησιμοποιώντας 12 συσκευές Waveberg που θα τροφοδοτούν ένα στρόβιλο Pelton και μια γεννήτρια στην ακτή (Waveberg Development, 2009).

Αντλία Κυμάτων McCabe-McCabe Wave Pump

Βρετανική επινόηση του Peter McCabe της εταιρίας Hydram Technology με έδρα το Killarney της Ιρλανδίας. Οι αντλίες κυμάτων McCabe βρίσκονται στο στάδιο της ανάπτυξης από το 1980. Αν και αρχικά είχαν σχεδιαστεί αποκλειστικά για την αφαλάτωση του θαλασσινού νερού με τη διαδικασία της αντίστροφης όσμωσης, τα τελευταία χρόνια έχουν σχεδιαστεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελείται από ένα σταθερό τμήμα αγκυρωμένο στον βυθό, στις πλευρές του οποίου είναι συνδεδεμένοι μέσω αρθρώσεων δύο επιπλέοντες πλωτήρες. Η κορυφή ενός κύματος προκαλεί την ανύψωση του ενός από τους κινούμενους πλωτήρες, ενώ η κοιλία του κύματος την κάθοδο του άλλου πλωτήρα (Εικόνα 3.1.3.). Η σχετική ως προς το σταθερό σημείο άρθρωσης τους στο αγκυρωμένο τμήμα άνοδο-κάθοδος των πλωτήρων συνιστά ένα είδος αντλίας, το υδραυλικό υγρό της οποίας μεταφέρει κίνηση

σε μια ηλεκτρογεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ύψους 400kW. Ένα πρωτότυπο μοντέλο κυματό-αντλίας McCabe κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε στην ανοιχτή θάλασσα κοντά στις ακτές τις Ιρλανδίας το 1996 (Thorpe, 2003).



Εικόνα 3.1.3: Τα βασικά τμήματα του μετατροπέα McCabe Wave Pump
Πηγή: www.ocean-energy-systems.org

Sea Clam

Βρετανική επινόηση από το 1978 αποτελεί και η υπεράκτια συσκευή Sea Clam (Εικόνα 3.1.4). Η διάταξη περιλαμβάνει έξι αεροθαλάμους, αναρτημένους γύρω από ένα κοίλο κυκλικό πλαίσιο. Καθώς τα κύματα προσπίπτουν διαδοχικά πάνω στους αεροθαλάμους ο συμπιεσμένος αέρας "κινείται" μεταξύ των θαλάμων μέσω του κοίλου πλαισίου στο εσωτερικό του οποίου έχουν τοποθετηθεί στρόβιλοι Wells. Οι στρόβιλοι περιστρέφονται από το δημιουργούμενο ρεύμα αέρα και κινούν γεννήτριες που παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται στην ακτή με υποθαλάσσια καλώδια (Duckers et al., 1994).

Ένα μοντέλο SeaClam υπό κλίμακα έχει κατασκευαστεί και λειτούργησε δοκιμαστικά στη λίμνη Λόχ Νες της Σκωτίας το 1982. Το 1984 η βελτιωμένη έκδοση του Sea Clam που διαθέτει 12 αεροθαλάμους, δοκιμάστηκε πάλι στην λίμνη Λοχ Νες, βελτιώνοντας την παραγωγικότητα της συσκευής. Η ανάπτυξη του Sea Clam συνεχίστηκε μέχρι το 1992 όπου κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι αποτελεί την κορυφαία και την πιο ανταγωνιστική κυματική συσκευή. Αν λειτουργούσαν στην δυτική ακτής της Σκωτίας 10 μονάδες Sea Clam θα παρήγαγαν 25MW, δηλαδή πάνω από 50GWh ανά έτος ηλεκτρική ενέργεια (www.sealtd.co.uk).



Εικόνα 3.1.4.: Δοκιμή της συσκευής SEA Clam στη λίμνη Loch Ness
Πηγή: www.sealtd.co.uk

Διάταξη Pelamis

Η βρετανική εταιρία Ocean Power Delivery Systems με έδρα το Εδιμβούργο έχει αναπτύξει μια πρωτότυπη μέθοδο ενεργειακής αξιοποίησης των κυματισμών. Η διάταξη Pelamis την οποία επινόησε ο R. Yemm το 1998 και αποτελείται από μια επιμήκη σειρά συνδεδεμένων μεταξύ τους πλωτών δεξαμενών (Εικόνα 3.1.5.). Μέσα στους κυματισμούς της θάλασσας, το σχήμα της διάταξης λαμβάνει τη μορφή μιας κατά προσέγγιση ημιτονοειδούς καμπύλης, η οποία σύμφωνα με τους κατασκευαστές είναι υπολογισμένη κατάλληλα ώστε να εκμεταλλεύεται τις δημιουργούμενες κυματομορφές. Οι διαδοχικές κορυφές και κοιλίες των κυμάτων προκαλούν τη σχετική κίνηση των πλωτών δεξαμενών της διάταξης. Η σχετική κίνηση κάθε τμήματος της διάταξης ως προς τα γειτονικά του προκαλεί την κίνηση εμβόλων στο εσωτερικό τους. Τα έμβολα ωθούν υδραυλικό υγρό το οποίο με τη σειρά του μεταδίδει κίνηση σε ηλεκτρογεννήτριες. Σύμφωνα με τους τεχνικούς της εταιρείας, μπορούν να κατασκευασθούν με βάση αυτά τα μοντέλα διατάξεις με τις καταλληλότερες διαστάσεις (δηλαδή διατάξεις που ακολουθούν όσο το δυνατόν πλησιέστερα την κυματομορφή των κυμάτων), ώστε να μεγιστοποιείται η συνεργατική λειτουργία των εμβόλων και συνεπώς λαμβανόμενη ενέργεια (www.aquaret.com ; www.pelamiswave.com).

Το πρώτο μοντέλο προ-παραγωγής φυσικής κλίμακας έχει κατασκευαστεί και δοκιμάζεται στο European Marine Energy Centre στο EMEC Test Center σε απόσταση 2km από την δυτική ακτή των νήσων Orkney. Το μήκος της όλης διάταξης αποτελείται από 10 πλωτές δεξαμενές που φθάνει τα 120m με διάμετρο 3,5m και μπορεί να παράγει μέχρι 750kW κάθε μία. Η συσκευή Pelamis είναι εγκατάσταση ανοιχτής θάλασσας (offshore) και έχει σχεδιαστεί ώστε να προσδένεται και να λειτουργεί σε βάθος υδάτων περίπου 50 με 70μέτρα (τυπικά σε απόσταση 5 με 10 χιλιόμετρα από την ακτή).



Εικόνα 3.1.5.:Το πρωτότυπο μοντέλο Pelamis 1 φυσικής κλίμακας σε λειτουργία.
Πηγή: www.pelamiswave.com

Pelamis 2

Το Pelamis 2 είναι δεύτερης γενιάς μηχανή Pelamis και περιλαμβάνει μια σειρά από σημαντικές βελτιώσεις του σχεδιασμού. Το Pelamis 2 είναι μεγαλύτερο (120m με διάμετρο 4m) και βαρύτερο (1.350 τόνους) από ότι το Pelamis 1 επιτρέποντας να συλλαμβάνει περισσότερη ενέργεια μειώνοντας σημαντικά το κόστος ανά MW. Αποτελείται από πέντε σωλήνες και ως εκ τούτου τέσσερις αρθρώσεις και έχει ένα επιπλέον σωλήνα και μια επιπλέον μονάδα ισχύος που επιτρέπει υψηλότερες αποδόσεις, βελτιωμένη ανάλυση ελέγχου και αυξημένη αξιοπιστία. Ακόμα, έχει απλοποιηθεί η διαδικασία σύνδεσης του σωλήνα με το δίκτυο.

Από το 2008 λειτουργούν τρεις μονάδες Pelamis1 στην βόρεια Πορτογαλία ονομαστικής ισχύος 2,25MW. Πρόκειται για το πρώτο πάρκο κυματικής ενέργειας παγκοσμίως το οποίο σχεδιάζει να εγκαταστήσει 30 συνολικά μονάδες Pelamis και η συνολική ισχύς θα ανέλθει σε 22,5MW. Το Pelamis 2, εγκαταστάθηκε για πρώτη φορά στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Θαλάσσιας Ενέργειας (EMEC) στο Orkney τον Οκτώβριο του 2010 και βρίσκεται σήμερα σε προοδευτικό πρόγραμμα δοκιμών (www.pelamiswave.com).

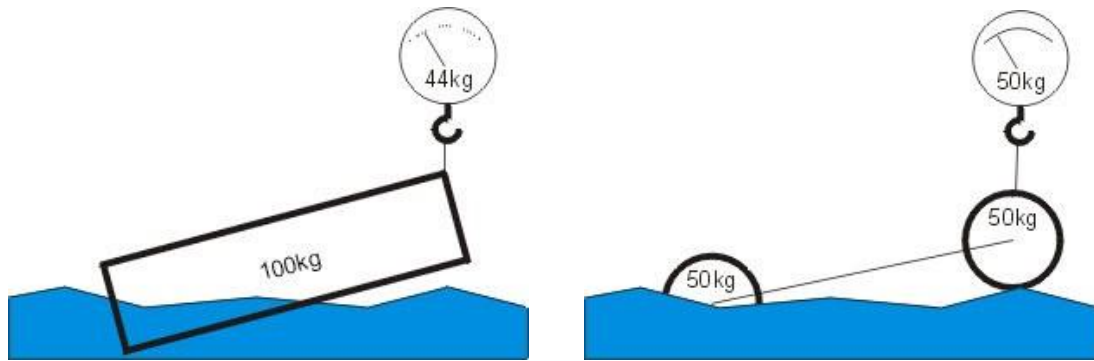


Εικόνα 3.1.6.: Φωτογραφίες από τα διάφορα στάδια κατασκευής και μεταφοράς του μετατροπέα Pelamis 2 συνολικής ισχύος 750kW.
Πηγή: www.pelamiswave.com

DEXA

Το DEXA Wave Energy είναι μια σχετικά νέα (2006) τεχνολογία μετατροπής της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων, προϊόν της συνεργασίας των DEXA Technologies ApS, Struer Shipyard A/S, Danhydra A/S και άλλους συνεργάτες από τη βιομηχανία της Δανίας και της Αγγλίας. Ο υπεράκτιος μετατροπέας DEXA προέρχεται από ένα σύστημα εκμετάλλευσης κυμάτων όπως αναπτύχθηκε και κατοχυρώθηκε το 1980 από τον Sir Cristopher Cockerell, το Cockerell Raft. Αν και επρόκειτο για μία απλή ιδέα, δεν έφτασε ποτέ στη παραγωγή λόγω της χαμηλής της απόδοσης και της μικρής εκτιμώμενης διάρκειας ζωής. Στη DEXA επαναπροσδιορίστηκε και απλοποιήθηκε η βασική κατασκευή του Cockerell Raft, ενώ το μόνο που υιοθετήθηκε από την πρωτότυπη τεχνολογία ήταν τα δύο πλωτά σώματα (σημαδούρες) συνδεδεμένα μεταξύ τους και το υδραυλικό σύστημα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η βασική αρχή λειτουργίας του Cockerell Raft είναι ότι ένα επίπεδο πλωτό σώμα, το οποίο θα τεθεί εκτός του σημείου ισορροπίας του, θα προσπαθήσει να επανακτήσει την ισορροπία του με μία δύναμη ίση με το 44% της συνολικής του μάζας (όταν το πλωτό ανυψωθεί εκτός του νερού από το ένα άκρο του). Με το διαχωρισμό της μάζας του πλωτού σε δύο ίσα μέρη και την τοποθέτησή τους στα άκρα του, η δύναμη μπορεί να αυξηθεί έναντι της κατανάλωσης υλικού, ώστε η δύναμη εξισορρόπησης να αυξηθεί σε 50% με παράλληλη μείωση του χρησιμοποιούμενου υλικού. Το καθένα από τα δύο πλωτά σώματα του DEXA αποτελείται από δύο κυλινδρικά πλωτά σώματα ενωμένα με ένα άκαμπτο σύνδεσμο για την βέλτιστη κατανομή του βάρους. Η παραγόμενη δύναμη προκαλεί διαστολή ή συστολή κατά μήκος ενός υδραυλικού κυλίνδρου, επιτρέποντας διπλή λειτουργία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η κίνηση του υδραυλικού συστήματος θα πραγματοποιείται με κάθε κύμα ύψους παραπάνω από το όριο ανύψωσης, παράγοντας με αυτό τον τρόπο ηλεκτρισμό (www.dexawave.com).



Εικόνα 3.1.7.: Λειτουργία συσκευής a) Cockerell Raft και b) DexaWave
Πηγή: www.dexawave.com

Η βέλτιστη κλίμακα, ή το μέγεθος ενός μετατροπέα DexaWave εξαρτάται από τις κυματικές συνθήκες στην περιοχή εγκατάστασης. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η παραγόμενη ενέργεια ανάλογα με το ύψος κύματος και το αντίστοιχο μέγεθος της συσκευής DEXA.

Wave Height	DEXA Length	DEXA Width	Output (kW/m)
1.5 m	20 m	8 m	13
2 m	26 m	11 m	35
4 m	52 m	21 m	392
6 m	78 m	32 m	1620

Πίνακας 3.1.1: Εκτιμώμενη ενέργεια μετατροπέα DEXA ανάλογα με το ύψος κύματος
Πηγή: www.dexawave.com

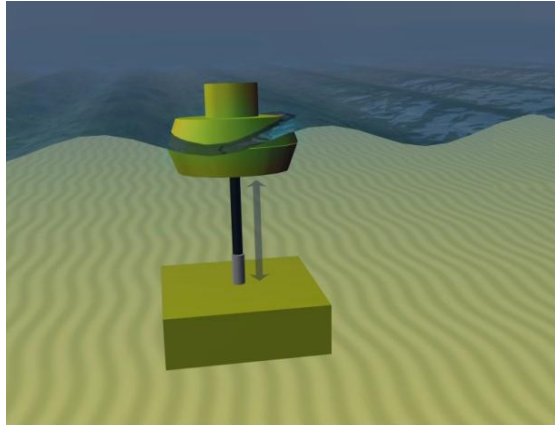
Το 2009 εγκαταστάθηκε για δοκιμές μετατροπέα Dexawave κλίμακας 1:5 και ισχύος 2MW, στο Northsea, Hanstholm της Δανίας. Τον Μάρτιο του 2011 η εταιρία Dexawave A/S, εγκατέστησε μετατροπέα κλίμακας 1:10 ανοικτά της Μάλτας στην πόλη Marsascala. Η δοκιμαστική περίοδος εκτείνεται μέχρι το τέλος του 2012.



Εικόνα 3.1.8.: Μετατροπέας DEXA κλίμακας 1:5 στην Δανία.
Πηγή: www.dexawave.com

3.2. (Αξονοσυμμετρικός) Σημειακός Απορροφητής – (Axisymmetrical) Point Absorber:

Πλωτή κατασκευή η οποία απορροφά την κυματική ενέργεια από κάθε διεύθυνση μέσω των κινήσεών της στην επιφάνεια των υδάτων ή κοντά σε αυτή. Έχει μικρές διαστάσεις σε σχέση με το τυπικό μήκος κύματος, με διάμετρο συνήθως της τάξης των λίγων μέτρων (Εικόνα 3.2.1.). Το χαρακτηριστικό της σημειακής απορρόφησης σημαίνει ικανότητα απορρόφησης της ενέργειας μιας θαλάσσιας περιοχής μεγαλύτερης από τις διαστάσεις της συσκευής. Οι σημειακοί απορροφητήρες μπορούν να εγκατασταθούν πάνω στην ακτή (onshore), κοντά στην στεριά (coastal) (όχι μακρύτερα από 500m από την στεριά και σε βάθη 20-30m) ή να βρίσκονται αγκυρωμένοι στην ανοιχτή θάλασσα (offshore), σε βάθη που ξεπερνούν τα 70m.



Εικόνα 3.2.1.: Λειτουργία Σημειακού Απορροφητήρα
Πηγή: www.aquaret.com

Οι σχεδιασμοί τύπου σηματούρας, για παράδειγμα, ενεργούν ως σημειακοί απορροφητές. Τυπικά, όχι όμως κι απαραίτητα, οι πλωτοί αυτοί σχεδιασμοί είναι αξονοσυμμετρικοί. Σημερινά παραδείγματα επάκτιων συσκευών είναι LabBuoy και SDE, παράκτιων οι WETEnGen, CES και Trotman Unit, ενώ ανοιχτής θάλασσας είναι οι συσκευές Aquabuoy (Εικόνα 3.2.3.) και OPT PowerBuoy (Francis J.M. Farley, 2008), Wave Star, SyncWave, Fo³, FWEPS, Brandl Generator, Waveblanket και Manchester Bobber. Εγκαταστάσεις με την συσκευή PowerBuoy υπάρχουν στο Atlantic City και στην Χαβάη ισχύς 40 KW, ενώ έχει ήδη ξεκινήσει η κατασκευή πάρκου στις βόρειες ακτές την Ισπανίας, ισχύος 1,25 MW.



Εικόνα 3.2.3.: Συσκευή Aquabuoy
Πηγή: <http://inhabitat.com/wave-energy-aquabuoy-20-wave-powergenerator/aquabuoy-finavera-wave-power-wave-energy-renewables/>

LabBuoy

Το LabBuoy είναι μια τεχνολογία μετατροπής της κυματικής ενέργειας για εγκατάσταση στην ακτή. 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 της λειτουργίας.

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 είναι εξοπλισμένος με τα παρακάτω αισθητήρια όργανα: αισθητήρα δύναμης για τη μέτρηση της κάθετης δύναμης του πλωτού σώματος, γωνιακά τοποθετημένο αισθητήριο όργανο για τη μέτρηση της στιγμιαίας θέσης του βραχίονα μετάδοσης της κίνησης του πλωτού σώματος, οπτικό κωδικοποιητή για τη μέτρηση της στιγμιαίας περιστροφικής ταχύτητας του βραχίονα. Ένας κινητήρας DC είναι προσαρτημένος στο πίσω άκρο του βραχίονα του κάθε μοντέλου, παρέχοντας μια ροπή αντίστασης στην κίνηση του βραχίονα διαμέσου ενός οδοντωτού μάντα. Κάθε κινητήρας ελέγχεται από έναν ελεγκτή με κωδικοποιητή ανάδρασης.



Εικόνα 3.2.4.: Το δοκιμαστικό μοντέλο κλίμακας 1:15 εμπρός του κυματοθραύστη σε δεξαμενή δημιουργίας τεχνητών κυμάτων στο Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
Πηγή: www.cres.gr/kape

SDE

Το SDE είναι ένας παράκτιος μετατροπέας της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων, ο οποίος εφευρέθηκε από τον Shmuel Ovadia που ίδρυσε την εταιρία S.D.E. Energy Ltd στο Ισραήλ και έχει καταχωρηθεί με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας (US Patent #5,461,862). Η τεχνολογία αυτή, χρησιμοποιεί την κίνηση των θαλάσσιων κυμάτων για να παράγει υδραυλική πίεση που με την σειρά της μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό. Το σύστημα εκμεταλλεύεται την ταχύτητα, το ύψος, το βάθος, την ανύψωση και την πτώση του κύματος καθώς και την ροή κάτω από το ερχόμενο κύμα, παράγοντας με αυτόν τον τρόπο ενέργεια (www.sde.co.il). Η ισραηλινή εταιρία S.D.E. έχει ολοκληρώσει την τελευταία γενιά του μετατροπέα, το τρέχον μοντέλο είναι η 11^η γενιά. Το SDE αναφέρει ότι η νέα γεννήτρια που διαθέτει μπορεί να παράγει μέχρι και 1kW ηλεκτρικής ενέργειας ανά ώρα. Επιπλέον, η εταιρία αναφέρει ότι η συσκευή έχει μόνο ένα πλωτήρα και επειδή μόνο το 10% της επιφάνειας του συστήματος βρίσκεται σε

επαφή με το νερό, είναι σε θέση να αντέξει τις θύελλες και τις ακραίες καιρικές συνθήκες (www.renewablesinternational.net).

Το SDE έχει κατασκευαστεί και δοκιμαστεί σε οκτώ μονάδες συνολικά. Ένα μοντέλο πλήρους κλίμακας έχει κατασκευαστεί και δοκιμαστεί στο Ισραήλ για 8 μήνες και παρήγαγε 40 kW/h, χωρίς κανένα πρόβλημα. Η εταιρία έχει κάνει 20ετή συμφωνία με το κράτος του Ισραήλ για την παραγωγή 50 MW ηλεκτρικής ενέργειας. Το 2010 η εταιρία SDE βρισκόταν στο τελικό στάδιο της κατασκευής του πρώτου σταθμού στην Κίνα, στην επαρχία Guangzhou, κοντά στην πόλη του Ping Dong. Η μονάδα παραγωγής ενέργειας 1MW, όταν ολοκληρωθεί θα αντιπροσωπεύει την αρχή ενός πολύ μεγαλύτερου σχεδίου που αφορά την παραγωγή περίπου 10 GW. Το 2006 αποφασίστηκε η κατασκευή και εγκατάσταση ενός σταθμού SDE 200MW για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη Σρι Λάνκα. Εάν οι διαπραγματεύσεις ολοκληρωθούν επιτυχώς, λένε, ότι το εργοστάσιο θα είναι το πρώτο στο είδος του για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε εμπορική ποσότητα από τα κύματα της θάλασσας. Ακόμα, βρίσκονται σε εξέλιξη έργα στην Κένυα και το Μεξικό (www.renewablesinternational.net).



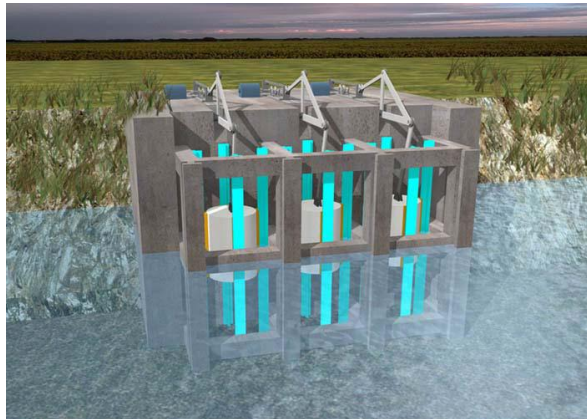
Εικόνα 3.2.5.: Συσκευή SDE σε λειτουργία
Πηγή: www.sde.co.il

Χατζηλάκος (<http://toswet.com/>)

Μια κατοχυρωμένη διεθνής πατέντα του έλληνα εφευρέτη Κωνσταντίνου Χατζηλάκου από το Αμερικάνικο Γραφείο Ευρεσιτεχνιών το 2001, ενώ το 2003 ακολούθησε και το ευρωπαϊκό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, που ισχύει σε 13 παράκτιες χώρες. Το 2006, ο κ. Χατζηλάκος πήρε νέο δίπλωμα για 123 χώρες (Εικόνα 3.2.6.).

Σε αυτή την συσκευή, ο θαλάσσιος κυματισμός κινεί ένα πλωτήρα κατακόρυφα πάνω - κάτω. Οι κινήσεις αυτές, μεταφέρονται και μετατρέπονται σε περιστροφικές σε έναν οριζόντιο άξονα. Ο πλωτήρας σφαιρικού ή κυλινδρικού σχήματος κατασκευασμένος από πλαστικό ή μεταλλικό υλικό, κενός με δυνατότητα να δεχθεί έρμα ώστε να επιπλέει βυθισμένος κατά το ήμισυ περίπου, κινείται υπό την πίεση των κυμάτων και τις κατακόρυφες πάνω - κάτω κινήσεις του και μεταφέρει μια κατακόρυφη μεταλλική δοκό η οποία αποτελείται από δυο τμήματα συνδεδεμένα μεταξύ τους και με τον πλωτήρα με αρθρωτούς συνδέσμους. Η κίνηση, στη συνέχεια, μεταδίδεται σε δύο μονοδρομικούς τροχούς, που βρίσκονται πάνω στη στεριά και οι οποίοι κινούν έναν οριζόντιο άξονα. Αυτός, με τη σειρά του, κινεί μια ηλεκτρογεννήτρια. Ο μηχανισμός αυτός από τον πλωτήρα μέχρι την ηλεκτρογεννήτρια, αποτελεί μια μονάδα. Πολλές μονάδες τοποθετημένες παράλληλα ή μια δίπλα στην άλλη αν και λειτουργούν ανεξάρτητα ενεργούν η κάθε μια στην δική της ηλεκτρογεννήτρια ή ανά δυο και περισσότερες μονάδες, προσθετικά σε κοινό άξονα κοινής ηλεκτρογεννήτριας. Οι πλωτήρες περιορίζονται μέσα σε μεταλλικούς κλωβούς ή σε εσοχές στις προβλήτες ώστε να

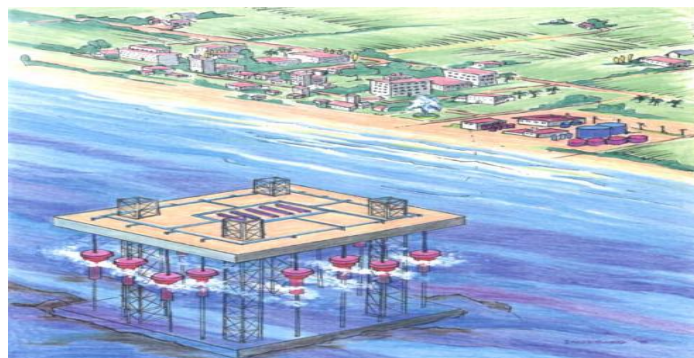
μη κινδυνεύουν να παρασυρθούν απ' τα κύματα, ενώ δεν εμποδίζονται οι κατακόρυφες κινήσεις τους, ούτε η ελεύθερη διακίνηση των κυμάτων (Οργανισμός Βιομηχανικής Ιδιοκτησίας, 2006).



Εικόνα 3.2.6.: Λειτουργία συσκευής
Πηγή: www.cres.gr/kape

CES

Η αμερικάνικη εταιρία Ocean Motion International (OMI) ανέπτυξε το 1990 μια παράκτια συσκευή που ονομάζεται CES (Combined Energy System) και στις 2 Μαΐου του 1995 η τεχνολογία κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας. Το Συνδυασμένο Σύστημα Ενέργειας (CES) 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 έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί σε μια μεγάλη πλατφόρμα που επιπλέει στην επιφάνεια της θάλασσας, που είναι ουσιαστικά μια τροποποιημένη τυπική διατηρητική μονάδα ανοιχτής θαλάσσης. Στην συσκευή αυτή, όταν ένα κοίλο κύμα διέρχεται κάτω από ένα από τα πλωτά σώματα (σημαδούρες) και αυτό δεν υποβαστάζεται πλέον, επιτρέπει ένα βαρίδιο να καταδυθεί κατακόρυφα και με αυτόν τον τρόπο να συμπιέσει θαλασσινό νερό σε μία απλή αντλία τύπου μάνικας. 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. Η πλατφόρμα έχει 20 με 35 αντλίες με διαμέτρους που κυμαίνονται από 0,3 ως 0,914 μέτρα ανάλογα με τις κυματικές συνθήκες. Η συσκευή αποτελείται από δύο επίπεδες πλατφόρμες. Η κάτω είναι πλημμυρισμένη με θαλασσινό νερό, βυθίζεται και σταθεροποιείται στον πάτο του ωκεανού, ενώ η πάνω έχει ένα πλαίσιο ανύψωσης που επιτρέπει τη ρύθμιση της πλατφόρμας καθ' ύψος (www.oceanmotion.ws).



Εικόνα 3.2.7. : Σχέδιο πιθανής εγκατάστασης μιας πλατφόρμας μετατροπής CES.
Πηγή: www.oceanmotion.ws

Το 2002 κατασκευάστηκε ένα μοντέλο κλίμακας 1:20. Τα αποτελέσματα απέδειξαν τον λειτουργικό σχεδιασμό και την αξιόπιστη απόδοση της κύματο-αντλίας CES, με παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια 5-50MW που ένα ποσοστό αυτής της ενέργειας, χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει τις λειτουργίες της πλατφόρμας CES και ένα ποσοστό μεταφέρεται στην ακτή για εμπορικούς σκοπούς.

Wave Star

Το Wave Star (Εικόνα 3.2.8) της δανέζικης εταιρίας Wave Star Energy είναι μία μηχανή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα θαλάσσια κύματα, που εκμεταλλεύεται ολόκληρο το κύμα κατά μήκος του, λόγω της πρωτοποριακής σχεδίασης του. Πρόκειται για ένα μετατροπέα που εγκαθίσταται μέσα στη θάλασσα σε απόσταση 10 με 20 χιλιόμετρα από τη στεριά (υπεράκτια συσκευή).

Η βασική ιδέα λειτουργίας του Wave Star είναι τελείως διαφορετική από πολλά άλλα μοντέλα μετατροπής της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων. Η συγκεκριμένη μηχανή δεν σχηματίζει φράγμα έναντι των κυμάτων για να εκμεταλλευτεί όλη την ενέργεια τους, αλλά αντί αυτού παρεμβάλλεται υπό συγκεκριμένες γωνίες στη κατεύθυνση του κύματος. Κατά αυτόν τον τρόπο τα κύματα διατρέχουν κατά μήκος τη μηχανή, ενώ η εκμετάλλευση της ενέργειας τους αποτελεί μια συνεχή διαδικασία. Σε κάθε πλευρά της στενόμακρης πλατφόρμας του Wave Star υπάρχουν 20 ημισφαιρικές σημαδούρες που ένα μέρος τους είναι βυθισμένο στο νερό. Όταν ένα κύμα περάσει κατά μήκος της πλατφόρμας, το πρώτο ημισφαιρικό πλωτό σώμα θα ανυψωθεί, στη συνέχεια το δεύτερο κ.ο.κ, με αποτέλεσμα να παραχθεί ηλεκτρισμός. 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.

Το 2004, ξεκίνησαν δοκιμές του Wave Star κλίμακας μοντέλου 1:40 σε δεξαμενή. Το 2005 σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μοντέλο κλίμακας 1:10 και εγκαταστάθηκε στο Bredning Nissum, όπου τα κύματα είναι περίπου 1:10 με αυτά της Βόρειας Θάλασσας. Μετά την τελική δοκιμή το μοντέλο κλίμακας 1:10 εγκαταστάθηκε στις 6 Απριλίου 2006 (Εικόνα 3.2.7.), το οποίο έχει 40 ημισφαιρικά πλωτά σώματα διαμέτρου 1μέτρου και γεννήτρια 5,5kW και τέθηκε σε λειτουργία στις 24 Ιουλίου 2006. Από τότε έχει καταγράψει περισσότερες από 15.000 ώρες λειτουργίας. Το φθινόπωρο του 2009 χτίστηκε μια γέφυρα ώστε να επισκέπτες να μπορούν να επισκεφθούν το έργο. Η συσκευή Wave Star συνδέθηκε με το δίκτυο τον Φεβρουαρίου του 2010. Πρόκειται να κατασκευαστεί και να εγκατασταθεί στη Βόρεια Θάλασσα ένα μοντέλο Wave Star μεγάλης κλίμακας για βάθος υδάτων 20μέτρα, που θα εξοπλίζεται με ημισφαιρικά πλωτά σώματα διαμέτρου 10μέτρων και γεννήτρια 3MW. Με μηχανή ισχύος 500 kW, η εταιρεία έχει βάλει στόχο να γίνει η πρώτη συσκευή μαζικής παραγωγής η οποία θα είναι έτοιμη προς πώληση το 2012/2013 (www.wavestarenergy.com).



Εικόνα 3.2.8.: Το μοντέλο Wave Star κλίμακας 1:10 στο Nissum Bredning της Δανίας. Διακρίνονται οι σημαδούρες σε ανυψωμένη θέση εκτός λειτουργίας.
Πηγή: www.wavestarenergy.com

PowerBuoy

Το PowerBuoy της αμερικάνικης εταιρίας Ocean Power Technologies (OPT) είναι ένας μετατροπέας της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων ικανό να ανταποκρίνεται σε διαφορετικές κυματικές συνθήκες. Το σύστημα PowerBuoy είναι ένα «έξυπνο» πλωτό σώμα που συλλαμβάνει την ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων και τη μετατρέπει σε καθαρό ηλεκτρισμό χαμηλού κόστους. Το ανεβοκατέβασμα των κυμάτων στην ανοιχτή θάλασσα προκαλεί την ελεύθερη κατακόρυφη ταλάντωση του πλωτού σώματος PowerBuoy. Η μηχανική ταλάντωση μετατρέπεται, μέσω ενός περίπλοκου PTO (Power Take-Off), για να κινήσει μια ηλεκτρική γεννήτρια. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται στη στεριά μέσω υποθαλάσσιου καλωδίου. Η απόσταση της τοποθεσίας εγκατάστασης της συσκευής είναι 1 με 3 μίλια από την ακτή, ενώ είναι σχεδιασμένη για λειτουργία σε τοποθεσίες με ενέργεια κυμάτων ίση και μεγαλύτερη από 20kW/m. Μία εγκατάσταση ηλεκτρικής ενέργειας 10MW θα καταλαμβάνει περίπου 30 στρέμματα (0,125 τετραγωνικά χιλιόμετρα) θαλάσσιας έκτασης (www.oceanpowertechnologies.com).



Εικόνα 3.2.9.: Η συσκευή Power Buoy PB150 σε λειτουργία στο Orkney Isles της Σκωτίας.
Πηγή: www.oceanpowertechnologies.com

Η εταιρία Ocean Power Technologies έχει ήδη εγκαταστήσει την συσκευή PowerBuoy στις εξής περιοχές:

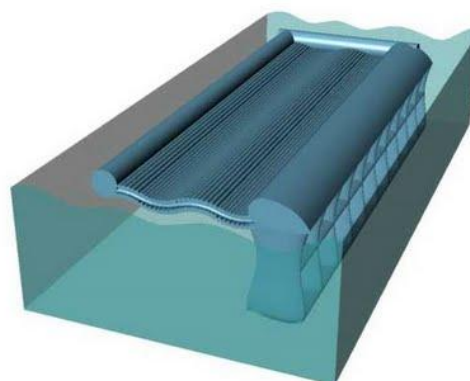
- Atlantic City, New Jersey: Τον Οκτώβριο του 2005 εγκατάσταση και λειτουργία του μοντέλου PB40 PowerBuoy, μήκους 14,6 μέτρα, διαμέτρου 3, μέτρα και ύψους

4,25μέτρα πάνω από το νερό, περίπου πέντε μίλια από την ακτή Tuckerton στο New Jersey. Αυτό το PowerBuoy ήταν η πρώτη σηματοδότης απορρόφησης των 40 kW που αναπτύχθηκε από την OPT σε βάθος υδάτων 18 μέτρα.

- Santon, Spain: Τον Σεπτέμβριο του 2008 εγκαταστάθηκε στην Santoña, Ισπανία η σηματοδότης PB40ES ισχύς 1,39MW, σε βάθος υδάτων 50μέτρα.
- Oahu, Hawaii: Εγκαταστάθηκαν συσκευές PowerBuoy τον Ιούνιο του 2004, τον Οκτώβριο του 2005 και τον Ιούνιο του 2007 σε στρατιωτικές βάσεις των Ηνωμένων Πολιτειών με μέγεθος ενεργειακού πάρκου μέχρι 1MW, σε βάθος υδάτων 30μέτρα. Τον Οκτώβριο του 2008, η Ocean Power Technologies, δοκίμασε την τρίτη γενιά PowerBuoy ισχύς 40 kW στην αμερικανική ναυτική βάση της Χαβάης (MCBH) στον κόλπο Kaneohe. Οι αρχικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν το φθινόπωρο του 2008 και η ισχύς που παράγεται ήταν σύμφωνη με μοντέλα πρόβλεψης της OPT.
- Orkney Isles, Scotland: Στο τέλος του 2009 έγινε η εγκατάσταση της PB150 στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Θαλάσσιας Ενέργειας, στο Orkney Isles της Σκωτίας. Στις 15 Απριλίου του 2011 η σηματοδότης PB150 PowerBuoy εγκαταστάθηκε στη θάλασσα με μέγιστη παραγόμενη ισχύ 150kW και συγκαταλέγει το PB150 ως την μεγαλύτερη και πιο ισχυρή συσκευή κυματικής ενέργειας που σχεδιάστηκε από OPT μέχρι σήμερα.

WaveBlanket

Το WaveBlanket είναι μια νέα τεχνολογία μετατροπής της κυματικής ενέργειας που διεξάχθηκε από τον εφευρέτη, Benjamin Gatti. Πρόκειται για ένα μαλακό και εύκαμπτο μηχανισμό, εμπνευσμένο από τη λειτουργία της ανθρώπινης καρδιάς και μιας μέδουσας. Το WaveBlanket είναι μια ελαστική μεμβράνη που αποτελείται από δύο ή περισσότερα στρώματα από απομονωμένους θαλάμους αέρα που επικοινωνούν μέσω βαλβίδων μιας κατεύθυνσης και από μία πολλαπλή με έναν ή περισσότερους στροβίλους. Οι θάλαμοι είναι υπό πίεση αλλά χαλαροί μεταξύ τους καθώς η επίπεδη επιφάνεια λυγίζει από τη διατάραξη της επιφάνειας της θάλασσας. Όλα τα κινούμενα τμήματα είναι αεροστεγή και απομονωμένα από τα άλλα στοιχεία σε ένα κλειστό σύστημα. Έπειτα το συμπιεσμένο υγρό κινεί έναν στρόβιλο, που μειώνει την πίεση του ξανά στο επίπεδο διαστολής. Η χρήση δύο στροβίλων με διαφορετικά χαρακτηριστικά παρέχει τρία διαφορετικά επίπεδα απόδοσης ισχύος για τη ρύθμιση της συσκευής στις κυματικές συνθήκες της θάλασσας. Είναι η καταλληλότερη λύση για τοποθεσίες με κύματα σχετικά χαμηλής ενέργειας (30kW) αλλά και για τοποθεσίες με υψηλή ενέργεια κυμάτων (70kW).



Εικόνα 3.2.10.: Επίδειξη της αντοχής των θαλάμων αέρα του μετατροπέα WaveBlanket
Πηγή: www.windwavesandsun.com

Wave2water

Η εταιρία Sigma Hellas κατασκεύασε μια τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, Wave2water, η οποία μπορεί να εγκατασταθεί κοντά στην ακτή ή στην ανοιχτή θάλασσα. Η όλη διάταξη Wave2water (Εικόνα 3.2.11.) αποτελείται από το θαλάσσιο τμήμα που περιλαμβάνει έναν πλωτήρα επιφάνειας, ένα υδραυλικό έμβολο και την αγκύρωση, παράλληλα με το χερσαίο τμήμα που αναλαμβάνει τη μετατροπή της ενέργειας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Όλα τα υλικά με τα οποία είναι κατασκευασμένο το θαλάσσιο τμήμα τηρούν τις απαραίτητες προδιαγραφές, με υψηλό βαθμό μηχανικής αντοχής, για να αντεπεξέλθουν στις αντίξοες συνθήκες της θάλασσας. Τα θαλάσσια κύματα δημιουργούν παλινδρομική κίνηση του εμβόλου (εκτέλεση κατακόρυφης κίνησης) λόγω της άνωσης του πλωτήρα. Έτσι, το θαλασσινό νερό πιέζεται και μεταφέρεται μέσω ενός αγωγού σε ένα σε ένα υδροηλεκτρικό στρόβιλο που ρυθμίζει την πίεση και τη ροή του θαλασσινού νερού ώστε να είναι σταθερές. Ανάλογα με την επιθυμητή εφαρμογή, η διάταξη μπορεί να κατασκευαστεί σε κάθε κλίμακα μεγέθους ή και πλήθους, ακόμη και σαν μια μικρή μονάδα παραγωγής για την εξυπηρέτηση ιδιωτικής χρήσης.

Η απλότητα της κατασκευής είναι απόλυτα εναρμονισμένη με τις αντίξοες θαλάσσιες συνθήκες, χωρίς να υπάρχει κανένας κίνδυνος καταστροφής της. Όσο υψηλό κύμα και αν δημιουργηθεί, το μόνο που μπορεί να συμβεί είναι απλώς η κάλυψη του πλωτήρα από το νερό. Πρέπει να αναφερθεί ότι έχοντας το τμήμα παραγωγής στην ξηρά, ελαχιστοποιούνται οι δαπάνες συντήρησης, δεδομένου ότι είναι ταχύτερη και φθηνότερη η τακτική συντήρησης στην ξηρά, όπως και η φθορά είναι επίσης κατά πολύ μικρότερη από το εάν ήταν στην θάλασσα.

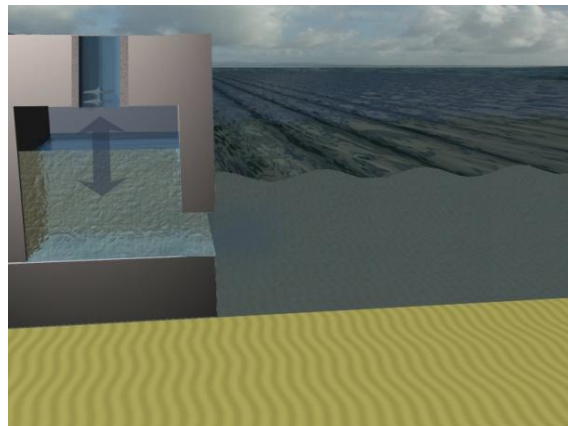


Εικόνα 3.2.11.: Λειτουργία συσκευής στην περιοχή του Λαυρίου Αττική.
Πηγή: www.sigmahellas.gr

3.3. Ταλαντευόμενη υδάτινη στήλη (ΤΥΣ)- Oscillating Water Column (OWC) (Arlitt et al., 2007):

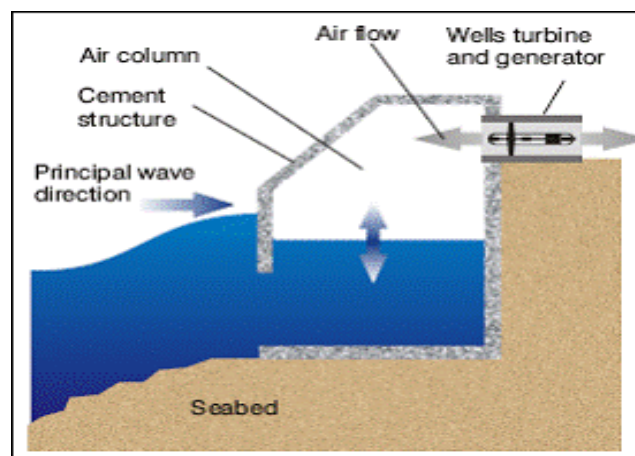
Υποβρύχια κατασκευή η οποία έχει ένα άνοιγμα στη θάλασσα κάτω από την επιφάνεια των υδάτων ώστε να εγκλωβίζει αέρα πάνω από την υδάτινη στήλη. Τα κύματα προκαλούν το σκαμπανέβασμα της στήλης, που ενεργεί ως έμβολο που συμπιέζει και αποσυμπιέζει τον αέρα, ο οποίος διέρχεται μέσα από αεροστρόβιλο για την παραγωγή ενέργειας (Εικόνα 3.3.1). Οι κλασικές επάκτιες συσκευές OWC είναι η European Pilot OWC Plant που βρίσκεται στο νησί Pico στις Αζόρες με ονομαστική ισχύ 400KW και η Limpet OWC που βρίσκεται στο νησί Islay στη δυτική ακτή της Σκωτίας συνολικής ισχύος 500KW. Ελληνικής καταγωγής αποτελεί η επάκτια συσκευή Deadalus WECA. Οι κατασκευές αυτές μπορεί να είναι εγκατεστημένες και κοντά στην ακτή (παράκτιες), με χαρακτηριστικό παράδειγμα την Sara

MWEC ή στην ανοιχτή θάλασσα (υπεράκτιες), όπως είναι οι Oceanlinx, Sperboy, Wave Master, MAWEC και Mighty Whale.



Εικόνα 3.3.1.:Λειτουργία Ταλαντευόμενης υδάτινης στήλης
Πηγή: www.aquaret.com

Στις επάκτιες κατασκευές, τα κύματα που φθάνουν στην ακτή εισέρχονται σε ένα ημιβυθισμένο τεχνητό "σπήλαιο" το άνω άκρο του οποίου (αυτό που βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας) καταλήγει σε μία χοάνη. Μέσα στη χοάνη βρίσκεται ένας αεροστρόβιλος. Καθώς η κορυφή ενός κύματος εισέρχεται στο σπήλαιο, η στάθμη του νερού μέσα σε αυτό ανέρχεται ταχύτατα, ωθώντας και διοχετεύοντας στη χοάνη τον αέρα που βρίσκεται πάνω από το νερό. Το δημιουργούμενο ρεύμα αέρα προσπίπτει στα πτερύγια του στροβίλου και προκαλεί την περιστροφή του. Στη συνέχεια, και καθώς το κύμα υποχωρεί σχηματίζοντας κοιλία, η στάθμη του νερού κατέρχεται, προκαλώντας την αναρρόφηση αέρα μέσω της χοάνης και την εκ νέου περιστροφή του στροβίλου, ο οποίος είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να περιστρέφεται κατά την ίδια φορά ανεξάρτητα από την κατεύθυνση του προσπίπτοντος αέρα. Όταν τα κύματα ενισχυθούν υπερβολικά, μια βαλβίδα κλείνει αυτόματα ώστε να προστατευθεί ο στρόβιλος, ο οποίος κινεί με τη σειρά του μια ηλεκτρογεννήτρια που παράγει ηλεκτρικό ρεύμα (Εικόνα 3.3.2.).



Εικόνα 3.3.2.:Λειτουργία OWC
Πηγή: www.dpenergy.com/information/wave.html

Limpet 500

Το 1998 οι επιστήμονες της ομάδας του Whittaker, σε συνεργασία με το Queen's University Belfast και με τις εταιρίες Wavegen Ireland Ltd, Charles Brand Ltd, Kirk McClure Morton και τη I.S.T. Portugal σχεδίασαν το Limpet 500 (Land Installed Marine Power Energy Transmitter), μια μονάδα συνολικής ισχύος 500 KW που εγκαταστάθηκε στη νήσο του Islay έξω από τα δυτικά παράλια της Σκωτίας και η έναρξη της λειτουργίας του πραγματοποιήθηκε τον Νοέμβριο του 2000 (Εικόνα 3.3.3.). Έκτοτε η εγκατάσταση λειτουργεί και ελέγχεται εξ' αποστάσεως, ενώ τροφοδοτεί το δίκτυο του Ηνωμένου Βασιλείου με ηλεκτρική ενέργεια (The Queen's University of Belfast, 2002; www.wavegen.co.uk)

Το βάθος του νερού στην είσοδο του σπηλαίου είναι 7m και η επιφάνεια του 170m². Η απόδοση της μονάδας είναι βέλτιστη όταν η ένταση των κυμάτων είναι από 15 έως 25 kW. Το τεχνητό σπήλαιο της μονάδας Limpet500 καταλήγει σε δίδυμες χοάνες στις οποίες έχουν τοποθετηθεί δύο στρόβιλοι Wells, καθένας από τους οποίους κινεί μια γεννήτρια ισχύος 250 kW, οπότε η συνολική ισχύς της μονάδας φθάνει τα 500 kW. Οι στρόβιλοι που χρησιμοποιούνται στο Limpet 500, όπως και στις περισσότερες μονάδες OWC, αποτελούν μια ειδική κατηγορία στροβίλων την οποία επινόησε ο μηχανικός A. Wells το 1977. Ο στρόβιλος Wells φέρει πτερύγια ειδικής σχεδίασης έτσι ώστε να μπορεί να περιστρέφεται προς την ίδια κατεύθυνση ανεξάρτητα από την κατεύθυνση του ρεύματος αέρα που προσπίπτει σε αυτά. Έτσι, αφενός εξαιρείται η ανάγκη για ανάστροφες βαλβίδες και αφετέρου αυξάνεται η απόδοση εφόσον ο στρόβιλος δεν χρειάζεται να διακόπτει και να ξαναρχίζει την περιστροφή του.

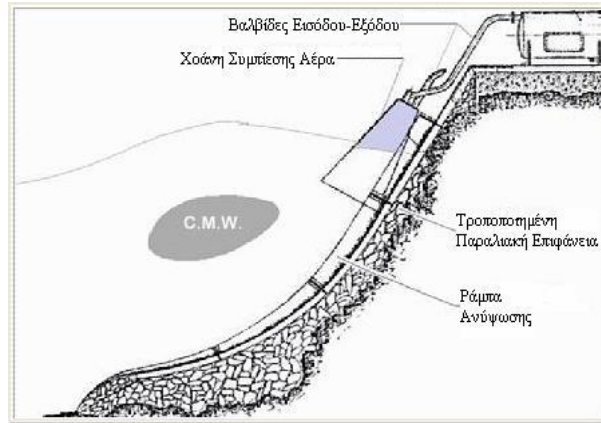


Εικόνα 3.3.3.: Εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας LIMPET 500 στο νησί του Islay της Σκωτίας.

Πηγή: The Queen's University of Belfast, 2002

Daedalus WECA

Το WECA (Wave Energy Conversion Activator) της ελληνικής εταιρίας DAEDALUS Informatics Ltd είναι ένας μετατροπέας της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων. Η βασική αρχή λειτουργίας του μετατροπέα WECA βασίζεται στη συμπίεση του εγκλωβισμένου αέρα κατά την πρόσκρουση του κοιλώματος του θαλάσσιου κύματος. Συγκεκριμένα, ένα είδος ανεστραμμένης κωνοειδούς χοάνης λειτουργεί ως αεροθάλαμος συμπίεσης που χρησιμοποιεί την ορμή του ερχόμενου κύματος (CMW – Critical Momentum Wedge principle). Το προτεινόμενο μοντέλο WECA πλήρους κλίμακας θα είναι από χάλυβα, ώστε να είναι κατάλληλο για ενσωμάτωση σε κυματοθραύστες ή άλλες κατασκευές. Λειτουργικά το WECA είναι σχεδιασμένο για να απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας των προσπιπτόντων θαλάσσιων κυμάτων και να την μετατρέπει σε συμπιεσμένο αέρα, που στη συνέχεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ή άλλου είδους ενέργεια.



Εικόνα 3.3.4.: Σχηματικό διάγραμμα της λειτουργίας του μετατροπέα WECA.
Πηγή: www.daedalus.gr

Σχεδιάστηκε ένα πειραματικό μοντέλο WECA πλήρους κλίμακας με διαστάσεις 7 μέτρα ύψος και 6 μέτρα πλάτος, ενώ με βάση αυτό πραγματοποιήθηκαν οι αναγκαίοι θεωρητικοί υπολογισμοί και η εξομείωση της λειτουργίας του από υπολογιστή. Η έξοδος ισχύος του συγκεκριμένου πρωτοτύπου αναμένεται να είναι περίπου 20kW.

SARA MWEC

Η αμερικάνικη εταιρία SARA έχει αναπτύξει μια παράκτια τεχνολογία για τη μετατροπή της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων, βασιζόμενη στην κατοχυρωμένη ευρεσιτεχνία της μαγνητό-υδροδυναμική (MHD) γεννήτριας. Η εταιρία βρίσκεται στο στάδιο της κατασκευής μιας MHD γεννήτριας 100kW για την εργαστηριακή επίδειξη ενός μοντέλου SARA MWEC, ενώ παράλληλα αναπτύσσει μια συσκευή SARA MWEC για δοκιμή στην ανοιχτή θάλασσα.



Εικόνα 3.3.5.: Το υπό ανάπτυξη εργαστηριακό πρωτότυπο SARA MWEC των 100kW.
Πηγή: http://www.sara.com/RAE/ocean_wave.html

Oceanlinx

Η συσκευή Oceanlinx της αυστραλιανής εταιρίας Oceanlinx Limited, έχει σχεδιαστεί για να αποσπά την ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων και να την μετατρέπει είτε σε ηλεκτρισμό ή να χρησιμοποιεί αυτή την ενέργεια για να παράγει αφαλατωμένο γλυκό νερό από το θαλασσινό.

Καθώς η ενέργεια των κυμάτων περνάει από τη συσκευή Oceanlinx, το νερό μέσα στο OWC (ένας θάλαμος που είναι ανοιχτός κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας) ανεβοκατεβαίνει συμπιέζοντας και μετατοπίζοντας τον αέρα μέσα στο θάλαμο, οδηγώντας τον μέσα από ένα στρόβιλο που στεγάζεται στο στενότερο και ψηλότερο σημείο του θαλάμου. Επειδή ο θάλαμος OWC στενεύει (έχει κωνοειδές σχήμα), ο αέρας επιταχύνεται στη μέγιστη ταχύτητα του καθώς διέρχεται μέσα από τον στρόβιλο, επιτρέποντας τη μέγιστη απόσπαση της ενέργειας από τη θάλασσα. Η κίνηση ταλάντωσης του κύματος προκαλεί μια παρόμοια ταλάντωση στη ροή του αέρα μέσα από τον θάλαμο και ο στρόβιλος μετατρέπει ενέργεια και στις δύο κινήσεις (πάνω και κάτω). Το βασικότερο τμήμα του Oceanlinx είναι ο στρόβιλος Denniss-Auld που μετατρέπει την ενέργεια της ροής του αέρα σε μηχανική ενέργεια που κινεί μια ηλεκτρική γεννήτρια. Η ηλεκτρική γεννήτρια που είναι συνδεδεμένη με τον στρόβιλο, έχει σχεδιαστεί ώστε να ελέγχονται ηλεκτρονικά τα χαρακτηριστικά της ταχύτητας και ροπής του φορτίου της γεννήτριας σε πραγματικό χρόνο για τη μεγιστοποίηση της μεταφοράς ενέργειας. Μία μόνο μονάδα ισχύος Oceanlinx μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια από 100kW έως και 1,5MW, ανάλογα με τις κυματικές συνθήκες και τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του τοπικού πληθυσμού. Όταν είναι αναγκαία η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας περισσότερης από 1,5MW, είναι δυνατή η εγκατάσταση πολλαπλών μονάδων στην ίδια τοποθεσία, συνδεδεμένων στην ακτή μέσω ενός ηλεκτρικού υποθαλάσσιου καλωδίου.



Εικόνα 3.3.6.: Η πρωτότυπη μονάδα Oceanlinx των 450kW στο Port Kembla της Αυστραλίας.

Πηγή: www.oceanlinx.com

Γενικά η Oceanlinx Limited (πρώην Energetech) έχει τα παρακάτω τρέχοντα συμβόλαια και πρότζεκτς:

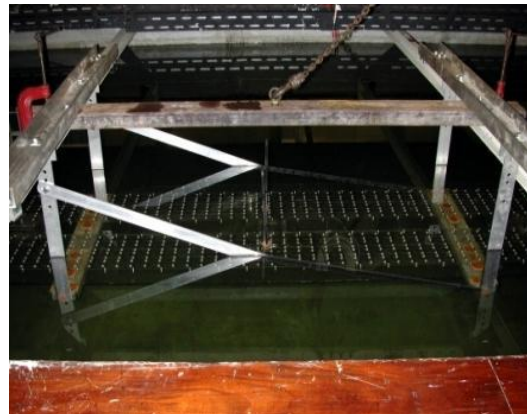
- Portland (Victoria, Australia): Η εγκατάσταση 18 μονάδων του 1,5MW συνολικής παραγωγής 27MW βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο απόκτησης αδειών. Αυτό θα είναι το μεγαλύτερο πρότζεκτ κυματικής ενέργειας σε εξέλιξη στον κόσμο.
- Port Kembla (New South Wales, Australia): Έχει υπογραφεί το 2007, ένα Συμφωνητικό Απόκτησης Ισχύος (PPA) με την αυστραλιανή Integral Energy για την παροχή ηλεκτρισμού από τη πρωτότυπη μονάδα των 450kW. Αυτή θα είναι η πρώτη εταιρία ενέργειας κυμάτων ανοιχτής θαλάσσης που θα συνδεθεί στο δίκτυο.
- South West of England Regional Development Agency (SWRDA, Cornwall, UK): Έχει υπογραφεί ένα Γράμμα Πρόθεσης (LOI) με τη SWRDA για μία εγκατάσταση 5MW ως ένα μέρος του Wave Hub στη Cornwall.
- Rhode Island (USA): Υπογράφηκε ένα Υπόμνημα Συμφωνίας (MOU) με τη Κρατική Αρχή του Rhode Island για μία μονάδα 1,5MW και στη συνέχεια για μία εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας ισχύος 15 με 20MW.
- GPP (Namibia): Υπογράφηκε συμβόλαιο με τη GPP, τμήμα της Southern Africa Utility SELCo για μια μονάδα 1,5MW και θα επακολουθήσουν άλλες 9 μονάδες, με συνολική παραγωγή 15MW.

- Hawaii (USA): Υπογράφηκε ένα Υπόμνημα Συμφωνίας (MOU) με ένα νησί στη Χαβάη για ισχύ παραγωγής μέχρι 2,7Μ

WaveMaster

Το WaveMaster της αγγλικής εταιρίας Ocean WaveMaster Limited (OWL) είναι μια εφεύρεση του Alex Southcombe (Εικόνα 3.3.7.). Πρόκειται για μια μοναδική τεχνολογία σύλληψης των κυμάτων που εκμεταλλεύεται τις διαφορικές πιέσεις των υψωμάτων και κοιλοτήτων των θαλάσσιων κυμάτων για τη κίνηση υποθαλάσσιων στροβίλων. Είναι σχεδιασμένο να συλλαμβάνει την τεράστια ενέργεια των μεγάλων κυμάτων της ανοιχτής θάλασσας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η συσκευή WaveMaster αποτελείται από δύο θαλάμους πίεσης συνδεδεμένους διαμέσου στροβίλων. Η συσκευή βρίσκεται διαρκώς κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, έτσι ώστε να καλύπτεται συνεχώς από θαλασσινό νερό. Η πάνω επιφάνεια του κάθε θαλάμου πίεσης είναι μια «ενεργή επιφάνεια» καλυμμένη με πολλές βαλβίδες μιας κατεύθυνσης που ελέγχουν τη ροή του νερού μέσα στη συσκευή. Οι βαλβίδες στον θάλαμο υψηλής πίεσης επιτρέπουν τη ροή του νερού μέσα στον θάλαμο μόνο όταν η πίεση έξω από τον θάλαμο είναι υψηλότερη απ' ό,τι η πίεση μέσα σ' αυτόν (κατά την κορυφή του κύματος). Όταν η εξωτερική πίεση είναι μικρότερη από την εσωτερική πίεση του θαλάμου, οι βαλβίδες παραμένουν κλειστές και δεν έχουμε ροή νερού. Αντίστοιχα, οι βαλβίδες του θαλάμου χαμηλής πίεσης επιτρέπουν τη ροή του νερού έξω από τον θάλαμο αν η εσωτερική πίεση είναι μεγαλύτερη από την εξωτερική (κατά την κοιλία του κύματος). Όταν η εσωτερική πίεση του θαλάμου είναι μικρότερη από την εξωτερική, οι βαλβίδες παραμένουν κλειστές και συνεπώς δεν έχουμε ροή νερού.



Εικόνα 3.3.7.: Το μοντέλο WaveMaster των 20 μέτρων υπό κατασκευή και ένα πειραματικό μοντέλο WaveMaster μικρής κλίμακας σε δοκιμή σε δεξαμενή δημιουργίας τεχνητών κυμάτων.

Πηγή: www.oceanwavemaster.com

Σύμφωνα με τις προβλέψεις το WaveMaster θα παράγει 50MW (για συσκευή 200μέτρων) σε ύψος κυμάτων 5μέτρων. Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στη στεριά θα γίνεται με ένα υποθαλάσσιο καλώδιο ισχύος. Με χρηματοδότηση από την Carbon Trust, ξεκίνησαν τον Νοέμβριο του 2003 οι εργασίες για την κατασκευή ενός μοντέλου WaveMaster μήκους 20μέτρων και έξοδο ισχύος 50kW. Το πρότζεκτ ολοκληρώθηκε τον Οκτώβριο του 2004. Μελλοντικά αναμένεται η κατασκευή ενός μοντέλου εμπορικής κλίμακας με μήκος 200μέτρα και έξοδο 50MW.

Το σύστημα MIGHTY WHALE (Bhattacharyya et al., 2003)

Αποτελεί το ερευνητικό πρόγραμμα από το 1987 Ιαπώνων επιστημόνων, του JAMSTEC (Japan Marine Science and Technology Center), όπου το όνομα προέκυψε από το κινητό σύστημα κυματικής ενέργειας, που εξωτερικά το περίβλημα θυμίζει μικρή φάλαινα (Εικόνα 3.3.8.). Οι διαστάσεις του πρωτοτύπου επιλέχθηκαν να είναι 50μέτρα μήκος, 30μέτρα πλάτος και 12μέτρα ύψος. Η συνολική ονομαστική ισχύ διαμορφώθηκε στα 110kW. Το βάθος των υδάτων της τοποθεσίας δοκιμής του πρωτοτύπου είναι 40μέτρα (υπεράκτια τεχνολογία) και η συσκευή προσδένεται στο βυθό προς τη κατεύθυνση των επικρατούντων κυμάτων.

Το σύστημα Mighty Whale μετατρέπει την κυματική ενέργεια σε ηλεκτρική με την χρήση κάθετης στήλης νερού που περικλείεται στο εσωτερικό του και περιέχει τρεις θαλάμους αέρα που μετατρέπουν τη κυματική ενέργεια σε πίεση αέρα. Καθώς το σύστημα κινείται στην επιφάνεια της θάλασσας, το νερό εισέρχεται στην κάθετη στήλη και κινεί την τουρμπίνα παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Το νερό εισέρχεται από το στόμιο του Mighty Whale και αυξάνει την στάθμη του νερού εσωτερικά, ενώ ο αέρας κινείται προς τα επάνω και κινεί την τουρμπίνα. Και οι τρεις στρόβιλοι πάνω στη συσκευή Mighty Whale είναι παλινδρομικοί και κάθε ένας από αυτούς έχει δύο περιστροφικά τμήματα στη σειρά. Τα δύο κάθετα πτερύγια στις άκρες τις πρύμνης παρέχουν πλευρική σταθερότητα στη συσκευή Mighty Whale.



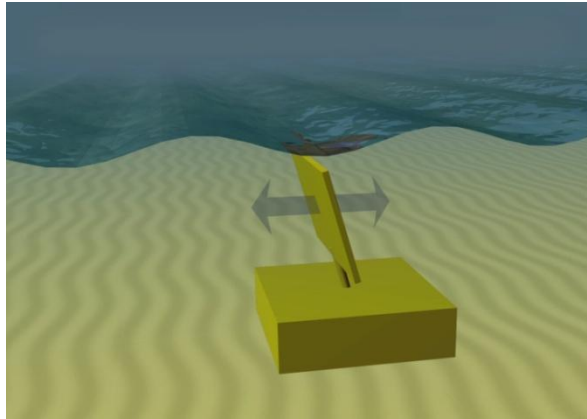
Εικόνα 3.3.8.:Το πρωτότυπο Mighty Whale αμέσως μετά την καθέλκυση του το 1998.

Πηγή: www.jamstec.go.jp

Η κατασκευή του πρωτοτύπου ολοκληρώθηκε στο ναυπηγείο Ishikawajima Harima Heavy Industries στην πόλη Αίοι της νομαρχίας Hyogo. Η καθέλκυση του πλοίου πραγματοποιήθηκε τον Μάρτιο του 1998 ενώ οι δοκιμές ξεκίνησαν τον Ιούλιο του ίδιου έτους και ολοκληρώθηκαν το 2000.

3.4 Συσκευές οριζόντιας Κυματικής Παλινδρόμησης- Oscillating Wave Surge Converter (OWSC)

Συλλέκτης κοντά στην επιφάνεια, ο οποίος εδράζεται πάνω σε περιστρεφόμενο βραχίονα που είναι αγκυρωμένος κοντά στον πυθμένα και εκμεταλλεύεται την οριζόντια ταχύτητα των μορίων του νερού των θαλάσσιων κυμάτων. Ο βραχίονας ταλαντεύεται ως ανάστροφο εκκρεμές λόγω της κίνησης των σωματιδίων του νερού των κυμάτων (Εικόνα 3.4.1.) και τοποθετούνται σε βάθη μεγαλύτερα των 20m (παράκτια ή υπεράκτια τεχνολογία).



Εικόνα 3.4.1.: Λειτουργία συσκευής οριζόντιας κυματικής παλινδρόμησης
Πηγή: www.aquaret.com

Σημερινά παραδείγματα της κατηγορίας αυτής είναι η συσκευή Oyster, bioWave και Waveroller (WaveRoller Tehnology, 2007) (Εικόνα 24), καθώς και στην ανοιχτή θάλασσα οι συσκευές, Poseidon's Organ, OWEL WEC και C-Wave (www.aquaret.com)

Oyster

Το Oyster είναι ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας, της σκοτσέζικης εταιρίας Aquamarine Power, που εγκαθίσταται στον πυθμένα της θάλασσας. Αυτή η συσκευή έχει σχεδιαστεί ειδικά για εγκατάσταση σε νερά κοντά στην ακτή (παράκτια), καθώς τα ρηγά νερά έχουν ευκολότερη πρόσβαση και εκεί δεν εμφανίζονται τα επικίνδυνα μεγάλα κύματα που συναντάμε στην ανοιχτή θάλασσα. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια αιχμής της κάθε μονάδας Oyster είναι μεταξύ 300 και 600kW ανάλογα με τη τοποθεσία εγκατάστασης και τη διαμόρφωση της (Farley, 2008). Μια «φάρμα κυμάτων» εμπορικής κλίμακας αποτελούμενη από 10 μονάδες Oyster εγκατεστημένες σε σειρά θα παράγει μέχρι και 6MW ηλεκτρικής ενέργειας. Η αρχή λειτουργίας του μετατροπέα Oyster είναι απλή. Η συσκευή αποτελείται από ένα είδος πτερυγίου ταλάντωσης εγκατεστημένο στον πυθμένα της θάλασσας σε βάθος 12 μέτρων. 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 γίνεται με τη κίνηση εμβόλων διπλής δράσης που τροφοδοτούν με συμπιεσμένο θαλασσινό νερό τη μονάδα PTO (Power Take-Off) του Oyster. Όσον αφορά την τοποθεσία εγκατάστασης, τα μοντέλα Oyster έχουν σχεδιαστεί για τοποθέτηση σε βάθος περίπου 10 μέτρων σε θαλάσσιες περιοχές όπου το μέσο κυματικό κλίμα είναι μεγαλύτερο από 15kW/m (www.aquamarinepower.com).



Εικόνα 3.4.2.: α) Μεταφορά συσκευής Oyster σε πραγματικό μέγεθος και β) σε λειτουργία.
Πηγή: www.aquamarinepower.com

Παρακάτω παρουσιάζεται η χρονολογική εξέλιξη της τεχνολογίας του Oyster:

- 2001-2004: Ανάπτυξη της Κεντρικής Ιδέας και Δοκιμές Μοντέλων. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου ολοκληρώθηκαν εκτενείς δοκιμές σε δεξαμενή δημιουργίας τεχνητών κυμάτων στο Queen's University Belfast, χρησιμοποιώντας μοντέλα ταλαντωτών κλίμακας 1:40 και 1:20.
- 2007: Έρευνα και Ανάπτυξη «Φάρμας Κυμάτων». Πραγματοποιούνται δοκιμές δεξαμενής, υπολογισμοί κόστους, έρευνα και ανάπτυξη για τη μοντελοποίηση και επαλήθευση των προβλέψεων απόδοσης μιας συστοιχίας συσκευών Oyster. Τα αποτελέσματα θα οδηγήσουν στον τελικό σχεδιασμό και διαμόρφωση της τεχνολογίας Oyster για «φάρμες κυμάτων» εμπορικής κλίμακας.
- 2007-2008: Θα κατασκευαστεί και θα εγκατασταθεί ένα πρωτότυπο συνδεδεμένο στο δίκτυο στο EMEC του Orkney, για να δοκιμαστεί η απόδοση και να επαληθευτούν οι προβλέψεις από τα υπολογιστικά μοντέλα και τα μοντέλα μικρής κλίμακας.
- 2008-2009: Θα εγκατασταθεί και θα δοκιμαστεί μια συστάδα από συσκευές Oyster στη Σκωτία, εγκατεστημένης ισχύος πάνω από 3MW, ως το πρώτο βήμα για περαιτέρω εμπορική εφαρμογή στην Ευρώπη. Η πρώτη εγκατάσταση συσκευής Oyster σε πλήρη κλίμακα ισχύς 315kW πραγματοποιήθηκε στο χώρο δοκιμών στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Θαλάσσιας Ενέργειας στο Billia Croo, κοντά στο Stromness Orkney το καλοκαίρι του 2009. Ο πρωθυπουργός της Σκωτίας έθεσε επίσημα σε λειτουργία το Oyster 1 στις 20 Νοεμβρίου 2009.
- Στο μέλλον εκτιμάται ότι η τεχνολογία του Oyster θα εισχωρήσει στην αγορά με «φάρμες κυμάτων» ισχύος από 5 έως 20MW. Το 2012 και το 2013 πρόκειται να εγκατασταθούν δύο ακόμα επόμενης γενιάς συσκευές Oyster 800 στο Orkney, ενώ η εταιρία έχει θέσει ως στόχο την εγκατάσταση και λειτουργία συσκευής Oyster στα ύδατα της Ιρλανδίας που θα παράγει ενέργεια ισχύος 5MW μέχρι το 2015. Στόχος της εταιρίας είναι η εύρεση πιθανής τοποθεσίας στην Δυτική ακτή των Η.Π.Α. για εγκατάσταση τριών συσκευών Oyster μέχρι το 2016.

Wave Roller

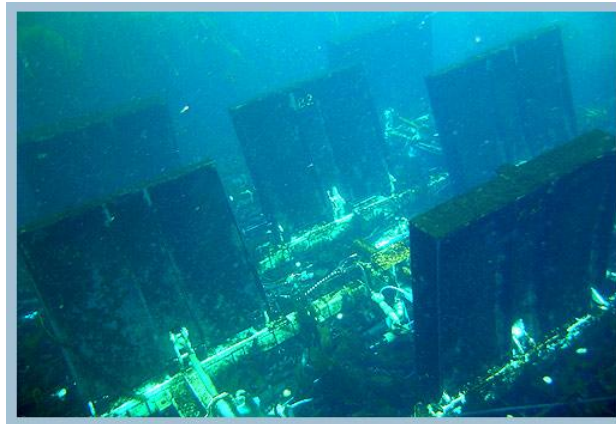
Η συσκευή WaveRoller αποτελεί επινοήση του Rauno Koivusaari και ανήκει στην φιλανδική εταιρία AW-Energy Oy όπου έχει καταχωρηθεί με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από το 1999. Από τότε η τεχνολογία έχει εξελιχθεί μετά από πολλές εργαστηριακές δοκιμές, καθώς και από θαλάσσιες δοκιμές όπου διενεργήθηκαν για το Ευρωπαϊκό Κέντρο Θαλάσσιας Ενέργειας (EMEC), στη Σκωτία και στη Peniche, Πορτογαλία.

Η συσκευή WaveRoller (Εικόνα 3.4.3.) αποτελείται από ένα ειδικό πτερύγιο εγκατεστημένο στο βυθό της θάλασσας. Η εμπρός - πίσω κίνηση των θαλάσσιων κυμάτων στο βυθό κινούν το πτερύγιο και η κινητική ενέργεια που παράγεται συλλέγεται από μια αντλία εμβόλου. Αυτή η ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρισμό με τη βοήθεια υδραυλικού συστήματος σε συνδυασμό με ένα σύστημα κινητήρα-γεννήτριας. Η συσκευή WaveRoller λειτουργεί πολύ καλά σε τοποθεσίες όπου οι περίοδοι των κυμάτων είναι μεγάλες και το φούσκωμα της θάλασσας έντονο. Το τυπικό βάθος εγκατάστασης είναι περίπου 10 με 25 μέτρα και κάθε μεμονωμένο πτερύγιο έχει σχεδιαστεί για να παράγει 600 έως 800 kW ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με το σημείο εγκατάστασης (www.aw-energy.com).

Η εξέλιξη του WaveRoller παρουσιάζεται παρακάτω (WaveRoller Technology, 2007):

- 1999: Πρώτη θαλάσσια δοκιμή του πρωτότυπο στην Porkkala.
- 2000: Εργαστηριακές δοκιμές μικρής κλίμακας.
- 2002: Δοκιμή μικρού πρωτοτύπου στην Porkkala σε πραγματικές συνθήκες θάλασσας.

- 2003: Δοκιμή πρωτοτύπου στη Ruda Grundet (Κόλπος της Φινλανδίας) για την επιβεβαίωση της απόδοσης σύλληψης της ενέργειας.
- 2004: Αξιολόγηση μοντέλου με δοκιμές σε δεξαμενή κυμάτων στο Εργαστήριο Υδατικών Πόρων, στο Πανεπιστήμιο του Helsinki, για την μελέτη της υδροδυναμικής και τον λεπτομερή σχεδιασμό των πτερυγίων.
- 2005: Δοκιμή πρωτοτύπου κλίμακας 1:3 στο Ecuador Salinas σε περιβάλλον Ειρηνικού Ωκεανού με μεγάλες περιόδους φουσκωμάτων 15-20 δευτερόλεπτα. Μετρήσεις Doppler.
- 2005: Δοκιμή πρωτοτύπου κλίμακας 1:3 στο EMEC (European Marine Energy Center) του Orkney σε περιβάλλον Ατλαντικού Ωκεανού. Επίδειξη μοντέλου σε ήπιες και ακραίες χειμερινές συνθήκες και μετρήσεις της ταχύτητας των κυμάτων στο βυθό της θάλασσας με χρήση της συσκευής Doppler.
- 2006: Σχεδιασμός και κατασκευή του WaveRoller 1.
- 2007: Εγκατάσταση και σε λειτουργία των WaveRoller 1 και Ολοκληρωμένη Μέτρηση και Ανάλυση της συσκευής. (Peniche - Πορτογαλία)
- Τον Ιανουάριο του 2011, πραγματοποιήθηκε η δοκιμή της συσκευής WaveRoller κλίμακας 1:1 και από το καλοκαίρι του 2011 λειτουργεί πιλοτική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 1MW στην Πορτογαλία. Τον Ιανουάριο του 2012 στην Peniche, Πορτογαλία πραγματοποιήθηκε η τοποθέτηση πιλοτικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε πλατφόρμες και η τελική εγκατάσταση του σταθμού στην θάλασσα, θα πραγματοποιηθεί όταν οι θάλασσες ηρεμήσουν κατά τη διάρκεια των προσεχών μηνών.



Εικόνα 3.4.3.: Λειτουργία συσκευής WaveRoller

Πηγή: www.eepe.murdoch.edu.au/resources/info/Tech/wave/index.html

Poseidon's Organ

Το Poseidon's Organ της δανέζικης εταιρίας Floating Power Plant AS, είναι μια πλωτή υπεράκτια κατασκευή που μετατρέπει την ενέργεια των κυμάτων σε ηλεκτρική ενέργεια. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης και ως θεμελιώδης κατασκευή για την εγκατάσταση πάνω του ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών πάνελς, δημιουργώντας με αυτόν τον τρόπο μια υβριδική μονάδα ανανεώσιμης ενέργειας. Ένα από τα πλωτά πτερύγια του Poseidon's Organ απορροφάει την ενέργεια των θαλάσσιων κυμάτων και με τη χρήση μιας αντλίας διπλής λειτουργίας με πιστόνια, μετατρέπει την κυματική ενέργεια σε πίεση νερού που περνάει μέσα από ένα στρόβιλο που είναι συνδεδεμένος με μια γεννήτρια, που παράγει τελικά ηλεκτρισμό. Η καινοτόμα κατασκευή του πλωτού πτερυγίου εξασφαλίζει μέγιστη απορρόφηση της ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων. Τα κύματα ερχόμενα συναντούν πάντα τη πρόσοψη του Poseidon's Organ κλίμακας 1:2 έχει μήκος 230 μέτρα και αποτελείται από 10 πλωτά πτερύγια. Επίσης το Poseidon's Organ λειτουργεί και ως κυματοθραύστης αφού μειώνει σημαντικά το ύψος των κυμάτων που περνάνε από αυτό.

Η αρχική ιδέα του Poseidon's Organ έγινε το 1980 από τον Hans Marius Pedersen. Από το 1996 το Poseidon's Organ έχει κατασκευαστεί και δοκιμαστεί σε κλίμακες 1:25 και 1:50, ενώ παράλληλα έχει εξελιχθεί και ο μηχανολογικός σχεδιασμός του. Αυτό έχει οδηγήσει σε μια από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογίες εκμετάλλευσης της ενέργειας των κυμάτων στη σημερινή εποχή. Το 1998 ολοκληρώθηκε η δοκιμή ενός μοντέλου 4,2 μέτρα στο Aalborg University. Το 2001-2002 ολοκληρώνονται οι δοκιμές ενός μοντέλου πλάτους 8 μέτρων με ανεμογεννήτρια στο δανέζικο Hydraulic Institute. Την άνοιξη του 2007 ξεκίνησε η κατασκευή ενός μοντέλου Poseidon's Organ 37 κλίμακας 1:6 ανοιχτής θάλασσας για δοκιμή και επίδειξη (Εικόνα 3.4.4.). Το μοντέλο έχει πλάτος 37 μέτρα, μήκος 25 μέτρα, ύψος 6 μέτρα (κατάστρωμα) και ζυγίζει περίπου 200 τόνους και εγκαταστάθηκε στο Q4 στο Lolland της Δανίας την άνοιξη του 2008 και τον Σεπτέμβριο του 2008 ξεκίνησαν οι δοκιμές του συστήματος. Το 2009, μετά από 4 μήνες λειτουργίας, ολοκληρώθηκαν οι δοκιμές του Poseidon's Organ 37, με θετικά αποτελέσματα. Τέλος έχουν γίνει κάποιες υπολογισμοί και εκτιμήσεις για ένα Poseidon's Organ κλίμακας 1:2 για μια τοποθεσία εγκατάστασης στο πορτογαλικό τμήμα του Ατλαντικού Ωκεανού. Το μοντέλο αυτό εκτιμάται ότι θα έχει 35% απόδοση μετατροπής της ενέργειας των κυμάτων σε ηλεκτρισμό, συνολική εγκατεστημένη ισχύ (συμπεριλαμβανομένου 3 ανεμογεννητριών) ίση με 30MW, ετήσια παραγωγή ενέργειας από τα κύματα ίση με 28.207MWh και συνολική ετήσια παραγωγή από τις 3 ανεμογεννήτριες ίση με 22.075MWh.



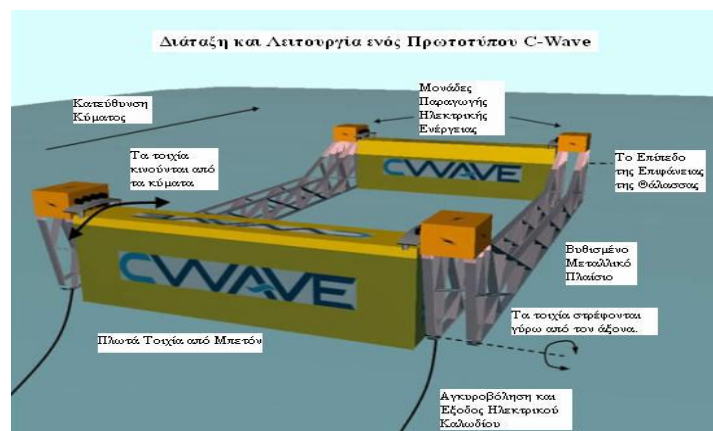
Εικόνα 3.4.4.: Συσσκευή Poseidon's organ σε κλίμακα 1:6.
Πηγή: www.poseidonorgan.com

C-Wave

Το C-Wave είναι μια νέα τεχνολογία μετατροπής της ενέργειας των κυμάτων ανοιχτής θαλάσσης της αγγλικής εταιρίας C-Wave Limited που ξεκίνησε το 2006 και ολοκληρώθηκε τον Φεβρουάριο του 2007. Οποιοσδήποτε είχε την εμπειρία να προσπαθήσει να σκαρφαλώσει ή να πηδήξει από μια βάρκα σε μια άλλη κατά την διάρκεια κυματικής δραστηριότητας, έχει βιώσει κατά κάποιον τρόπο την αρχή λειτουργίας του συστήματος C-Wave. Καθώς οι δύο βάρκες επιπλέουν η μία δίπλα στην άλλη, το κενό ανάμεσα τους διαρκώς ανοιγοκλείνει, κάνοντας δύσκολη τη μετάβαση. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το C-Wave χρησιμοποιεί τη διαρκή κίνηση για να κινήσει μια γεννήτρια και να παράγει ηλεκτρισμό. Το άνοιγμα και το κλείσιμο του κενού ανάμεσα στις βάρκες είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι όταν ένα κύμα περάσει κάτω από μια βάρκα, αυτή δεν κινείται πάνω-κάτω όπως μπορεί να φανταζόμαστε, αλλά στην πραγματικότητα κινείται κυκλικά, πάνω-κάτω από πλευρά σε πλευρά. Στην πραγματικότητα δεν είναι μόνο η βάρκα που κινείται κυκλικά, αλλά και το νερό επίσης. Καθώς το κύμα περνάει από δεξιά προς αριστερά, το νερό δεν κινείται από δεξιά προς αριστερά με την ίδια ταχύτητα με το κύμα. Κινείται σε κύκλο και μεταβιβάζει την ενέργεια του κύματος στον

επόμενο όγκο νερού, που με τη σειρά του επαναλαμβάνει την ίδια διαδικασία και πάει λέγοντας. Για αυτόν τον λόγο τα κύματα μπορούν να μεταφέρουν ταχύτατα μεγάλες ποσότητες ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις. Σε ένα σύστημα εκμετάλλευσης της ενέργειας των κυμάτων, μία πρακτική εφαρμογή αυτής της αρχής είναι η χρήση δύο ουδέτερα πλευστών τοιχιών σε απόσταση περίπου ενός μήκους κύματος, έτσι ώστε όταν το ένα κινείται προς τα εμπρός το άλλο να κινείται προς τα πίσω. Αυτή η συσκευή λειτουργεί σε ένα μεγάλο εύρος ζώνης γύρω από αυτό το διάστημα κύματος μισού μήκους. Ωστόσο, για να βελτιωθεί περαιτέρω η παραγωγή ενέργειας, ένα τρίτο τοίχιο μπορεί να προστεθεί σε άνιση απόσταση από τα άλλα δύο. Έτσι η συσκευή θα μπορεί να αποσπά ενέργεια από διαφορετικά μήκη κύματος και σε ανακατωμένη θάλασσα, που προκύπτει από τον συνδυασμό διαφορετικών μηκών κύματος.

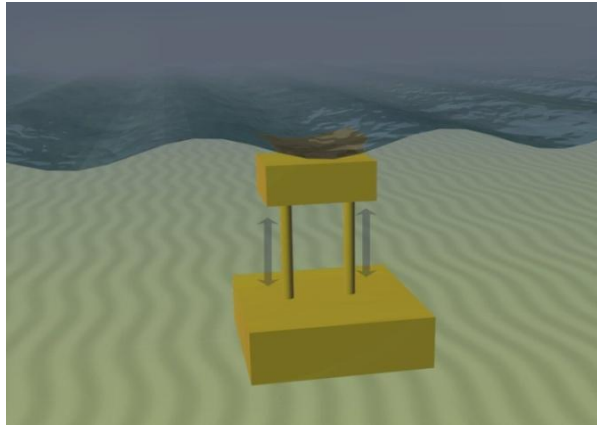
Η C-Wave Limited το 2009 εγκατέστησε συσκευή C-Wave κλίμακας 1:20 με σύνδεση στο δίκτυο και στο μέλλον σχεδιάζει να αναπτύξει πλωτές «φάρμες κυμάτων» σε βαθιά νερά σε απόσταση μεταξύ 5 και 20χιλιομέτρων από την ακτή.



Εικόνα 3.4.5.: Διάταξη και λειτουργία ενός πρωτοτύπου C-Wave
Πηγή: www.cwavepower.com

3.5. Υποθαλάσσια συσκευή διαφορικής υδροστατικής πίεσης- Submerget Pressure Differential

Βυθιζόμενη συσκευή που συνήθως εγκαθίσταται κοντά στην ακτή και προσαρτάται στον πυθμένα. Η κίνηση των κυμάτων προκαλεί την άνοδο και την πτώση της στάθμης της θάλασσας πάνω από τη συσκευή, πράγμα που δημιουργεί μια διαφορά υδροστατικής πίεσης η οποία αναγκάζει τη συσκευή να ανεβοκατεβαίνει με τα κύματα (Εικόνα 3.5.1.). Όταν σχεδιαστεί σωστά για την συγκεκριμένη κατάσταση της θάλασσας, η κατηγορία αυτή διαθέτει αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά σημειακής απορρόφησης (www.aquaret.com). Καλό παράδειγμα υλοποίησης της σχεδίασης αυτής μέχρι σήμερα είναι η AWS (Archimedes Wave Swing) (Farley, 2008), η συσκευή CETO, η OWEC και η Waverotor.



Εικόνα 3.5.1.:Λειτουργία Υποθαλάσσιας συσκευής διαφορικής πίεσης
Πηγή:www.aquaret.com

"Κυματαιώρα του Αρχιμήδη"- (Archimedes Wave Swing- AWS) (Bhattacharyya et al., 2003)

Μέθοδος που επινοήθηκε από τον F. Gardener και αναπτύχθηκε ήδη από το 1995 από την σκωτσέζικη εταιρία AWS Ocean Energy Ltd, με συνεχόμενη μέση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ως και 1MW. Ο μετατροπέας κυματικής ενέργειας AWS είναι ένα πλωτό σώμα κυλινδρικού σχήματος δεμένο στο βυθό της θάλασσας σε βάθη 40-100 μέτρα (υπεράκτια συσκευή).

Η αρχή πάνω στην οποία βασίζεται είναι ότι θεωρεί τη θάλασσα ως μια τεράστια μάζα η οποία ταλαντώνεται με σταθερή συχνότητα. Το μέσο μήκος των κυμάτων της θάλασσας που διανύουν μεγάλες αποστάσεις με μικρές απώλειες ενέργειας είναι 120 m και η μέγιστη ισχύς που μεταφέρουν φθάνει τα 100kW/m σε περιοχές ή περιόδους μεγάλου κυματισμού. Η "Κυματαιώρα του Αρχιμήδη" (Εικόνα 3.5.2.) αποτελείται από διατάξεις κατακόρυφων θαλάμων συνδεδεμένων μεταξύ τους, οι οποίοι πληρούνται με αέρα που βρίσκονται εγκατεστημένοι κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Στο άνω μέρος κάθε θαλάμου υπάρχει ένας κινητός πλωτήρας, υπολογισμένος έτσι ώστε να διατηρείται σε ισορροπία, πιεζόμενος από το βάρος της στήλης νερού πάνω από αυτόν. Όταν πάνω από έναν θάλαμο φθάσει η κορυφή ενός κύματος, ο πλωτήρας πιέζεται προς τα κάτω από το πρόσθετο βάρος της στήλης νερού, πιέζοντας με τη σειρά του μέσω ενός εμβόλου τον αέρα του θαλάμου κάτω από αυτόν. Ο πιεζόμενος αέρας διοχετεύεται σε άλλον θάλαμο (στον οποίο δεν έχει φθάσει ακόμη η κορυφή του κύματος) και ο πλωτήρας κατέρχεται. Η διαδικασία αυτή αντιστρέφεται όταν πάνω από τον θάλαμο έλθει η κοιλία του κύματος, οπότε ο πλωτήρας ανέρχεται. Καθώς το κύμα περνά διαδοχικά πάνω από κάθε θάλαμο (κάθε διάταξη αποτελείται από τρεις συνδεδεμένους θαλάμους) οι πλωτήρες εκτελούν κατακόρυφη παλινδρόμηση, υπό την επίδραση της αυξομειούμενης πίεσης. Η παλινδρομική κίνηση των πλωτήρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κίνηση ηλεκτρογεννητριών. Οι πλωτήρες έχουν σχήμα κωνικό και είναι ανοικτοί στο κάτω μέρος τους. Οι συνδεδεμένοι θάλαμοι απέχουν απόσταση 40m μεταξύ τους.



Εικόνα 3.5.2.: Ο πειραματικός μετατροπέας AWS φυσικής κλίμακας που εγκαταστάθηκε έξω από τις ακτές της Πορτογαλίας το 2004

Πηγή: www.awsoccean.com

Ένα πρωτότυπο της "Κυματαιώρας του Αρχιμήδη" κλίμακας 1:20 έχει κατασκευασθεί και δοκιμασθεί με επιτυχία στο Ευρωπαϊκό Θαλάσσιο Ενεργειακό Κέντρο στο Orkney της Σκωτίας. Σε πλήρη κλίμακα κάθε πλωτήρας της διάταξης έχει διάμετρο 20 m και θα ζυγίζει 1.000 τόνους. Οι υπολογισμοί των ερευνητών του Κέντρου στο οποίο αναπτύσσεται η "Κυματαιώρα" δείχνουν ότι κάθε διάταξη τριών τέτοιων θαλάμων μπορεί να αποδώσει ηλεκτρική ισχύ έως 2,7 MW. Η "Κυματαιώρα" του Αρχιμήδη έχει εγκατασταθεί από το 2004 στις ακτές της Πορτογαλίας ισχύος 2 MW. Το αποτέλεσμα της εξέλιξης της αρχικής συσκευής AWS, είναι η συσκευή AWS III. Η AWS-III είναι σχεδιασμένη για εγκατάσταση σε βάθη νερού μεταξύ 70-150m, με μέση απόδοση 2.5MW. Το Coventry University του Ηνωμένου Βασιλείου πραγματοποιεί εκτεταμένες δοκιμές σε δεξαμενές αλλά και στο μοντέλο κλίμακας 1:9 που βρίσκεται στην λίμνη Loch Ness από το 2010 μέχρι τις αρχές του 2012. Στόχος της εταιρίας είναι το 2013, η κατασκευή ενός πλήρους συστήματος AWS-III ισχύς 2.5MW και το 2015 η κατασκευή συστήματος ισχύος 10MW (4 AWS III συσκευές) (www.awsoccean.com).

CETO

Η τεχνολογία CETO ανήκει στην αυστραλιανή εταιρία Renexable Energy Holdings Plc που συνεργάζεται με την Carnegie Corporation Ltd και την EDF EN για την ανάπτυξη και λειτουργία του CETO στο Νότιο και Βόρειο Ημισφαίριο αντίστοιχα. Το CETO είναι πλήρως βυθισμένο κάτω από την επιφάνεια του νερού και αντλώντας θαλασσινό νερό στη ξηρά, η τεχνολογία του επιτρέπει την παραγωγή ηλεκτρισμού με μηδενικές εκπομπές. Οι «φάρμες κυμάτων» με CETO είναι κατάλληλες για εγκατάσταση σε βάθος υδάτων περισσότερο από 15 μέτρα. Οι μονάδες του CETO είναι αυτορυθμιζόμενες σε παλίρροιας, διάφορες θαλάσσιες καταστάσεις και κυματικές συνθήκες, γεγονός που τις καθιστά ικανές να αποδίδουν σε μία μεγάλη ποικιλία από κυματικά ύψη κάθε κατεύθυνσης.

Αν και η αρχική ιδέα του μετατροπέα CETO συλλήφθηκε το 1975 από τον Alan Burns, οι αρχικές δοκιμές ξεκίνησαν το 1999, ενώ ο λεπτομερής σχεδιασμός του ολοκληρώθηκε το 2003. Η κατασκευή του πρώτου πρωτοτύπου ξεκίνησε στο τέλος του ίδιου χρόνου. Το πρωτότυπο CETO I απέδειξε την ορθή λειτουργία του το 2006, ενώ το 2008 πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός του CETO II. Αυτό το μοντέλο δοκιμάζεται στο Fremantle από το 2009, ενώ ήδη έχει σχεδιαστεί το CETO III, όπου πραγματοποιούνται δοκιμές στα ύδατα του Garden Island στην Δυτική Αυστραλία. Τα τελευταία νέα αναφέρουν ότι η εταιρία ολοκληρώνει και τις τελευταίες λεπτομέρειες για μία φάρμα επίδειξης 50MW μέχρι το 2012, που θα μπορεί να τροφοδοτήσει με ηλεκτρική ενέργεια περίπου 40.000 σπίτια (www.carnegiewave.com).



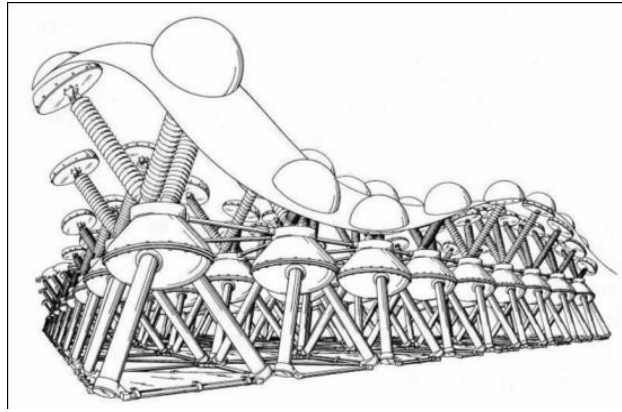
Εικόνα 3.5.3.: Υπεράκτια μονάδα CETO σε λειτουργία στη Fremantke στην Δυτική Αυστραλία.

Πηγή: www.carnegiwave.com

OWEC

Το OWEC (Ocean Wave Energy Converter) της αμερικάνικης εταιρίας OWECO Ocean Wave Energy Company με έδρα το Rhode Island (USA), είναι ένας υπό ανάπτυξη μετατροπέας κυματικής ενέργειας των ωκεανών. Η τεχνολογία OWEC έχει κατοχυρωθεί με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας (U.S. Patent 4.232.230 & U.S. Patent 4.672.222). Η σύλληψη της αρχικής ιδέας του συστήματος OWEC χρονολογείται πίσω στο 1987 και από τότε η τεχνολογία αυτή βρίσκεται υπό συνεχή εξέλιξη.

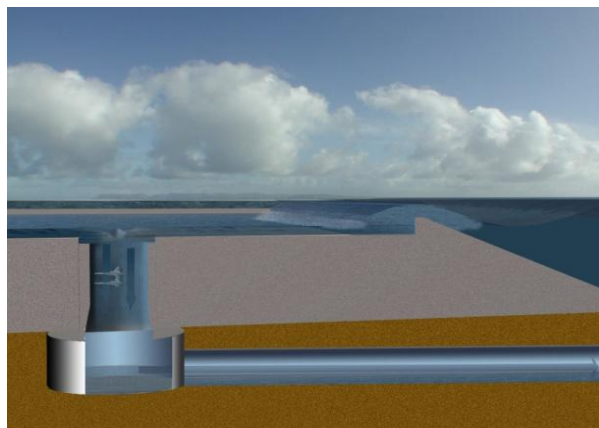
Η αρχή λειτουργίας του μετατροπέα βασίζεται στη σχετική κίνηση που προκαλούν τα θαλάσσια κύματα ανάμεσα σε δύο σημαδούρες, ή μία εκ των οποίων βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας ενώ η άλλη είναι βυθισμένη τόσο ώστε να μην επηρεάζεται τα διερχόμενα κύματα. Η σημαδούρα της επιφάνειας έχει προσαρτημένη μια μεταλλική βέργα ενώ η βυθισμένη σημαδούρα έχει προσαρτημένο πάνω της ένα κυλινδρικό σωλήνα, μέσα στον οποίο κινείται η βέργα. Η επιφανειακή σημαδούρα είναι γεμάτη με αέρα ενώ η βυθισμένη έχει μια υπολογισμένη αναλογία αέρα προς μάζα ώστε να διατηρείται στην επιθυμητή θέση κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Καθώς περνάει ένα κύμα η σημαδούρα της επιφάνειας ανεβοκατεβαίνει και παράγεται ηλεκτρισμός από την κίνηση του συστήματος της βέργας ως προς τον σωλήνα που περιέχει μια γραμμική ηλεκτρική γεννήτρια. Η μορφή μιας μονάδας μετατροπής OWEC αποτελείται από τρεις κωνοειδείς επιφανειακές σημαδούρες με άξονες σε κλίση 60° ως προς την οριζόντιο, που μετατρέπουν την κίνηση τους σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των γραμμικών γεννητριών που περιέχονται σε μια στεγανή σημαδούρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Δηλαδή για κάθε τρεις επιφανειακές σημαδούρες που κινούνται αξονικά προς διαφορετικές κατευθύνσεις, υπάρχει και μια σημαδούρα μετατροπής της κινητικής ενέργειας των τριών αξόνων σε ηλεκτρική. Με την κεκλιμένη τοποθέτηση των τριών αξόνων προς διαφορετικές κατευθύνσεις, διευρύνεται η απόσταση σύλληψης των σημαδούρων λόγω της ταυτόχρονης απορρόφησης τόσο της δυναμικής όσο και της κινητικής ενέργειας των θαλάσσιων κυμάτων.



Εικόνα 3.5.4: Πλέγμα διασυνδεδεμένων μετατροπέων OWEC.
Πηγή: www.owec.co

3.6. Συσκευή υπερχείλισης - Overtopping device

Η συσκευή αποτελείται από ένα τοίχωμα επάνω στο οποίο σπάνε τα κύματα και το νερό συλλέγεται σε μία δεξαμενή αποθήκευσης (πλωτή ή σταθερή). 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. Η συσκευή υπερχείλισης μπορεί να κάνει χρήση συλλεκτών για την συγκέντρωση της κυματικής ενέργειας (Εικόνα 3.6.1.). Οι συσκευές υπερχείλισης είναι συνήθως μεγάλες κατασκευές λόγω του απαιτούμενου χώρου για τη δεξαμενή, η οποία χρειάζεται να εξασφαλίζει μια ελάχιστη χωρητικότητα αποθήκευσης (www.aquaret.com). Οι συσκευές μπορεί να είναι πλωτές (εγκατεστημένες μακριά από την ακτή-υπεράκτιες-) όπως η Wave Dragon, (Nam et al., 2008) που επί του παρόντος είναι ο μεγαλύτερος μετατροπέας κυματικής ενέργειας που αναπτύσσεται ή και σταθερές κατασκευές στη στεριά (επάκτιες) όπως η TapChan και η Sea Slot Cone Generator- SSG- η οποία ενσωματώνεται σε κυματοθραύστη.



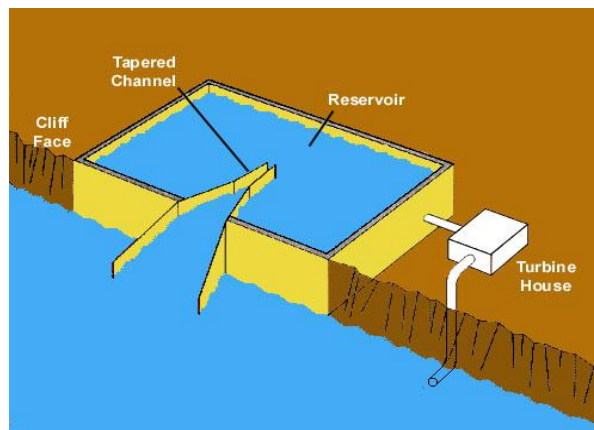
Εικόνα 3.6.1.: Λειτουργία Συσκευή υπερακόντισης
Πηγή: www.aquaret.com

TapChan (Tapered Channel) (Zhen et al., 2008)

Είναι διάταξη εγκαταστημένη στην ακτή (onshore) από το 1985 στο Toftstallen της Νορβηγίας και μπορεί να παράγει μέχρι και 350kW. Αποτελείται από ένα κανάλι που

στενεύει βαθμιαία και καταλήγει σε μια δεξαμενή κατασκευασμένη στην ακτή μερικά μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η στένωση του καναλιού αναγκάζει τα κύματα που εισέρχονται σε αυτό να αυξάνονται σε ύψος καθώς οδεύουν προς το εσωτερικό του και τελικά να υπερχειλίζουν πάνω από τα τοιχώματα του και να χύνονται μέσα στη δεξαμενή (Εικόνα 3.6.2.). Η διάταξη TapChan μετατρέπει την κινητική ενέργεια των κυμάτων σε δυναμική συσσωρεύοντας την, καθώς το νερό συλλέγεται στη δεξαμενή. Το νερό της δεξαμενής διοχετεύεται στη συνέχεια και πάλι προς τη θάλασσα, οπότε κατερχόμενο λόγω της υψομετρικής διαφοράς δεξαμενής-θάλασσας αποδίδει τη δυναμική ενέργεια του κινώντας έναν στρόβιλο ο οποίος ενεργοποιεί με τη σειρά του μια ηλεκτρογεννήτρια.

Τα πλεονεκτήματα αυτής της διάταξης, εκτός από το ότι δεν παράγει ρύπους κανενός είδους, η απλότητα της (ελάχιστα κινούμενα μέρη) και το μικρό κόστος συντήρησης, είναι η μεγάλη αξιοπιστία και η παροχή ενέργειας όταν αυτή ζητηθεί (εφόσον η ενέργεια μπορεί να παραμένει συσσωρευμένη στη δεξαμενή). Το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε όλες τις ακτές. Κατάλληλες για το σύστημα TapChan είναι οι ακτές που έχουν σταθερό κυματισμό, με κύματα αρκετά υψηλής μέσης ισχύος και παλίρροια που δεν ξεπερνά το 1m, μεγάλο βάθος πυθμένα κοντά στην ακτογραμμή και κατάλληλη θέση στην ακτή για την κατασκευή του καναλιού και της δεξαμενής.

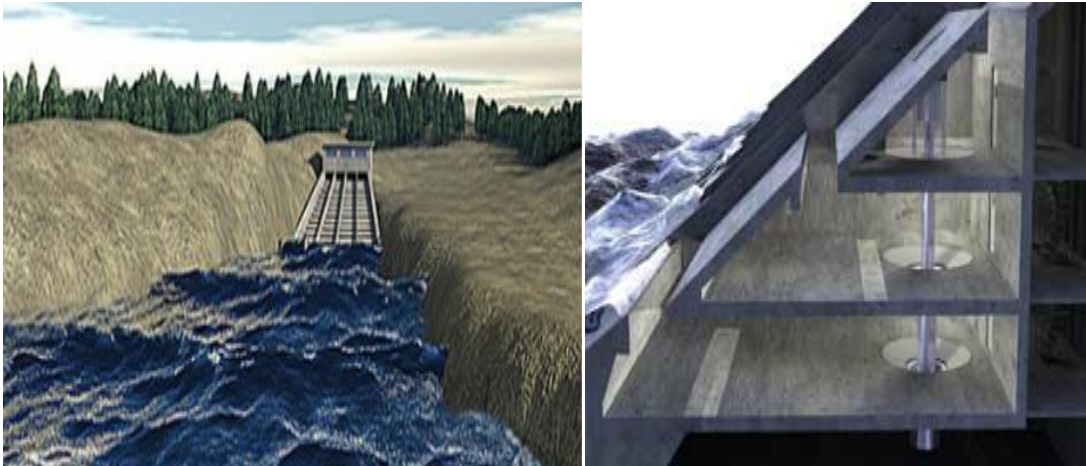


Εικόνα 3.6.2.: Πειραματική συσκευή TapChan
Πηγή: www.taperedchannelwaveenergy.weebly.com

SSG

Η νορβηγική εταιρία Wave Energy AS ίδρυσε το 2004 την Γεννήτριας Κυμάτων Αυλακωτού Κώνου SSG (Seawave Slot-Cone Generator). Το SSG είναι ένας μετατροπέας κυματικής ενέργειας, με προβλεπόμενη ισχύ 20.000 kW, 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 θα παγιδεύεται στις δεξαμενές θα διέρχεται μέσα από τον πρωτοποριακό πολύ-τιμηματικό στρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Nam et al., 2008). Η χρήση πολλαπλών δεξαμενών θα έχει ως αποτέλεσμα μια υψηλότερη συνολική απόδοση σε σύγκριση με τις κατασκευές μίας μόνο δεξαμενής (Εικόνα 3.6.3.). Μπορεί να εφαρμοστεί ως πλωτή εγκατάσταση ανοικτής θάλασσας ή ως σταθερή εγκατάσταση ακτής ενσωματωμένη σε κυματοθραύστη. 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 απόδοσή του. Για τη σταθερή εγκατάσταση στην ακτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια πλατφόρμα πετρελαίου ως βάση, παρατείνοντας έτσι τη ζωή χρησιμοποίησής της και αναβάλλοντας την οριστική απόσυρση της (Margheritini, 2006).

Τον Δεκέμβριο του 2005 μια κοινοπραξία ανάπτυξης με συντονιστή την εταιρία WaveEnergy AS, ξεκίνησε ένα πειραματικό πρότζεκτ στο νησί Kvitsoy στη Νορβηγία. Ο στόχος του πειραματικού πρότζεκτ είναι η ανάπτυξη ενός πρωτοτύπου πλήρους κλίμακας της κυματοθραυστικής κατασκευής SSG και η εγκατάστασή του στη δυτική ακτή του νησιού σε κυματική ενέργεια 19kW/m. Επίσης ένα παράλληλο πρότζεκτ, το MST, αφορά έναν πολύ-τμηματικό στρόβιλο που θα χρησιμοποιεί διαφορετικά ύψη κυματικών μετώπων σε ένα κοινό άξονα. Στόχος της εταιρίας είναι η ανάπτυξη, η δοκιμή και η εγκατάσταση ενός πρωτοτύπου πλήρους κλίμακας. Οι εργασίες έχουν ξεκινήσει από τον Ιανουάριο του 2005 σε συνεργασία με το NTNU (Norwegian University of Science and Technology).



Εικόνα 3.6.3.: α) Προτεινόμενη παράκτια εφαρμογή της τεχνολογίας SSG σε κόλπο σφηνοειδούς σχήματος β)Συσκευή SSG ανοιχτής θάλασσας

Πηγή:www.waveenergy.no

Wave Dragon (Christensen et al., 2005)

Ο ενεργειακός μετατροπέας κυμάτων Wave Dragon της δανέζικης εταιρίας Wave Dragon Ltd είναι ένας μετατροπέας της κυματικής ενέργειας τύπου υπερχειλίσης, που επιπλέει στην επιφάνεια της θάλασσας, ενώ είναι δεμένος στον βυθό. Η συσκευή Wave Dragon ανυψώνει τα κύματα της θάλασσας τα οποία αποθηκεύονται προσωρινά σε μια μεγάλη δεξαμενή, πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Αυτό το νερό αφήνεται από τη δεξαμενή μέσω διαφόρων στρόβιλων, οι οποίοι αρχίζουν να περιστρέφονται, με αποτέλεσμα να παράγεται ηλεκτρισμός λόγω της υψομετρικής διαφοράς (Εικόνα 3.6.4.). Το Wave Dragon αγκυροβολείται στη θάλασσα (όπως ένα πλοίο) σε βάθος τουλάχιστον 30 μέτρα. Προτιμάται βάθος μεγαλύτερο των 40 μέτρων για την εκμετάλλευση των κυμάτων στο μέγιστο δυνατό βαθμό, προτού χάσουν μεγάλο ποσοστό της ενέργειας τους καθώς πλησιάζουν στη παράκτια περιοχή. Το Wave Dragon είναι μία συσκευή που ενώ επιπλέει στην επιφάνεια της θάλασσας θα πρέπει να διατηρείται όσο το δυνατόν σταθερή αφού δεν μετατρέπει τα κύματα σε ηλεκτρική ενέργεια με την αναπήδηση ή με την κίνηση κάποιων τμημάτων λόγω της κίνησης των θαλάσσιων κυμάτων, αλλά χρησιμοποιεί την πιθανή ενέργεια του νερού που το ξεπερνά. Για αυτό το λόγο είναι σχεδιασμένη με μία ειδική κυρτή ράμπα και με ανακλαστές κυμάτων. Επειδή όταν το κύμα φτάνει στη ράμπα αλλάζει η γεωμετρία του και ανυψώνεται, το σχήμα της ράμπας είναι ελλειψοειδές για τη μεγιστοποίηση της εκμετάλλευσης αυτού του φαινομένου. Ο κύριος ρόλος των ανακλαστών είναι να συγκεντρώνουν και να κατευθύνουν τα κύματα προς τη ράμπα.

Το πρώτο πρωτότυπο Wave Dragon κλίμακας 1:4.5 παρήγαγε την πρώτη δύναμή του το Μάιο του 2003 στο Nissum Bredning της Δανίας με μέγιστη εκτιμώμενη ισχύ ανά μονάδα 11MW. Τον Απρίλιο του 2007 κατατέθηκε η Αναφορά της Περιβαλλοντικής Επίδρασης του Wave Dragon από τη Wave Dragon Ltd, έπειτα από διαβουλεύσεις, μελέτες και έρευνες δύο

χρόνων. Αυτό αποτελεί το πρώτο σημαντικό βήμα για την κατασκευή μιας εγκατάστασης παραγωγής ενέργειας με Wave Dragons ισχύος 70MW στην Κελτική Θάλασσα μέχρι το 2010. Η συσκευή αυτή προορίζεται να δοκιμαστεί για 3-5 χρόνια.



Εικόνα 3.6.4.: Το πρωτότυπο μοντέλο Wave Dragon κλίμακας 1:4.5 στο Nissum Brending της Δανίας.

Πηγή: www.wavedragon.net

3.7. Άλλες συσκευές

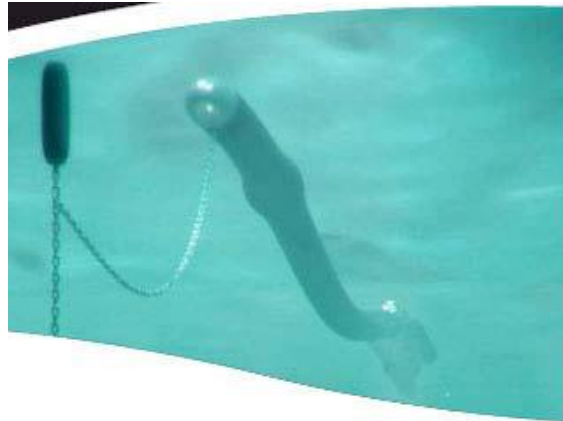
Στις παραπάνω τεχνολογίες θα πρέπει να προστεθούν και διάφορες άλλες συσκευές διαφορετικής σχεδίασης που δεν ανήκουν στις πλέον γνωστές τεχνολογίες, όπως για παράδειγμα εύκαμπτες κατασκευές που αλλάζουν σχήμα και όγκο (Anaconda).

Anaconda

Η συσκευή Anaconda (Εικόνα 3.7.1.) πρόκειται για ένα πλωτό εύκαμπτο σωλήνα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας το οποίο είναι αγκυρωμένο στον πυθμένα της θάλασσας. Η συσκευή Anaconda μπορεί να εγκατασταθεί σε οποιαδήποτε ακτή με μήκος κύματος της τάξης 25kW. Τα γιγαντιαία θαλάσσια φίδια από καουτσούκ θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν την πλούσια καθαρή ενέργεια της θάλασσας στα ανοικτά των ακτών της Βρετανίας, εντός πέντε ετών, σύμφωνα με τους εφευρέτες της συσκευής. Κατασκευασμένο από ένα σύνθετο ύφασμα και από καουτσούκ, η συσκευή Anaconda χρησιμοποιεί την κίνηση του επερχόμενου κύματος για να οδηγήσει έναν στρόβιλο. Η συσκευή δοκιμής είναι 9 μέτρα μήκος αλλά οι κατασκευαστές ισχυρίζονται ότι μια πλήρης συσκευή θα μπορούσε να είναι μέχρι και 200 μέτρα μήκος, 7 μέτρα διαμέτρου και ικανή να παράγει 1MW ενέργεια, αρκετή για χιλιάδες σπίτια. Κάθε συσκευή Anaconda είναι δεμένη στο βυθό της θάλασσας και τοποθετημένη κατά μέτωπο με τα επερχόμενα κύματα. Κινούμενο κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, το φούσκωμα του κύματος χτυπά το μπροστινό μέρος της συσκευής (πλώρη) και δημιουργεί ένα εξόγκωμα που σταδιακά διογκώνεται και ταξιδεύει στο πίσω μέρος του σωλήνα. Όταν το κύμα φθάνει στην πρύμνη της συσκευής λειτουργεί ένας στρόβιλος και η γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια (Farley et al, 2006).

Δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί σε μια δεξαμενή τεχνικού κύματος στην εταιρεία QinetiQ στο Gosport, Hampshire. Η εταιρία οραματίζεται την εγκατάσταση της, στις δυτικές και νότιες ακτές της Αμερικής, στην Αυστραλία αλλά και στις δυτικές ακτές της Ευρώπης. Όταν ολοκληρωθούν οι δοκιμές, στοχεύουν στην κατασκευή ενός μοντέλου κλίμακας 1:4 για πιθανές δοκιμές στη θάλασσα. Αν τα αποτελέσματα είναι θετικά, υπολογίζουν ότι οι πρώτες

συσκευές με εμπορική παραγωγή να εγκατασταθούν στα ανοικτά της Βρετανίας ως το 2014 (www.bulgewave.com).



Εικόνα 3.7.1.: Συσκευή Anaconda
Πηγή: www.bulgewave.com

Συγκεντρωτικός πίνακας των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα θαλάσσια κύματα, χωρισμένους ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας και την περιοχή εγκατάστασης, μαζί με τα βασικότερα χαρακτηριστικά και τις πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν για τη κάθε μία ξεχωριστά βρίσκεται στο Παράρτημα Α στη σελίδα 92.

4. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ

Τα θαλάσσια κύματα είναι διαταραχές της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας και η διαταραχή αυτή εμφανίζεται με την παρουσία οριζόντιων και κάθετων κινήσεων μεταξύ των στοιχειωδών σωματιδίων του νερού. Η αρχική διαταραχή που είναι απαραίτητη για τη δημιουργία ενός θαλάσσιου κυματισμού, είναι ο άνεμος που πνέει πάνω από την ήρεμη επιφάνεια της θάλασσας και η πραγματική κατάσταση της θάλασσας μπορεί να θεωρηθεί ως επαλληλία άπειρων αρμονικών κυματισμών.

4.1. Εκτίμηση κυματικού δυναμικού σε απλό αρμονικό κυματισμό

Στο εδάφιο αυτό, παρουσιάζεται η απλούστερη μαθηματική προσέγγιση για την μελέτη των διδιάστατων επιφανειακών κυματισμών βαρύτητας, δηλαδή η λύση του γραμμικοποιημένου προβλήματος συνοριακών τιμών για το δυναμικό ταχύτητας και την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας, που είναι ο απλός αρμονικός κυματισμός. Η θεωρία αυτή αναπτύχθηκε από τον Airy (1845) για μικρού πλάτους κυματισμούς και αναφέρεται συχνά και ως «γραμμική θεωρία κυματισμών». Η γραμμική θεωρία κυματισμών βασίζεται στην παραδοχή ότι το πλάτος του κυματισμού θεωρείται μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος και το βάθος του πυθμένα.

4.1.1. Υποθέσεις και βασικές εξισώσεις ροής για τη μελέτη των επιφανειακών κυματισμών

Ότι ακολουθεί στη συνέχεια βασίζεται σε μεγάλο μέρος στα βιβλία Dean et al., 1991; Holthuijsen, 2007, και σε Σημειώσεις μαθημάτων Σουκισιάν, 2000-2004; Αθανασούλη & Μπελιμπασάκη, 2003.

Οι θεμελιώδεις υποθέσεις της γραμμικής θεωρίας κυματισμών είναι πως το θαλασσινό νερό θεωρείται τέλειο, συνεχές και ασυμπιεστο ρευστό. Ακόμα, η ροή του θαλασσινού νερού θεωρείται αστρόβιλη. Οι ειδικές αναιρετικές υποθέσεις που ακολουθούν και ισχύουν μόνο για την γραμμική θεώρηση των επιφανειακών κυματισμών, οριοθετούν το υπόβαθρο για την μελέτη των γραμμικών κυματισμών.

Ορίζοντας το πεδίο ροής μέσω ενός καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων $O \ x, y, z$, με την αρχή O του συστήματος στη μέση στάθμη της επιφάνειας της θάλασσας οι ειδικές υποθέσεις της γραμμικής θεωρίας κυματισμών διατυπώνονται ως ακολούθως:

1. Ο πυθμένας της θάλασσας είναι αδιαπέρατος και το βάθος του d είναι σταθερό.
2. Η κυματική περίοδος T παραμένει σταθερή.
3. Η διάδοση των κυματισμών γίνεται σε δύο διαστάσεις. Αυτό σημαίνει ότι το ύψος κύματος H παραμένει σταθερό και το μέτωπο του κυματισμού είναι κάθετο στην κατεύθυνση διάδοσής του.
4. Το ύψος κύματος H είναι μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος L ($H/L \ll 1$) και το βάθος πυθμένα d ($H/d \ll 1$).

Θεωρώντας σε σταθερό βάθος d ένα κυματισμό με σταθερό μήκος L και περίοδο T (σταθερή), τότε και η ταχύτητα του κύματος παραμένει σταθερή σύμφωνα με την εξίσωση $C = L/T$. Αυτό σημαίνει ότι τα σημεία του πεδίου ροής τα οποία απέχουν απόσταση L μεταξύ τους συμπεριφέρονται ρευστομηχανικά με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, δηλαδή:

$$\Phi_{x,t} = \Phi_{x+L,t} .$$

Επίσης, σημαίνει ότι η ρευστομηχανική κατάσταση σε ένα σημείο του πεδίου ροής μια

χρονική στιγμή t είναι ακριβώς η ίδια με αυτή μετά την παρέλευση χρόνου T , δηλαδή:

$$\Phi(x, t) = \Phi(x, t+T) .$$

Οι παραπάνω σχέσεις εκφράζουν τις **συνθήκες περιοδικότητας** στο χώρο και το χρόνο αντίστοιχα.

Οι βασικές εξισώσεις ροής για τη μελέτη των επιφανειακών κυματισμών είναι οι εξής:

- Εξίσωση διατήρησης της μάζας για ασυμπιεστο ρευστό

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 . \quad (4.1.1.1)$$

- Εξίσωση της υδροστατικής πίεσης στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού

$$P = -\rho g z . \quad (4.1.1.2)$$

- Εξισώσεις κίνησης Navier-Stokes για αστρόβιλη ροή

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} , \quad (4.1.1.3)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} , \quad (4.1.1.4)$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - g . \quad (4.1.1.5)$$

- Η ανωτέρω εξίσωση για την περίπτωση που έχουμε ελεύθερη επιφάνεια καταλήγει στην Εξίσωση Laplace

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 . \quad (4.1.1.6)$$

- Εξίσωση Bernoulli

$$P(x, y, z, t) = -\rho g z - \frac{\rho}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] - \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} . \quad (4.1.1.7)$$

4.1.2. Διατύπωση του προβλήματος των κυματισμών μικρού πλάτους

Για την περίπτωση των κυματισμών μικρού πλάτους, η διαφορική εξίσωση δεύτερης τάξης που διέπει τη κίνηση του ρευστού στην περιοδική, διδιάστατη κίνηση είναι η εξίσωση Laplace για το αστρόβιλο πεδίο ροής:

$$\nabla \vec{V} = \nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 , \quad (4.1.2.1)$$

όπου το πεδίο ταχυτήτων \vec{V} συνδέεται με το δυναμικό του Φ μέσω της σχέσης

$$\vec{V}_{x,z,t} = \frac{\partial \Phi}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \vec{j} = \nabla \Phi. \quad (4.1.2.2)$$

Οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος των επιφανειακών κυματισμών διακρίνονται σε κινηματικές συνοριακές συνθήκες, δηλαδή κανόνες που πρέπει να ικανοποιούνται από τις ταχύτητες των μορίων του ρευστού καθώς και σε δυναμικές συνοριακές συνθήκες, δηλαδή κανόνες που πρέπει να ικανοποιούνται από τις δυνάμεις και τις πιέσεις που ασκούνται στα μόρια του ρευστού σε συγκεκριμένα όρια του πεδίου ροής. Προϋπόθεση για να ισχύουν οι συνοριακές συνθήκες στο συγκεκριμένο πρόβλημα, είναι ότι δεν υφίσταται ροή μεταξύ των ορίων: στη διεπιφάνεια νερού-πυθμένα (θεωρούμε αδιαπέραστος πυθμένας) και στη διεπιφάνεια νερού-ατμόσφαιρας.

Η Κινηματική συνοριακή Συνθήκη Πυθμένα (Κ.Σ.Π.), για βάθος πυθμένα d $x = const$ και διδιάστατη ροή γράφεται:

$$w = -\frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad z = -d. \quad (4.1.2.3)$$

Στην ελεύθερη επιφάνεια πρέπει να ικανοποιούνται δύο συνθήκες. Η κινηματική και η δυναμική

Η Κινηματική συνοριακή Συνθήκη Ελεύθερης Επιφάνειας (Κ.Σ.Ε.) για διδιάστατη ροή γράφεται:

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \Phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad z = \eta \quad x, t. \quad (4.1.2.4)$$

Η Δυναμική συνοριακή Συνθήκη Ελεύθερης Επιφάνειας (Δ.Σ.Ε.), εφόσον δεχόμαστε ότι η ελεύθερη επιφάνεια μεταβάλλεται έτσι ώστε η πίεση να είναι παντού η ίδια (ίση με την ατμοσφαιρική), είναι απλά η εξίσωση Bernoulli για $P_n = 0$ και γράφεται:

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + g\eta = C(t), \quad z = \eta \quad x, t. \quad (4.1.2.5)$$

Τέλος, παραθέτουμε και τις **Συνθήκες Περιοδικότητας (Σ.Π.)** στο χώρο και στον χρόνο:

$$\Phi_{x,t} = \Phi_{x+L,t} \quad (4.1.2.6a)$$

$$\Phi_{x,t} = \Phi_{x,t+T}. \quad (4.1.2.6b)$$

4. 1.3.Επίλυση του προβλήματος των κυματισμών μικρού πλάτους

Η επίλυση των κυματισμών μικρού πλάτους απαιτεί ουσιαστικά την επίλυση της εξίσωσης Laplace, δηλαδή υπολογίζεται το δυναμικό ταχύτητας $\Phi(x, z, t)$ με τις συνοριακές συνθήκες για κυματισμούς σταθερής περιόδου (σταθερού μήκους L). Η μέθοδος επίλυσης της γραμμικής διαφορικής εξίσωσης Laplace βασίζεται στην μέθοδο χωρισμού των μεταβλητών:

$$\Phi(x, z, t) = f_x(x) f_z(z) f_t(t), \quad (4.1.3.1)$$

όπου οι $f_x(x)$, $f_z(z)$, $f_t(t)$ εξαρτώνται μόνον από τις μεταβλητές x , z και t αντίστοιχα. Δεδομένου ότι η συνάρτηση $\Phi(x,z,t)$ είναι περιοδική ως προς το χρόνο και η εξίσωση Laplace δεν περιέχει χρονικές παραγώγους επιλέγουμε:

$$f_t(t) = \sin \omega t,$$

Η συνθήκη περιοδικότητας της Φ ως προς το χρόνο, σχέση (4.1.2.6b), επάγει και την ικανοποίηση της συνθήκης $\sin \omega t = \sin[\omega t + T]$. Αναλύοντας το ημίτονο στο δεξί μέλος παίρνουμε $\omega = 2\pi/T$, που είναι η κυκλική συχνότητα ω .

Εισάγοντας λοιπόν, τη σχέση $f_t t = \sin \omega t$ στη σχέση (4.1.3.1) και αντικαθιστώντας στην εξίσωση Laplace παίρνουμε:

$$\frac{d^2 f_x(x)}{dx^2} f_z(z) \sin \omega t + f_x(x) \frac{d^2 f_z(z)}{dz^2} \sin \omega t = 0. \quad (4.1.3.2a)$$

Διαιρώντας και τα δύο μέλη της ανωτέρω εξίσωσης με Φ προκύπτει:

$$\frac{1}{f_x(x)} \frac{\partial^2 f_x(x)}{\partial x^2} + \frac{1}{f_z(z)} \frac{\partial^2 f_z(z)}{\partial z^2} = 0. \quad (4.1.3.2b)$$

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης εξαρτάται μόνον από το x και ο δεύτερος μόνον από το z . Κατά συνέπεια, για να ικανοποιείται η εξίσωση θα πρέπει ο έκαστος όρος να ισούται με την ίδια σταθερά με διαφορά προσήμου:

$$\frac{1}{f_x(x)} \frac{\partial^2 f_x(x)}{\partial x^2} = -k^2,$$

$$\frac{1}{f_z(z)} \frac{\partial^2 f_z(z)}{\partial z^2} = k^2.$$

Οι ανωτέρω εξισώσεις είναι πλέον συνήθεις διαφορικές εξισώσεις και μπορούν να επιλυθούν ανεξάρτητα. Τρεις δυνατές περιπτώσεις προκύπτουν που εξαρτώνται από τη τιμή της σταθεράς k :

- 1) $k \in \mathbb{R}$, $k \neq 0$,
- 2) $k = 0$, και
- 3) k γνήσιος μιγαδικός.

Από αυτές τις τρεις περιπτώσεις, η μόνη που ικανοποιεί τη συνθήκη περιοδικότητας στο χώρο (σχέση (4.1.2.6a) αντιστοιχεί σε $k \in \mathbb{R}$, $k \neq 0$. Σε αυτή την περίπτωση οι λύσεις των κανονικών διαφορικών εξισώσεων είναι:

$$f_x(x) = A \cos kx + B \sin kx,$$

$$f_z(z) = C e^{kz} + D e^{-kz},$$

όπου A , B , C , D είναι άγνωστες σταθερές του προβλήματος. Αντικαθιστώντας τις ανωτέρω εκφράσεις στην σχέση (4.1.3.1) προκύπτει ως λύση για την εξίσωση Laplace το δυναμικό ταχύτητας:

$$\Phi(x, z, t) = A \cos kx + B \sin kx \quad C e^{kz} + D e^{-kz} \sin \omega t . \quad (4.1.3.3)$$

Η λύση αυτή ικανοποιεί την συνθήκη περιοδικότητας στο χώρο $\Phi(x+L, z, t) = \Phi(x, z, t)$ μόνον αν

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (4.1.3.4)$$

,όπου η σταθερά k ονομάζεται **κυματικός αριθμός**.

4.1.4. Στάσιμοι κυματισμοί

Χρησιμοποιώντας την αρχή της γραμμικής υπέρθεσης μπορούμε να αναλύσουμε τη λύση για το Φ σε δύο μέρη, καθένα από τα οποία αποτελεί λύση της εξίσωσης Laplace. Ας κρατήσουμε αρχικά ως λύση τον πρώτο όρο της σχέσης (4.1.3.3):

$$\Phi = A \cos kx \quad C e^{kz} + D e^{-kz} \sin \omega t . \quad (4.1.4.1)$$

Με βάση αυτή τη λύση, η Κινηματική Συνθήκη Πυθμένα (σχέση (4. 1.2.3)) προκύπτει:

$$-Ak \cos kx \quad C e^{-kd} - D e^{kd} \sin \omega t = 0 .$$

Η εξίσωση αυτή ικανοποιείται αν και μόνον αν οι όροι μέσα στην παρένθεση ισούνται με μηδέν, $C = D e^{2kd}$, οπότε η (4.4.1.1) γίνεται :

$$\Phi = G \cos kx \cosh k \quad d + z \sin \omega t , \quad (4.1.4.2)$$

όπου $G = 2AD e^{kd}$ μία νέα σταθερά.

Η Δυναμική Συνθήκη Ελεύθερης Επιφάνειας εφαρμόζεται πάνω στην ανύψωση $z = \eta(x, t)$ της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας. Δεδομένου ότι ασχολούμαστε με κυματισμούς μικρού πλάτους (οπότε και η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας $\eta(x, t)$ είναι μικρή) καταφεύγουμε στο ανάπτυγμα Taylor της σχέσης (σχέση (4.3.6)) στο $z = 0$. Συνεπώς η Δυναμική Συνθήκη Ελεύθερης Επιφάνειας:

$$\left[-\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} (u^2 + w^2) + gz \right]_{z=\eta} = \left[-\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} (u^2 + w^2) + gz \right]_{z=0} + \eta \left[-\frac{\partial^2 \Phi}{\partial z \partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial z} (u^2 + w^2) + g \right]_{z=0} + \dots = C t .$$

Εφόσον η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας είναι μικρή θα είναι μικρές και οι ταχύτητες u, w . Άρα, εφόσον οι δευτεροτάξιοι και άνω όροι καθώς και τα γινόμενα πρωτοτάξιοι και άνω όρων μπορούν να παραλειφθούν, η ανωτέρω εξίσωση απλουστεύεται στην:

$$\left[-\frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\eta \right]_{z=0} = C(t). \quad (4.1.4.3)$$

Αντικαθιστώντας το δυναμικό ταχύτητας από τη σχέση (4.1.4.2) και λύνοντας ως προς η παίρνουμε:

$$\eta = \frac{G\omega \cosh kd}{g} \cos kx \cos \omega t + \frac{C(t)}{g}.$$

Δεδομένου ότι η μέση χωρική και χρονική τιμή του η πρέπει να είναι μηδέν απαιτείται $C(t)=0$. Περαιτέρω, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο όρος $G\omega \cosh(kd)/g$ είναι σταθερή ποσότητα (δεν εξαρτάται από τις χωρικές μεταβλητές x, z και τη χρονική μεταβλητή t), η ανωτέρω σχέση γράφεται απλούστερα ως εξής:

$$\eta_{x,t} = \frac{H}{2} \cos kx \cos \omega t. \quad (4.1.4.4)$$

όπου οι σταθερές H και G συνδέονται με τη σχέση

$$G = \frac{Hg}{2\omega \cosh kd}.$$

Η ποσότητα H παριστάνει την κατακόρυφη απόσταση μεταξύ μιας κορυφής και της επόμενης κοιλάδας και ονομάζεται **ύψος κύματος**. Το μισό του ύψους κύματος θα ονομάζεται **πλάτος κύματος** και θα συμβολίζεται ως a ($a = H/2$).

Το δυναμικό ταχύτητας $\Phi_{x,z,t}$, σχέση (4.1.4.2) γράφεται τώρα:

$$\Phi_{x,z,t} = -\frac{Hg \cosh k(z+d)}{2\omega \cosh kd} \cos kx \sin \omega t. \quad (4.1.4.5)$$

Οι κυματισμοί οι οποίοι ικανοποιούν τις σχέσεις (4.1.4.4) και (4.1.4.5) ονομάζονται **στάσιμοι κυματισμοί**, επειδή δεν διαδίδονται σε καμία κατεύθυνση.

4.1.5. Προοδευτικοί κυματισμοί

Ας θεωρήσουμε τώρα τον δεύτερο όρο της εξίσωσης (4.1.2.5):

$$\Phi(x, z, t) = B \sin kx \left(C e^{kz} + D e^{-kz} \right) \sin \omega t \quad (4.1.5.1)$$

Ακολουθώντας αντίστοιχη διαδικασία, οι λύσεις για το δυναμικό ταχύτητας και την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας είναι:

$$\eta = -\frac{H}{2} \sin kx \sin \omega t. \quad (4.1.5.2)$$

$$\Phi_{x,z,t} = -\frac{Hg \cosh k(z+d)}{2\omega \cosh kd} \sin kx \cos \omega t, \quad (4.1.5.3)$$

Η μοναδική διαφορά αυτών των λύσεων αυτών από τις λύσεις (4.1.4.4) και (4.1.4.5) είναι η μετατόπιση της φάσης κατά 90° . Δεδομένου η εξίσωση Laplace είναι γραμμική και ότι ισχύει η αρχή της υπέρθεσης, τότε και κάθε γραμμικός συνδυασμός λύσεων της εξίσωσης Laplace αποτελεί και αυτός λύση της. Αφαιρώντας κατά μέλη τις σχέσεις (4.1.4.5) και (4.1.5.3) προκύπτει:

$$\Phi_{x,z,t} = -\frac{Hg \cosh k(z+d)}{2\omega \cosh kd} \sin(kx - \omega t) \quad (4.1.5.4)$$

Και εισάγοντας την, στην εξίσωση (4.1.4.3) (όπου $C(t)=0$) παίρνουμε την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας:

$$\eta_{x,t} = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (4.1.5.5)$$

Η εξίσωση αυτή περιγράφει κυματισμούς που κινούνται με το χρόνο και ονομάζονται **προοδευτικοί κυματισμοί**.

4.1.6. Σχέση Διασποράς

Η Κινηματική Συνθήκη στην Ελεύθερη Επιφάνεια Κ.Σ.Ε. (σχέση (4.1.2.4)) αναπτύσσεται κατά Taylor για να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ του ω και k .

$$\left(w - \frac{\partial \eta}{\partial t} - u \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)_{z=\eta} = \left(w - \frac{\partial \eta}{\partial t} - u \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)_{z=0} + \eta \frac{\partial}{\partial z} \left(w - \frac{\partial \eta}{\partial t} - u \frac{\partial \eta}{\partial x} \right)_{z=0} + \dots = 0.$$

Γραμμικοποιώντας την ανωτέρω εξίσωση και αντικαθιστώντας τις συναρτήσεις του δυναμικού Φ και της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας η από τις σχέσεις (4.1.5.4) και (4.1.5.5) προκύπτει:

$$\omega^2 = gk \tanh kd \quad (4.1.6.1)$$

Η εξίσωση αυτή ονομάζεται **σχέση διασποράς**. Η σχέση αυτή δείχνει ότι υπάρχει μια μοναδική εξάρτηση μεταξύ των ποσοτήτων ω , k και d (ισοδύναμα T , L και d).

Με τη βοήθεια της σχέσης διασποράς η έκφραση του δυναμικού (4.1.5.4) για τους προοδευτικούς κυματισμούς γράφεται:

$$\Phi = -\frac{H}{2} C \frac{\cosh k(d+z)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t), \quad (4.1.6.2)$$

όπου $C = \omega/k$. Η ποσότητα $C = \omega/k$ ονομάζεται **ταχύτητα διάδοσης** και παριστά την ταχύτητα με την οποία ο κυματισμός διαδίδεται στο χώρο. Συχνά η ταχύτητα διάδοσης ονομάζεται **ταχύτητα φάσης** ή **φασική ταχύτητα**.

Συμπερασματικά, ένας κυματισμός πολλών συχνοτήτων διαχωρίζεται κατά τη διάδοση του ανάλογα με τη ταχύτητα της κάθε αρμονικής του με συγκεκριμένο τρόπο, ο οποίος καθορίζεται από τη σχέση διασποράς.

4.1.7. Κινηματικά χαρακτηριστικά των κυματισμών μικρού πλάτους

4.1.7.1. Πεδίο τοπικών ταχυτήτων και επιταχύνσεων

Σε έναν προοδευτικό κυματισμό με ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας

$$\eta_{x,t} = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t)$$

και αντίστοιχο δυναμικό ταχύτητας

$$\Phi_{x,z,t} = -\frac{Hg \cosh k(z+d)}{2\omega \cosh kd} \sin(kx - \omega t)$$

παραγωγίζοντας ως προς x , η οριζόντια ταχύτητα u των σωματιδίων του ρευστού, όπου $C = \omega/k$, προκύπτει:

$$u_{x,z,t} = -\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \begin{cases} \frac{H}{2} Ck \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) \\ \frac{gHk}{2\omega} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \cos(kx - \omega t) \end{cases} \quad (4.1.7.1)$$

Παρόμοια, η κάθετη ταχύτητα w των σωματιδίων του ρευστού, όπου $C = \omega/k$, προκύπτει:

$$w_{x,z,t} = -\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \begin{cases} \frac{H}{2} Ck \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \\ \frac{gHk}{2\omega} \frac{\sinh k(z+d)}{\cosh kd} \sin(kx - \omega t) \end{cases} \quad (4.1.7.2)$$

Στην συνέχεια, θα υπολογιστεί η οριζόντια συνιστώσα της τοπικής επιτάχυνσης, α_x που δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha_x_{x,z,t} = \frac{\partial u}{\partial t}$$

Αντικαθιστώντας την έκφραση για την u από τη σχέση (4.1.7.1) στην ανωτέρω σχέση προκύπτει:

$$\alpha_x_{x,z,t} = \frac{\partial u}{\partial t} = \begin{cases} \frac{H}{2} \omega^2 \frac{\cosh k(z+d)}{\sinh kd} \sin(kx - \omega t) \\ \frac{gHk}{2} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \sin(kx - \omega t) \end{cases} \quad (4.1.7.3)$$

Παρόμοια, η κατακόρυφη συνιστώσα της επιτάχυνσης a_z δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha_z \quad x, z, t = \frac{\partial w}{\partial t} = \begin{cases} -\frac{H}{2} \omega^2 \frac{\sinh k(z+d)}{\sinh kd} \cos(kx - \omega t) \\ -\frac{gHk}{2} \frac{\sinh k(z+d)}{\cosh kd} \cos(kx - \omega t) \end{cases} \quad (4.1.7.4)$$

4.1.7.2. Σωματιδιακές τροχιές

Η σωματιδιακή θέση $(x(t), z(t))$, δηλαδή η θέση ενός σωματιδίου του νερού σε διαφορετικές χρονικές στιγμές καθορίζεται από τις λύσεις των εξισώσεων:

$$\frac{dx}{dt} = u(x, z, t) \quad (4.1.7.5)$$

$$\frac{dz}{dt} = w(x, z, t), \quad (4.1.7.6)$$

ως προς x και z , όπου οι u και w εξαρτώνται από τα x και z αντίστοιχα. Επομένως, οι ανωτέρω εξισώσεις μπορούν να λυθούν όταν γνωρίζουμε πληροφορίες σχετικά με τη κίνηση των σωματιδίων του νερού και γι' αυτό πραγματοποιείται με τη θεώρηση του πεδίου ροής κατά Lagrange.

Έστω ότι ένα συγκεκριμένο σωματίδιο βρίσκεται τη χρονική στιγμή t_0 στη θέση x_0, z_0 , και ότι μετά από χρονικό διάστημα t μετακινήθηκε σε μια νέα θέση $x = x_0 + \Delta x$ και $z = z_0 + \Delta z$. Εισάγοντας τις, στις σχέσεις (4.1.7.1. και 4.1.7.2) και χρησιμοποιώντας στη συνέχεια τα γνωστά αναπτύγματα Taylor για τις συναρτήσεις $\left. \begin{matrix} \cosh \\ \sinh \end{matrix} \right\} \left[k(z_0 + \Delta z + d) \right]$ και

$\left. \begin{matrix} \sin \\ \cos \end{matrix} \right\} \left[k(x_0 + \Delta x - \omega t) \right]$ και αμελώντας τέλος τους μη-γραμμικούς όρους παίρνουμε:

$$u = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(z_0 + d)}{\sinh kd} \cos(kx_0 - \omega t) \quad (4.1.7.7)$$

$$w = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh k(z_0 + d)}{\sinh kd} \sin(kx_0 - \omega t). \quad (4.1.7.8)$$

Οι ανωτέρω σχέσεις δείχνουν ότι, για κυματισμούς μικρού πλάτους, οι συνιστώσες u και w της ταχύτητας ενός συγκεκριμένου σωματιδίου με μέση θέση x_0, z_0 , εξαρτώνται μόνο από τον χρόνο και εισάγονται στις σχέσεις (4.1.7.5) και (4.1.7.6) και ολοκληρώνοντας ως προς t προκύπτει:

$$x = -\frac{H}{2} \frac{\cosh k(z_0 + d)}{\sinh kd} \sin(kx_0 - \omega t), \quad (4.1.7.9)$$

$$z = \frac{H}{2} \frac{\sinh k(z_0 + d)}{\sinh kd} \cos(kx_0 - \omega t). \quad (4.1.7.10)$$

Οι ανωτέρω σχέσεις εκφράζουν τη στιγμιαία σωματιδιακή θέση x, z ως συνάρτηση μιας επιλεγμένης αρχικής (μέσης) θέσης x_0, z_0 και του χρόνου t και σε απλούστερη μορφή γράφονται:

$$x = -A \sin kx_0 - \omega t ,$$

$$z = B \cos kx_0 - \omega t ,$$

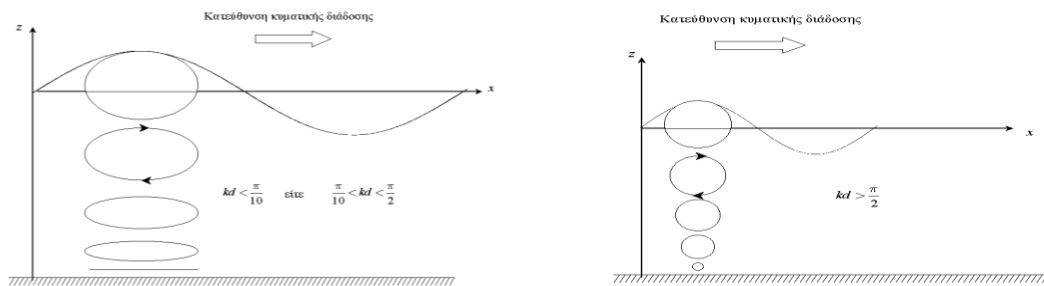
όπου

$$A = \frac{H}{2} \frac{\cosh k(z_0 + d)}{\sinh kd} \quad \text{και} \quad B = \frac{H}{2} \frac{\sinh k(z_0 + d)}{\sinh kd} .$$

Υψώνοντας στο τετράγωνο και προσθέτοντάς τις κατά μέλη παίρνουμε:

$$\left(\frac{x}{A}\right)^2 + \left(\frac{z}{B}\right)^2 = 1 .$$

όπου είναι η εξίσωση μιας έλλειψης με κέντρο τη μέση σωματιδιακή θέση x_0, z_0 και με ημιάξονες τα A και B στη x και z διεύθυνση αντίστοιχα.



Σχήμα 4.5: Κατακόρυφες τροχιές των μορίων θαλασσινού νερού για κυματισμούς μικρού πλάτους

Στον πυθμένα οι ελλείψεις εκφυλίζονται σε ευθείες γραμμές και σε βαθύ νερό οι τροχιές των μορίων είναι κύκλοι που μειώνονται εκθετικά με το βάθος.

4.1.7.3. Πεδίο πιέσεων

Οι δυνάμεις (πίεσεις) που εφαρμόζονται στην επιφάνεια κατά τη διάδοση ενός προοδευτικού κυματισμού μικρού πλάτους εμφανίζονται στην εξίσωση Bernoulli :

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} u^2 + w^2 + \frac{P}{\rho} + gz = C t . \quad (4.1.7.11a)$$

Εξισώνοντας την εξίσωση για ένα βάθος z και για την ελεύθερη επιφάνεια η (όπου $P_\eta = 0$), και αμελώντας τους μη γραμμικούς όρους προκύπτει:

$$\left(\frac{P}{\rho} + gz - \frac{\partial \Phi}{\partial t}\right)_z = g\eta - \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{\eta=0} , \quad (4.1.7.11b)$$

Λαμβάνοντας τώρα υπόψη τη Δυναμική Συνθήκη Ελεύθερης Επιφάνειας (σχέση (4.1.2.5) για $C \ t = 0$) το δεξί μέλος της (4.1.7.11b) ισούται με μηδέν και συνεπώς προκύπτει :

$$\frac{P}{\rho} = -gz + \frac{\partial \Phi}{\partial t}. \quad (4.1.7.11c)$$

Αντικαθιστώντας το δυναμικό Φ ενός απλού προοδευτικού κυματισμού γίνεται:

$$P = -\rho gz + \rho g \frac{H \cosh k \ d + z}{2 \cosh kd} \cos \ kx - \omega t \quad (4.1.7.12a)$$

ή ισοδύναμα

$$P = -\rho gz + \rho g \eta K_p \ z, \quad (4.1.7.12b)$$

όπου

$$K_p = \frac{\cosh k \ d + z}{\cosh kd}. \quad (4.1.7.13)$$

Ο πρώτος όρος στο δεξί μέλος της εξίσωσης (4.1.7.12b) είναι η υδροστατική πίεση, που είναι ανεξάρτητη από την ύπαρξη του κυματισμού. Ο δεύτερος όρος, ονομάζεται δυναμική πίεση (τον συμβολίζουμε P_D) και οφείλεται στην διακύμανση της ελεύθερης επιφάνειας και ο όρος K_p ονομάζεται συντελεστής απόκρισης πίεσης. Ο συντελεστής απόκρισης πίεσης κάτω από τη μέση επιφάνεια ($z < 0$) είναι μικρότερος της μονάδας, παίρνει τη μέγιστη τιμή του (ίση με τη μονάδα) για $z = 0$ (ελεύθερη επιφάνεια) και την ελάχιστη (ίση με $1/\cosh kd$) για $z = -d$ (πυθμένας).

4.1.8. Μηχανική ενέργεια απλών αρμονικών κυματισμών

Η συνολική ενέργεια που περιλαμβάνεται σε ένα κύμα είναι δύο ειδών: η δυναμική οφείλεται στην ανύψωση της επιφάνειας της θάλασσας $\eta \ x, t$ από τη μέση ελεύθερη επιφάνεια (E_Δ) και η κινητική ενέργεια (E_K) που οφείλεται στην κίνηση των σωματιδίων του νερού πάνω στις σωματιδιακές τροχιές τους.

4.1.8.1 Δυναμική ενέργεια αρμονικών κυματισμών

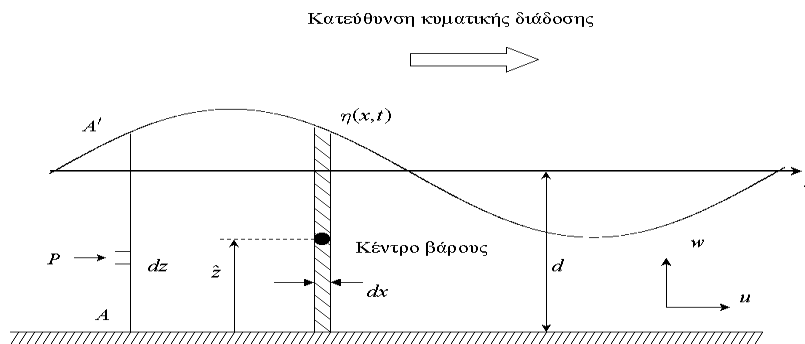
Από την υπόθεση ότι το θαλασσινό νερό είναι ασυμπίεστο και οι επιφανειακές τάσεις μπορούν να αμεληθούν, η δυναμική ενέργεια των κυματισμών μικρού πλάτους οφείλεται αποκλειστικά στην απομάκρυνση των σωματιδίων του νερού από τη θέση ισορροπίας τους, δηλαδή στην παρουσία των βαρυτικών δυνάμεων. Για τον υπολογισμό της δυναμικής ενέργειας, θεωρούμε έναν απλό αρμονικό κυματισμό. Για πρακτικούς λόγους θα υπολογίσουμε τη μέση δυναμική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας και, ειδικότερα, τη διαφορά μεταξύ της δυναμικής ενέργειας εξαιτίας της ανύψωσης της μέσης ελεύθερης

επιφάνειας της θάλασσας (που δηλώνει ύπαρξη κυματισμού) και της δυναμικής ενέργειας στη μέση ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας (που δηλώνει απουσία κυματισμού).

Ας θεωρήσουμε μια στοιχειώδη στήλη νερού με διαστάσεις dx , $d + \eta$ x, t , μάζα dm , κέντρο βάρους στο σημείο K και απόσταση \hat{z} από τον πυθμένα. Η δυναμική ενέργεια της στήλης σε αναφορά με το επίπεδο του πυθμένα είναι :

$$dE_{\Delta} = dm g \hat{z} , \quad (4.1.8.1.)$$

όπου το \hat{z} προσεγγίζεται από τη σχέση: $\hat{z} \cong \frac{d + \eta}{2}$ και η στοιχειώδης μάζα dm ανά μονάδα πλάτους είναι: $dm = \rho d + \eta dx$.



Σχήμα 4.6: Υπολογισμός δυναμικής ενέργειας απλού αρμονικού κυματισμού

Για να υπολογίσουμε τη μέση δυναμική ενέργεια σε έναν πλήρη κυματισμό μήκους L και ύψους H ολοκληρώνουμε την έκφραση (4.1.8.1) με όρια ολοκλήρωσης από x έως $x + L$ οπότε παίρνουμε:

$$\begin{aligned} \overline{E_{\Delta}} &= \frac{1}{L} \int_x^{x+L} dE_{\Delta} = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \rho g \frac{d + \eta}{2} dx = \frac{\rho g}{L} \int_x^{x+L} \frac{1}{2} d^2 + 2\eta d + \eta^2 dx = \\ &= \frac{\rho g}{L} \left(\frac{1}{2} d^2 L + d \int_x^{x+L} \eta dx + \frac{1}{2} \int_x^{x+L} \eta^2 dx \right). \end{aligned} \quad (4.1.8.2a)$$

Αντικαθιστώντας όπου $\eta = \frac{H}{2} \cos kx - \omega t$ και εκτελώντας τις ολοκληρώσεις παίρνουμε:

$$\overline{E_{\Delta}} = \rho g \frac{d^2}{2} + \rho g \frac{H^2}{16}. \quad (4.1.8.2b)$$

Στην παραπάνω σχέση ο πρώτος όρος του αθροίσματος στο δεξί μέλος παριστά τη δυναμική ενέργεια στη μέση ελεύθερη επιφάνεια (τη δυναμική ενέργεια απουσία κυματισμού). Κατά συνέπεια, η μέση “καθαρή” δυναμική ενέργεια λόγω της παρουσίας του κυματισμού είναι:

$$\overline{E_{\Delta k}} = \rho g \frac{H^2}{16}. \quad (4.1.8.3)$$

4.1.8.2. Κινητική ενέργεια αρμονικών κυματισμών

Η υπόθεση αστρόβιλης ροής ιδανικού ρευστού που υιοθετήσαμε εξ αρχής για τη μελέτη των κυματισμών μικρού πλάτους υποδηλώνει ότι η κινητική ενέργεια των αρμονικών κυματισμών οφείλεται μόνο στα κινούμενα μόρια του ρευστού, δηλαδή στην ταχύτητα \vec{V} . Κατά συνέπεια, η κινητική ενέργεια για ένα στοιχειώδες τμήμα ρευστού με μάζα dm θα δίνεται από τη σχέση:

$$dE_K = dm \frac{u^2 + w^2}{2} = \rho dx dz \frac{u^2 + w^2}{2}. \quad (4.1.8.4)$$

Για τον υπολογισμό της μέσης κινητικής ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας του κυματισμού, απαιτείται η ολοκλήρωση της dE_K ως προς το βάθος και η λήψη της μέσης τιμής ανά μήκος κύματος L , δηλαδή :

$$\overline{E_K} = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \int_{-d}^{\eta} \rho \frac{u^2 + w^2}{2} dz dx. \quad (4.1.8.5a)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις συνιστώσες της ταχύτητας u και w σε ένα προοδευτικό κυματισμό έχουμε:

$$\begin{aligned} \overline{E_K} = \frac{\rho}{2L} \left(\frac{gHk}{2\omega} \frac{1}{\cosh kd} \right)^2 \int_x^{x+L} \int_{-d}^{\eta} & \left[\cosh^2 k d + z \cos^2 kx - \omega t + \right. \\ & \left. + \sinh^2 k d + z \sin^2 kx - \omega t \right] dz dx. \quad (4.9.2.2b) \end{aligned}$$

Χρησιμοποιώντας τριγωνομετρικές ταυτότητες, η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$\overline{E_K} = \frac{\rho}{2L} \left(\frac{gHk}{2\omega} \frac{1}{\cosh kd} \right)^2 \int_x^{x+L} \int_{-d}^{\eta \approx 0} \frac{1}{2} \left[\cosh 2k d + z + \cos 2 kx - \omega t \right] dz dx,$$

απ' όπου υπολογίζοντας ξεχωριστά τα ολοκληρώματα για τους δύο αντίστοιχους όρους προκύπτει :

$$\overline{E_K} = \frac{1}{16} \rho g H^2. \quad (4.1.8.5b)$$

Η κινητική ενέργεια βρέθηκε ίση με τη δυναμική, που αποτελεί ένα γενικό αποτέλεσμα ενός μη συντηρητικού συστήματος (δηλαδή συστήματα που δεν έχουν απώλειες ενέργειας).

Η συνολική τώρα μηχανική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, \overline{E} , είναι το άθροισμα της δυναμικής και της κινητικής ενέργειας:

$$\overline{E} = \overline{E_K} + \overline{E_A} = \frac{1}{8} \rho g H^2, \quad (4.1.8.6)$$

ενώ η αντίστοιχη μέση ολική ενέργεια ανά κυματισμό και ανά μονάδα πλάτους είναι:

$$E_L = \frac{1}{8} \rho g H^2 L. \quad (4.1.8.7)$$

Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός ότι η μέση δυναμική ενέργεια και κινητική ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας δεν εξαρτώνται από καμία γεωμετρική παράμετρο του προβλήματος παρά μόνον από το ύψος κύματος H .

4.1.8.3. Ρυθμός μεταφοράς κυματικής κινητικής ενέργειας

Ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό της γραμμικής θεωρίας των κυματισμών μικρού πλάτους είναι ότι δεν έχουν μεταφορά μάζας από τους κυματισμούς αυτούς παρά μόνον μεταφορά ενέργειας. Για την περίπτωση της γραμμικής θεώρησης των κυματισμών, ο ρυθμός μεταφοράς (διάδοσης) της κυματικής ενέργειας ισοδυναμεί με τον ρυθμό με τον οποίο το ρευστό παράγει έργο στη μια πλευρά μιας κατακόρυφης τομής του ρευστού επί της άλλης πλευράς. Για τον υπολογισμό του ρυθμού αυτού λοιπόν, θεωρούμε μια κατακόρυφη τομή AA' στο πεδίο ροής. Ο στιγμιαίος ρυθμός με τον οποίο παράγεται έργο από τη δυναμική πίεση ($P_D = P + \rho g z$) ανά μονάδα πλάτους κατά τη κατεύθυνση διάδοσης των κυματισμών δίνεται από τη σχέση:

$$E = \int_{-d}^{\eta} P_D \cdot u dz. \quad (4.1.8.9)$$

Κατά συνέπεια, ο μέσος ρυθμός μεταφοράς της κυματικής ενέργειας θα δίδεται από τη σχέση:

$$E = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-d}^{\eta} P_D \cdot u dz dt = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-d}^{\eta} \left[\rho g \eta \frac{\cosh k d + z}{\cosh kd} \right] \left[\frac{g H k}{2\omega} \frac{\cosh k d + z}{\cosh kd} \cos kx - \omega t \right] dz dt, \quad (4.1.8.10)$$

όπου χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της δυναμικής πίεσης P_D και ταχύτητας u που δίνονται από τις σχέσεις (4.1.7.1) και (4.1.7.9a) και εισάγοντας σε αυτήν την εξίσωση διασποράς προκύπτει:

$$E = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-d}^{\eta} \left[\rho g \eta \frac{\cosh k d + z}{\cosh kd} \right] \left[\omega \eta \frac{\cosh k d + z}{\sinh kd} \right] dz dt. \quad (4.1.8.11)$$

Στην περίπτωση μας, η γραμμικοποίηση της ανωτέρω σχέσης γίνεται άμεσα, αν μεταβάλουμε το άνω όριο ολοκλήρωσης του εσωτερικού ολοκληρώματος από η σε 0 δηλαδή μέχρι τη μέση ελεύθερη επιφάνεια, οπότε:

$$E = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-d}^0 \rho g \omega \eta^2 \frac{\cosh^2 k d + z}{\cosh kd \sinh kd} dz dt = \frac{\rho g \omega}{4k} \left(\frac{H}{2} \right)^2 \frac{2kd + \sinh 2kd}{\sinh 2kd} = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2 \right) \frac{\omega}{k} \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \right] = ECn, \quad (4.1.8.12)$$

όπου $n = \frac{C_g}{C} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$, $C_g = nC$, όπου Cn είναι η ταχύτητα μεταφοράς της ενέργειας και ονομάζεται **ταχύτητα ομάδας** και E η συνολική κυματική ενέργεια.

Συνεπώς, σε βαθύ νερό η ενέργεια μεταδίδεται στο ήμισυ της ταχύτητας του μετώπου του κυματισμού, ενώ σε ρηχό νερό το μέτωπο του κυματισμού και η ενέργεια μεταδίδονται με την ίδια ταχύτητα.

4.1.9. Η αρχή της γραμμικής υπέρθεσης. Κυματικές ομάδες και ταχύτητα ομάδας

Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της κυματικής εξίσωσης Laplace (συνεπώς της γραμμικής θεωρίας των κυματισμών μικρού πλάτους) συνίσταται στο ότι κάθε γραμμικός συνδυασμός λύσεων της αποτελεί επίσης λύση της εξίσωσης. Ειδικότερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι γραμμικοί συνδυασμοί λύσεων της κυματικής εξίσωσης Laplace οι οποίοι i) έχουν μικρό πλάτος και ii) προσομοιάζουν με κυματομορφές που παρατηρούνται στη φύση. Μια τέτοια σημαντική κυματομορφή ειδικής μορφής, η οποία προσομοιάζει την ιδιότητα που έχουν τα μεγάλα κύματα να εμφανίζονται μαζί, αποτελεί η **κυματική ομάδα**. Το ειδικό χαρακτηριστικό των δύο αρμονικών συνιστωσών της κυματικής ομάδας συνίσταται στο ότι οι συνιστώσες έχουν την ίδια κατεύθυνση διάδοσης, το ίδιο ύψος κύματος και ελάχιστα διαφορετικές περιόδους (και κατά συνέπεια ελάχιστα διαφορετικά μήκη κύματος).

Έστω, λοιπόν δύο απλοί αρμονικοί κυματισμοί με το ίδιο ύψος H , συχνότητες $\omega_1 > \omega_2$ και κυματικούς αριθμούς $k_1 > k_2$, οι οποίοι διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους. Για πρακτικούς λόγους εισάγουμε τις στοιχειώδεις διαφορές, $\Delta\omega$ και Δk μέσω των σχέσεων:

$$\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2, \quad \Delta k = k_1 - k_2, \quad (4.1.9.1a,b)$$

απ' όπου, λόγω της αρχικής υπόθεσης, οι ποσότητες $\Delta\omega$ και Δk είναι μικρές.

Έστω οι ανυψώσεις της ελεύθερης επιφάνειας της θάλασσας:

$$\eta_1 = \frac{H}{2} \cos k_1 x - \omega_1 t, \quad (4.1.9.2a)$$

$$\eta_2 = \frac{H}{2} \cos k_2 x - \omega_2 t, \quad (4.1.9.2b)$$

και προσθέτοντας τις κατά μέλη προκύπτει η υπέρθεση των απλών αρμονικών:

$$\eta = \eta_1 + \eta_2 = \frac{H}{2} \left[\cos k_1 x - \omega_1 t + \cos k_2 x - \omega_2 t \right]. \quad (4.1.9.3a)$$

Οι δύο αρμονικές έχουν διαφορετικές φάσεις, που σημαίνει ότι, άλλοτε η συνισταμένη η ενισχύεται (όταν οι φάσεις αυτές βρίσκονται κοντά η μία στην άλλη) και άλλοτε μειώνεται (όταν οι φάσεις απέχουν αρκετά μεταξύ τους). Επιπλέον, οι η_1 και η_2 έχουν διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης C_1 και C_2 οπότε το χωρικό σημείο και η χρονική στιγμή εμφάνισης των μεγίστων και ελαχίστων της συνισταμένης η μεταβάλλονται.

Αναλύοντας το άθροισμα των συνημιτόνων στη σχέση (4.1.9.3a) παίρνουμε:

$$\eta = H \cos \left[\frac{k_1 + k_2}{2} x - \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t \right] \cos \left[\frac{k_1 - k_2}{2} x - \frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t \right] . \quad (4.1.9.3b)$$

Λόγω της αρχικής υπόθεσης, οι λόγοι $\frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1 + \omega_2}$ και $\frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2}$ είναι επίσης μικρές ποσότητες.

Ο πρώτος όρος παριστά έναν απλό αρμονικό κυματισμό στην μορφή:

$$H \cos k_m x - \omega_m t, \text{ όπου} \quad \omega_m = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad \text{και} \quad k_m = \frac{k_1 + k_2}{2}, \quad (4.1.9.4a,b)$$

Ο κυματισμός αυτός έχει περίοδο

$$T_m = \frac{2\pi}{\omega_m} = \frac{2T_1 T_2}{T_1 + T_2}, \quad (4.1.9.5a)$$

μήκος κύματος

$$L_m = \frac{2\pi}{k_m} = \frac{2L_1 L_2}{L_1 + L_2}, \quad (4.1.9.5b)$$

και φασική ταχύτητα (ταχύτητα διάδοσης)

$$C_m = \frac{\omega_1 + \omega_2}{k_1 + k_2}. \quad (4.1.9.5c)$$

Ο δεύτερος συνημιτονοειδής όρος της σχέσης (4.1.9.3b) αναπαριστά επίσης έναν αρμονικό κυματισμό της μορφής:

$$\eta_g = \cos k_g x - \omega_g t, \quad (4.1.9.6)$$

όπου $k_g = \Delta k / 2$ και $\omega_g = \Delta \omega / 2$ είναι ο κυματικός αριθμός k_g και η γωνιακή συχνότητα ω_g του κυματισμού.

Συνεπώς, η αργά μεταβαλλόμενη διακύμανση η_g “υπερεπιβάλλεται” στη γρήγορη και τη διαμορφώνει διαφοροποιώντας το πλάτος της, σύμφωνα με τη στιγμιαία απομάκρυνση της ίδιας (της η_g) από το επίπεδο ηρεμίας. Η αργά μεταβαλλόμενη διακύμανση, επειδή φαίνεται να “περιβάλλει” την γρήγορη, ονομάζεται **περιβάλλουσα** ανύψωσης και είναι ένας απλός αρμονικός κυματισμός με ταχύτητα διάδοσης

$$C_g = \frac{\omega_g}{k_g} = \frac{\Delta \omega / 2}{\Delta k / 2} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{k_1 - k_2}, \quad (4.1.9.7a)$$

περίοδο

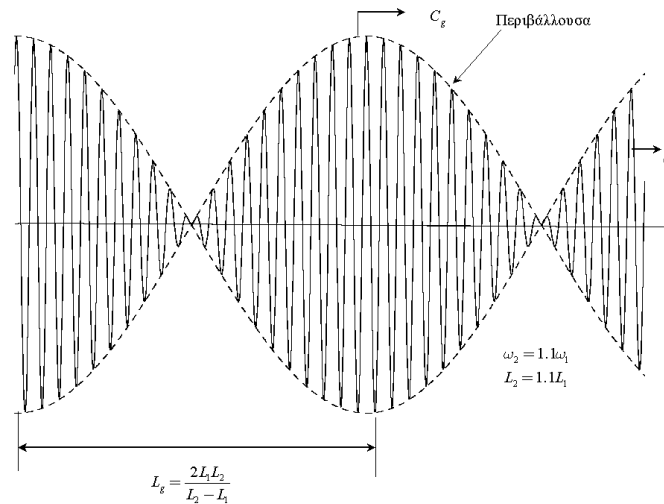
$$T_g = \frac{2\pi}{\omega_g} = \frac{2T_1 T_2}{T_2 - T_1}, \quad (4.1.9.7b)$$

και μήκος κύματος

$$L_g = \frac{2\pi}{k_g} = \frac{2L_1 L_2}{L_2 - L_1}. \quad (4.1.9.7c)$$

Το μέγεθος C_g ονομάζεται **ταχύτητα ομάδας** και αποτελεί τη φασική ταχύτητα της περιβάλλουσας. Για ω_1 πολύ κοντά στο ω_2 (όπως ήταν η αρχική υπόθεση), η σχέση (4.1.9.7a) για την ταχύτητα ομάδας γράφεται:

$$C_g = \lim_{\substack{\omega_1 \rightarrow \omega_2 \\ k_1 \rightarrow k_2}} \frac{\Delta\omega}{\Delta k} = \frac{d\omega}{dk}. \quad (4.1.9.8)$$



Σχήμα 4.7: Χαρακτηριστικά κυματικής ομάδας

Διαφορίζοντας και αντικαθιστώντας την εξίσωση διασποράς στην τελευταία σχέση βρίσκουμε

$$C_g = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right] C, \quad (4.1.9.9)$$

όπου $C = \omega/k$.

Θεωρώντας σταθερό το βάθος πυθμένα $d = const$, για βαθύ νερό, ο όρος της σχέσης (4.1.9.9) που βρίσκεται στις αγκύλες γίνεται

$$1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \rightarrow 1$$

και αντίστοιχα για ρηχό

$$1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \rightarrow 2,$$

οπότε, κατ' αντιστοιχία, η σχέση (4.1.9.9) για βαθύ και ρηχό νερό απλοποιείται ως ακολούθως:

$$C_g = \frac{C}{2} \quad \text{και} \quad C_g = C. \quad (4.1.9.10a,b)$$

Δηλαδή, σε βαθύ νερό η ταχύτητα ομάδας είναι η μισή της φασικής ταχύτητας, ενώ σε ρηχό νερό η ταχύτητα ομάδας είναι ίση με τη φασική ταχύτητα.

Κατ' αρχήν είναι σαφές ότι οι αρμονικοί κυματισμοί διαδίδονται ταχύτερα από ότι διαδίδεται η ίδια η κυματική ομάδα. Με βάση αυτή τη γενική ιδιότητα, σε αντίστοιχα κυματικά συστήματα στη φύση, οι απλοί αρμονικοί κυματισμοί θα ξεκινούν από το πίσω μέρος της ομάδας, θα διαδίδονται μέσα από αυτήν και θα φθάνουν στο μπροστινό τμήμα της, όπου και θα "εξαφανίζονται". Η κυματική ομάδα θα παραμένει σχηματικά αμετάβλητη σε κάθε περίπτωση και θα συνεχίζει να διαδίδεται με ταχύτητα C_g . Επιπλέον, όπως προαναφέρθηκε, η κυματική ενέργεια η οποία μεταφέρεται από την ομάδα διαδίδεται στο χώρο με την ταχύτητα της ομάδας C_g και όχι με τη φασική ταχύτητα C . Μία άλλη σημαντική παρατήρηση αναφέρεται στη φασική ταχύτητα C , η οποία, για σταθερή περίοδο T μειώνεται μονοτονικά με το βάθος πυθμένα πράγμα που δε συμβαίνει με τη ταχύτητα ομάδας C_g (παρουσιάζει μέγιστο για $d/L \approx 0.19$).

4.2. Εκτίμηση κυματικού δυναμικού σε ρεαλιστικές καταστάσεις θάλασσας

Στο προηγούμενο εδάφιο, παρουσιάστηκε η απλούστερη μαθηματική προσέγγιση για την μελέτη των δισδιάστατων επιφανειακών κυματισμών βαρύτητας, η «γραμμική θεωρία κυματισμών Airy» που βασίζεται στην παραδοχή ότι το πλάτος του κυματισμού θεωρείται μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος και το βάθος του πυθμένα. Τα κύματα που παρατηρούνται στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας προκύπτουν σαν γραμμική υπέρθεση πολλών ανεξάρτητων ημιτονοειδών κυματισμών με διαφορετικές συχνότητες. Στην πραγματικότητα όμως, τα κύματα δεν είναι στην μορφή των απλών αρμονικών κυματισμών και στην προσπάθειά για μία πιο ρεαλιστική περιγραφή της κατάστασης της θάλασσας, εισάγουμε την έννοια του μοντέλου τυχαίας φάσης. Η αναπαράσταση του τυχαίου πεδίου των ανεμογενών θαλάσσιων κυματισμών έγινε από το Neumann το 1953, ενώ στην συνέχεια οι Pierson and Moskowitz (1964) προσπάθησαν σε μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση της ανύψωσης της επιφάνειας της θάλασσας (Liu, 1983). Σε αντίθεση με την γραμμική θεωρία, ένα κύμα σε ρεαλιστική κατάσταση θάλασσας, μπορεί να περιγραφεί από την φασματική πυκνότητα, η οποία καθορίζει πως κατανέμεται η ενέργεια σε διαφορετικές συχνότητες και κατευθύνσεις (Cruz, 2008).

Τα ανεμογενή κύματα διαδίδονται γενικά με την κατεύθυνση του τοπικού ανέμου και εξαρτώνται άμεσα από την ταχύτητά του. Σε αντίθεση με την γραμμική θεωρία, ένα κύμα σε ρεαλιστική κατάσταση θάλασσας, αποτελείται από πολλά κύματα διαφορετικών συχνοτήτων, μηκών και κατευθύνσεων διάδοσης (Wen, 2011). Σε ένα δεδομένο σημείο της θάλασσας παρατηρούνται κυματικές συνθήκες σε διάστημα μερικών ωρών (καταστάσεις θάλασσας) οι οποίες περιγράφονται συνοπτικά από την κατανομή της ενεργειακής πυκνότητας $S(f, \theta)$ (directional spectrum). Στην πράξη χρησιμοποιούνται συνήθως ορισμένα μόνον φασματικά χαρακτηριστικά, όπως είναι το σημαντικό ύψος κύματος, η μέση ενεργειακή περίοδος ή η περίοδος κορυφής φάσματος και η μέση κατεύθυνση. Σε πραγματικές καταστάσεις θάλασσας και σε βαθιά νερά η κυματική ενέργεια για μία δεδομένη κατάσταση θάλασσας δίνεται από την σχέση που ακολουθεί:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_{m_0}^2 T_p \approx \left(0.5 \frac{kW}{m^3 s} \right) H_{m_0}^2 T_p, \quad (4.2.1)$$

(Pontes et al., 2007). Σε kW/m μετώπου κύματος. Στην σχέση (4.2.1) $H_{m_0} = H_s$ είναι το σημαντικό ύψος κύματος (m) και $T_p = 2\pi/\omega_p$, η φασματική περίοδος κορυφής (s), όπου ω_p είναι η φασματική συχνότητα κορυφής. Μία άλλη σχέση που χρησιμοποιείται στην βιβλιογραφία για τον υπολογισμό της κυματικής ενέργειας σε μια κατάσταση θάλασσας είναι:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_{m_0}^2 T_e \approx \left(0.5 \frac{kW}{m^3 s} \right) H_{m_0}^2 T_e, \quad (4.2.2)$$

,όπου τώρα T_e καλείται η ενεργειακή περίοδος (Mollison et al., 1992; Pontes et al., 2007; Waters, 2009). Το σημαντικό ύψος κύματος δίνεται από την σχέση:

$$H_{m_0} = H_s = 4\sqrt{m_0}, \quad (4.2.3)$$

όπου m_n εκφράζει την νιοστή στιγμή της φασματικής συχνότητας και ορίζεται ως εξής:

$$m_n = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} f^n S(f, \theta) df d\theta \quad (4.2.4)$$

Η περίοδος ενέργειας δίνεται από την εξής σχέση:

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0}, \quad (4.2.5)$$

Τελικά, για τον υπολογισμό του μέσου κυματικού δυναμικό P για όλες τις διαθέσιμες μετρήσεις, χρησιμοποιούμε την ακόλουθη σχέση:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N}, \quad (4.2.6)$$

όπου N είναι ο συνολικός αριθμός των καταστάσεων θάλασσας για το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα.

5. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ & ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

Τα κυματικά δεδομένα για τον ελληνικό θαλάσσιο χώρο προέρχονται από δύο πηγές: α) Επιτόπιες μετρήσεις (real time measurements) του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ και β) Μεταγενέστερες εκτιμήσεις (δεδομένα hindcast) από κυματικό μοντέλο WAM.

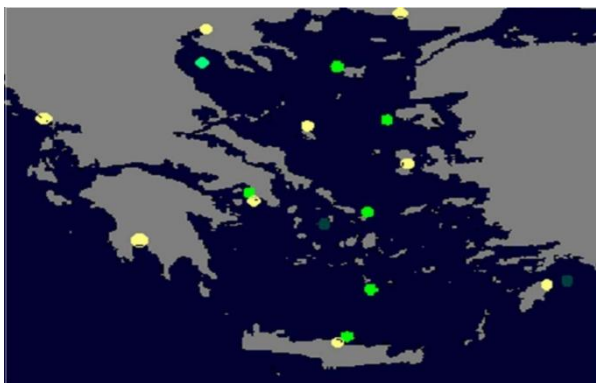
5.1. Κυματικά δεδομένα

Το Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας του ΕΛΚΕΘΕ υλοποιεί το σύστημα παρακολούθησης και πρόγνωσης θαλασσών ΠΟΣΕΙΔΩΝ. Πρόκειται για ένα σύστημα παρακολούθησης, πρόγνωσης και παροχής πληροφοριών που αφορούν τις ελληνικές θάλασσες. Το μοναδικό επιχειρησιακό πρόγραμμα στην Ελλάδα πριν το σύστημα ΠΟΣΕΙΔΩΝ ήταν το μετεωρολογικό δίκτυο της Εθνικής Μετεωρολογικής Εταιρείας – ΕΜΥ (Σύστημα NHREAS). Οι λειτουργίες του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ, είναι η συνεχής παρακολούθηση και μέτρηση των παραμέτρων του θαλάσσιου και ατμοσφαιρικού περιβάλλοντος, η απομακρυσμένη μεταφορά δεδομένων στο ΕΛΚΕΘΕ για επεξεργασία, η πρόγνωση της κατάστασης θαλασσών με χρήση αριθμητικών μοντέλων και η διάθεση των δεδομένων και των προϊόντων τους στους διάφορους χρήστες.

Το δίκτυο παρακολούθησης ΠΟΣΕΙΔΩΝ αποτελούν 10 ωκεανογραφικοί (+2 εφεδρικοί) και 10 πλωτήρες τύπου Sea Watch για μέτρηση κυματικών παραμέτρων, παρατεταγμένοι στις ελληνικές θάλασσες με ποικιλία αισθητήρων για μέτρηση μετεωρολογικών, περιβαλλοντικών και ωκεανογραφικών δεδομένων. Οι κυματικές παράμετροι που καταγράφονται είναι το ύψος και η διεύθυνση κύματος. Οι πλωτήρες είναι εφοδιασμένοι με σύστημα για αυτοματοποιημένες μετρήσεις, έλεγχο, αποθήκευση, προ-επεξεργασία και προετοιμασία αποστολής των δεδομένων σε σχεδόν πραγματικό χρόνο στο επιχειρησιακό κέντρο του ΕΛΚΕΘΕ. Οι σταθμοί είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες οι οποίοι μετρούν τις παρακάτω παραμέτρους: (www.poseidon.hcmr.gr)

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

Η συλλογή των δεδομένων γίνεται κάθε τρεις ώρες και ακολουθεί η αποστολή τους με το δορυφορικό σύστημα Inmarsat-C και με κινητή τηλεφωνία GSM. Το δίκτυο είναι σε λειτουργία από τις αρχές του 1999 και κάθε 3-4 μήνες πραγματοποιείται η συντήρηση του από το ωκεανογραφικό σκάφος Αιγαίο (Νίττης & Χρόνης, 2003).



Σχήμα 5.1.: Δίκτυο πλωτήρων του Συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ
Πηγή: POSEIDON System-www.poseidon.hcmr.gr

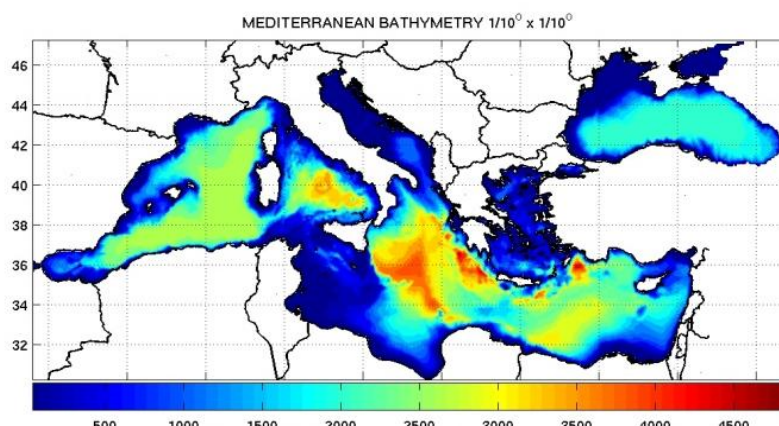
5.2. Το κυματικό μοντέλο WAM (Wave Model)

Στις ελληνικές θάλασσες και ειδικότερα στο Αιγαίο Πέλαγος έχουν εφαρμοσθεί, το εξελεγμένο εμπειρικό μοντέλο WACCAS, το μοντέλο δεύτερης γενιάς AUT και το μοντέλο τρίτης γενιάς WAM (Χριστόπουλος et al., 1997). Πρώτες εκτιμήσεις που έγιναν σχετικά με τα μοντέλα έδειξαν ότι το κυματικό μοντέλο WAM είναι το καταλληλότερο για το Αιγαίο Πέλαγος, αλλά απαιτούνται περαιτέρω διορθώσεις και ρυθμίσεις κυρίως για τα βαθύτερα στρώματα.

Στις ελληνικές θάλασσες τα κυματικά δεδομένα συλλέγονται από το αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης WAM-Cycle 4, που αναπτύχθηκε στο Max Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, στην Γερμανία, με χωρική ανάλυση $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ και χρονική ανάλυση 3 ωρών. Μια τέτοια ανάλυση είναι αρκετά κατάλληλη για μια γενική περιγραφή του αιολικού και κυματικού δυναμικού ολόκληρης της Μεσογείου, καθώς και για το Αιγαίο Πέλαγος, το οποίο είναι μια ημίκλειστη λεκάνη με ιδιαιτερότητες, όπως απότομες αλλαγές της βαθυμετρίας και παρουσία πολλών νησιωτικών συμπλεγμάτων. Τα hindcast δεδομένα έχουν βαθμονομηθεί χρησιμοποιώντας επιτόπιες μετρήσεις κύματος που λαμβάνονται από το δίκτυο παρακολούθησης των ελληνικών θαλασσών ΠΟΣΕΙΔΩΝ (Soukissian et al., 1999).

Το μετεωρολογικό αυτό μοντέλο βασίζεται στο ατμοσφαιρικό σύστημα SKIPΩΝ (Kallos et al., 1997). Η κάθετη δομή του μοντέλου SKIRON-Eta αποτελείται από 38 επίπεδα που εκτείνονται από την επιφάνεια μέχρι και την κορυφή του μοντέλου (στα 15.800 χιλιόμετρα). Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των αρχικών και οριακών συνθηκών του μοντέλου, προέρχονται από το ECMWF.

Τα δεδομένα είναι διαθέσιμα σε $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ανάλυση και σε 16 πρότυπα επίπεδα πίεσης (1000, 925, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20 και 10 hPa) κάθε 6 ώρες (00, 06, 12, και 18 UTC). Τα δεδομένα που συλλέγονται, αφορούν την θερμοκρασία και την υγρασία στα 4 στρώματα του εδάφους (που ορίζεται στα βάθη 7cm, 28cm, 100cm και 255cm), καθώς και την θερμοκρασία της επιφάνειας της θάλασσας, η οποία προέρχεται και αυτή σε $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ανάλυση. Ακόμα, χρησιμοποιούνται και τα πεδία που παράγονται κατά την επιχειρησιακή χρήση του ECMWF και λαμβάνονται μέσω του MARS-Μετεωρολογικό Αρχείο και ανάκτησης συστήματος.



Σχήμα 5.2.: Περιοχή εφαρμογής του ατμοσφαιρικού και του κυματικού μοντέλου και ο βαθυμετρικός χάρτης που χρησιμοποιείται στο μοντέλο.

Η περιοχή εφαρμογής του μοντέλου, φαίνεται στο σχήμα 5.2., από 7° W έως 42° E και $30,25^\circ$ N έως $47,25^\circ$ B, και η χωρική κατανομή ορίστηκε $0.1^\circ \times 0.1^\circ$. Το κυματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την παραγωγή των hindcast δεδομένων βασίστηκε στο μοντέλο 3ης

γενιάς WAM-Cycle 4 και υπολογίζει την χωροχρονική εξέλιξη του φάσματος του κύματος, λαμβάνοντας υπόψη την δημιουργία κυματισμών από τον άνεμο, την διάθλαση των κυμάτων λόγω αλλαγής της βαθυμετρίας και/ή την παρουσία ρευμάτων, την μετατροπή της ενέργειας, λόγω των μη γραμμικών τετράδων κυματικών αλληλεπιδράσεων και την απορρόφηση της ενέργειας που οφείλεται στην εμφάνιση αφρού και σταγονιδίων καθώς και στις τριβές πυθμένα. Το μοντέλο τροποποιήθηκε ώστε να είναι αποτελεσματικό (όσον αφορά τόσο την ακρίβεια όσο και την ισχύ) για τις εφαρμογές με υψηλή χωρική ανάλυση και να δώσει επιτυχείς προβλέψεις σε παράκτιες περιοχές, όπου η θραύση των κυμάτων είναι σημαντική.

Η βαθυμετρία είναι προσαρμοσμένη στην χωρική ανάλυση του πλέγματος με διγραμμική παρεμβολή της παγκόσμιας βαθυμετρίας/τοπογραφίας ETOPO 2 με χωρική ανάλυση των 2' (1' αντιστοιχεί 1.852m στον ισημερινό) και κατακόρυφη ακρίβεια 1m. Στις περιπτώσεις ανεπάρκειας της ανωτέρω βάσης δεδομένων (σε περιοχές με ρηγά νερά και στις δύο λεκάνες), γίνονται διορθώσεις με βάση ναυτικούς χάρτες του Πολεμικού Ναυτικού-Υδρογραφική Υπηρεσία.

Η φασματική συχνότητα ανάλυσης του μοντέλου ορίστηκε σύμφωνα με την λογαριθμική κατανομή $\omega_{i+1} = 1.1\omega_i$, όπου η ελάχιστη συχνότητα ορίστηκε σε 0.05 Hz και η μέγιστη συχνότητα σε 0.793 Hz (συνολικά 30 συχνότητες). Το σημαντικό ύψος κύματος, η μέση περίοδος κύματος και η μέση κατεύθυνση κύματος λαμβάνονται ως ολοκληρωμένα προϊόντα από το φάσμα του κύματος, ενώ η φασματική περίοδος κορυφής και η κυματική ενέργεια που αντιστοιχεί στο χαμηλής και υψηλής συχνότητας μέρος του φάσματος, προέρχονται από την κατανομή του φάσματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο το ατμοσφαιρικό, όσο και το κυματικό μοντέλο έχουν την ίδια χωρική ανάλυση (0.1 ° x 0.1 °) και σχεδόν την ίδια έκταση, αποφεύγοντας με αυτόν τον τρόπο πολλαπλές γραμμικές παρεμβολές για τον υπολογισμό των παραμέτρων του ανέμου στο πλέγμα του μοντέλου.

Γενικά, το κυματικό μοντέλο WAM υποεκτιμά τις υψηλές τιμές του σημαντικού ύψους κύματος και της φασματικής περιόδου κορυφής. Μέρος αυτού του σφάλματος, θα μπορούσε να αποδοθεί σε αντίστοιχα σφάλματα μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των πραγματικών τιμών της ταχύτητας του ανέμου (Soukissian et al., 2006).

Τα hindcast αποτελέσματα είναι διορθωμένα από επιτόπιες μετρήσεις κύματος και από γραμμική παλινδρόμηση. Οι τελικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τη διόρθωση του σημαντικού ύψους κύματος του μοντέλου H_S και την φασματική περίοδο κορυφής T_p είναι οι εξής:

$$\hat{H}_{S,WAM} = 1.15H_{S,WAM}, \quad (5.2.1.)$$

$$\hat{T}_{P,WAM} = 1.07T_{P,WAM}, \quad (5.2.2.)$$

,όπου οι μεταβλητές \hat{X} χαρακτηρίζουν τις διορθωμένες τιμές και οι μεταβλητές X τις αρχικές.

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, στα αποτελέσματα του κυματικού μοντέλου δεν πραγματοποιήθηκε η παραπάνω διόρθωση, με σκοπό να γίνει εμφανή η διαφορά των αποτελεσμάτων του μοντέλου με τα αποτελέσματα από τις επιτόπιες μετρήσεις.

5.3. Μέθοδος εκτίμησης κυματικού δυναμικού

Στο κεφάλαιο 4 αναπτύχθηκε η θεωρητική εκτίμηση του κυματικού δυναμικού και η σχέση που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κυματικής ενέργειας για κάθε κατάσταση της θάλασσας είναι:

$$P_i = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_{s_i}^2 T_i, \quad i=1,2,\dots,N, \quad (5.3.1.)$$

όπου P (kW/m) είναι η ενέργεια των κυμάτων ανά μονάδα μήκος κύματος, ρ είναι η πυκνότητα του νερού ($1025 \text{ kg}/m^3$), g η επιτάχυνση της βαρύτητας ($9.81 \text{ m}/s$), H_{s_i} το σημαντικό ύψος κύματος και T_{s_i} η περίοδος κορυφής για κάθε κατάσταση θάλασσας (Pontes et al.,2007).

Ο υπολογισμός του μέσου κυματικού δυναμικό \bar{P} για όλες τις διαθέσιμες μετρήσεις, πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη απλή σχέση:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N}. \quad (5.3.2.)$$

όπου N είναι ο συνολικός αριθμός των καταστάσεων θάλασσας για το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα.

6. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΣΤΙΣ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΘΑΛΑΣΣΕΣ & ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

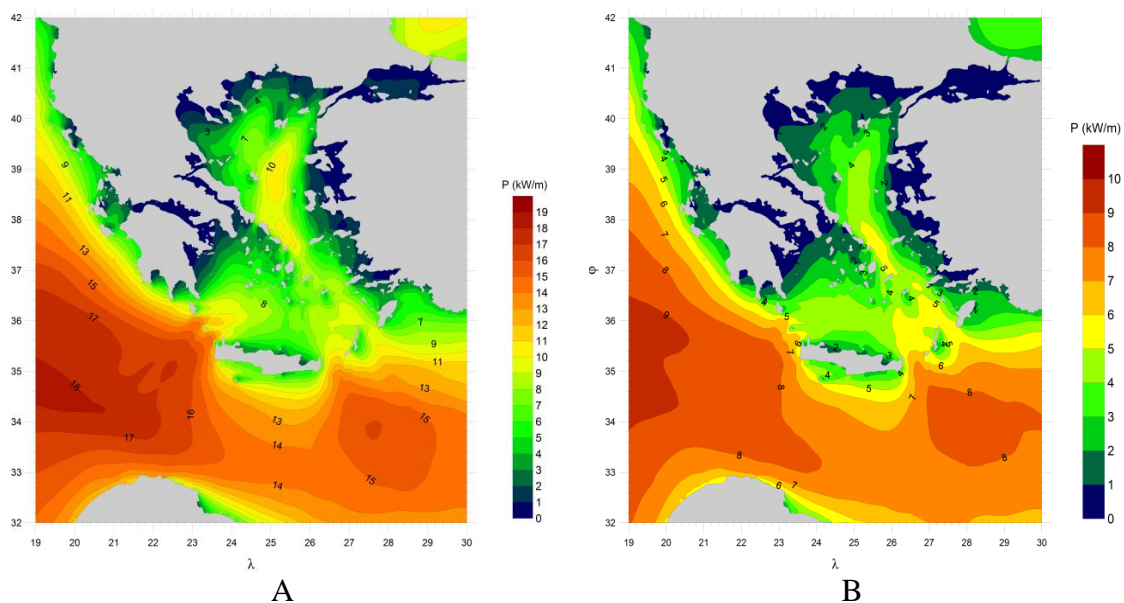
Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός του κυματικού δυναμικού στις ελληνικές θάλασσες χρησιμοποιώντας hindcast δεδομένα του κυματικού μοντέλου WAM και προσδιορίστηκαν οι περιοχές όπου εμφανίζονται οι υψηλότερες τιμές. Στην συνέχεια, υπολογίστηκε το κυματικό δυναμικό σε 5 συγκεκριμένους πλωτούς σταθμούς του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ (επιτόπιες μετρήσεις). Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από αυτές τις μετρήσεις.

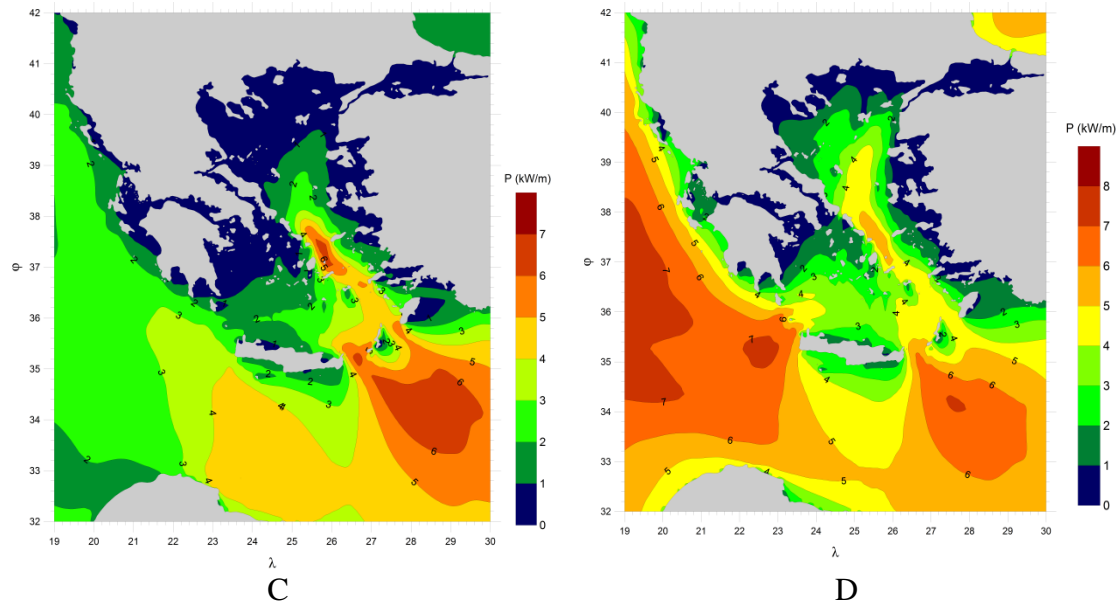
6.1. Εκτίμηση κυματικού δυναμικού από δεδομένα hindcast

Η περιοχή μελέτης για τον υπολογισμό της κυματικής ενέργειας στις ελληνικές θάλασσες από hindcast δεδομένα, ορίζεται από τα εξής σημεία: (42.25° N, 19.00° E), (42.25° N, 30.00° E), (30.25° N, 19.00° E), (30.25° N, 30.00° E). Αρχικά, η περιοχή μελέτης που μας ενδιαφέρει, έχει διακριτοποιηθεί μέσω ενός κανάβου διαστάσεων 0.1x0.1 deg. Σε κάθε grid point αντιστοιχεί μια συγκεκριμένη τιμή μέτρησης που έχει πραγματοποιηθεί ανά 3 ώρες για μια χρονική περίοδο 10 ετών (1995-2004). Τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων, είναι οι αρχικές χρονοσειρές και χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή της χωρικής κατανομής των ισο-ενεργειακών καμπυλών στις Ελληνικές θάλασσες. Οι ισο-ενεργειακές καμπύλες παρουσιάζουν τις περιοχές με τις ίδιες τιμές. Για την χωρική κατανομή της κυματικής ενέργειας, έγινε μελέτη σε εποχιακή και ετήσια βάση.

Η εποχιακή κατανομή χωρίζεται σε 4 εποχές (χειμώνας-άνοιξη-καλοκαίρι-φθινόπωρο) που για κάθε εποχή, παρουσιάζεται η μέση τιμή αυτών των μετρήσεων για 10 χρόνια. Δηλαδή, για κάθε εποχή, υπολογίζεται ο μέσος όρος του σημαντικού ύψους κύματος, η μέση περίοδος και επομένως η μέση κυματική ενέργεια για 10 χρόνια, με την βοήθεια της προγραμματιστικής γλώσσας Matlab R2011a. Οι εποχές που εξετάζονται είναι ο χειμώνας (Δεκέμβριος, Ιανουάριος, Φεβρουάριος), η άνοιξη (Μάρτιος, Απρίλιος, Μάιος), το καλοκαίρι (Ιούνιος, Ιούλιος, Αύγουστος), και το φθινόπωρο (Σεπτέμβριος, Οκτώβριος, Νοέμβριος).

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα διαγράμματα ακολουθούν εποχιακή και ετήσια βάση και απεικονίζουν τη χωρική κατανομή της μέσης κυματικής ενέργειας ανά μονάδα μήκους κύματος με τις ισο-ενεργειακές καμπύλες (Εικόνα 6.1.).





Εικόνα 6.1.1.: Μέση κυματική ενέργεια στις ελληνικές θάλασσες: Α) Χειμώνας, Β) Άνοιξη, C) Καλοκαίρι, D) Φθινόπωρο

Σε εποχιακή βάση, η πιο έντονη περίοδος για καταστάσεις κύματος παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια του χειμώνα (Εικ.6.1.1.A), όπου η μέση κυματική ενέργεια φτάνει τις μέγιστες τιμές της. Βόρεια των Κυκλάδων, η μέγιστη κυματική ενέργεια είναι 10 kW/m, ενώ νότια των Κυκλάδων, η κυματική ενέργεια έχει μικρότερη τιμή, 6-8 kW/m. Στο νοτιοανατολικό Αιγαίο, ανάμεσα στην Κρήτη-Κάρπαθο, η κυματική ενέργεια είναι περίπου 10-12 kW/m, ενώ στο νότιο-δυτικό Αιγαίο, η τιμή της κυματικής ενέργειας είναι περίπου 8-10 kW/m. Μεταξύ των νησιών Κρήτης - Κυθήρων εμφανίζεται το υψηλότερο κυματικό δυναμικό του Αιγαίου πελάγους της τάξης των 12-14 kW/m. Στο Ιόνιο Πέλαγος, οι τιμές της κυματικής ενέργειας είναι ελαφρώς υψηλότερες (9-15 kW/m).

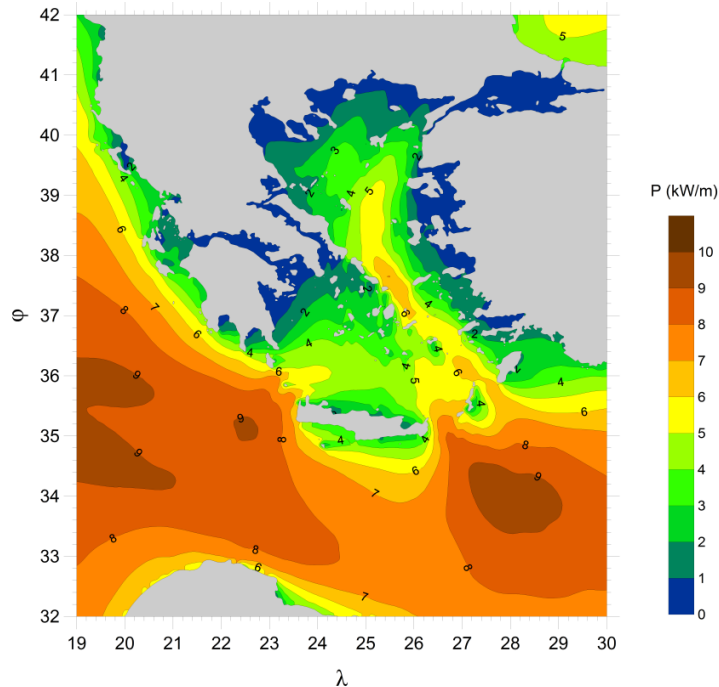
Κατά τη διάρκεια της άνοιξης (Εικ. 6.1.1.B) η ενέργεια των κυμάτων, είναι σχετικά ήπια, όπου, στο βόρειο-κεντρικό και νότιο Αιγαίο, δεν υπερβαίνει 5 kW/m. Η υψηλότερη τιμή της ενέργειας για τους μήνες αυτούς, είναι 7 kW/m και εμφανίζεται πάλι στα στενά μεταξύ Κρήτης - Κυθήρων, Κρήτης-Κάσου και Κάρπαθου-Ρόδου. Στο Ιόνιο Πέλαγος, η κυματική ενέργεια έχει μέγιστη τιμή επίσης, 7 kW/m.

Κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών στις ελληνικές θάλασσες (Εικ. 6.1.1.C), οι τιμές της κυματικής ενέργειας είναι πιο χαμηλές (1-2 kW/m) από αυτές της άνοιξης. Ωστόσο, στο κεντρικό Αιγαίο, βόρεια των Κυκλάδων και στο Νότιο-Ανατολικό Αιγαίο (από τα στενά μεταξύ Κρήτης-Καρπάθου-Ρόδου), εμφανίζεται μια τοπική σημαντική αύξηση της κυματικής ενέργειας, της τάξης 5-6 kW/m. Οι υψηλές αυτές τιμές της κυματικής ενέργειας κατά τους θερινούς μήνες οφείλεται στην επίδραση των “ετησίων” ανέμων (μελέμια) που πνέουν από βόρεια-βορειοδυτικά προς νότια-νοτιοανατολικά στο Αιγαίο Πέλαγος.

Το φθινόπωρο (Εικ. 6.1.1.D) υπάρχει μια σταδιακή αύξηση της τιμής της κυματικής ενέργειας σε σχέση με το καλοκαίρι σε όλη την Ελλάδα. Στο βόρειο-κεντρικό Αιγαίο, η αξία της κυματικής ενέργειας είναι 4 έως 5 kW/m. Στο νοτιοδυτικό Αιγαίο (στα στενά ανάμεσα στην Κρήτη-Κύθηρα) και το νοτιοανατολικό Αιγαίο (στα στενά μεταξύ Κρήτης-Κάσου, Καρπάθου-Ρόδου) η ενέργεια των κυμάτων είναι 5-6 kW/m. Στο Ιόνιο Πέλαγος, οι τιμές είναι ελαφρώς υψηλότερες, 4-6 kW/m.

Στο ετήσιο διάγραμμα (Εικ. 6.1.2.), το πιο έντονο κυματικό δυναμικό εμφανίζεται κατά τους χειμερινούς μήνες, όταν η μέση ροή της ενέργειας των κυμάτων φτάνει σε τιμές πάνω από 7 kW/m. Την άνοιξη, το καλοκαίρι αλλά και το φθινόπωρο η κατάσταση του κύματος είναι

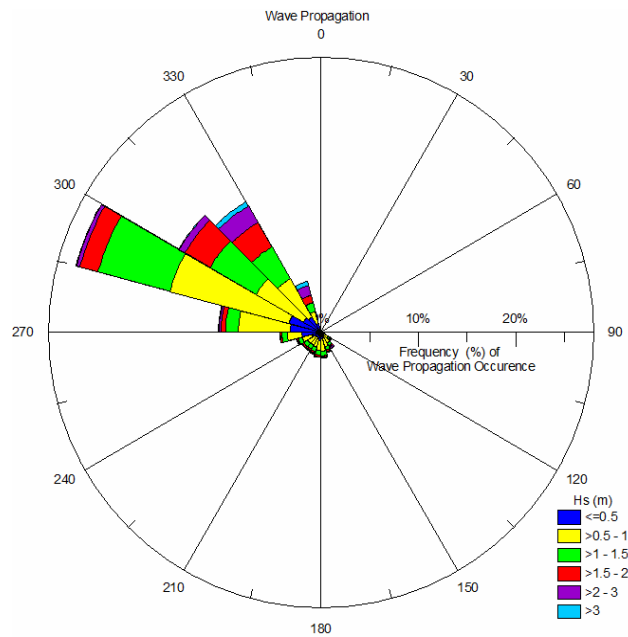
μάλλον πιο ήπια, αν και υψηλές εντάσεις εμφανίζονται σε ορισμένες περιοχές, σε σχέση με την εποχή. Στο βόρειο Αιγαίο η ενέργεια των κυμάτων είναι περίπου 3-5 kW/m, ενώ στο βόρειο-κεντρικό Αιγαίο, μέχρι το σύμπλεγμα των Κυκλάδων, η κυματική ενέργεια φτάνει μέχρι τα 6 kW/m. Στο νοτιοδυτικό Αιγαίο, η κυματική ενέργεια είναι χαμηλότερη, 4-5 kW/m. Οι υψηλότερες τιμές της κυματικής ενέργειας, 6-8 kW/m, παρουσιάζονται στα στενά μεταξύ Κρήτης-Κύθηρα και Κρήτης-Κάσου. Στο στενό μεταξύ Κρήτης-Κάρπαθου και Κάρπαθου-Ρόδου, η κυματική ενέργεια είναι περίπου 6 kW/m. Στο Ιόνιο Πέλαγος, η κυματική ενέργεια σε ετήσια βάση κυμαίνεται σε ένα εύρος 4-8 kW/m.



Εικόνα 6.1.2.: Μέση ετήσια κυματική ενέργεια στις ελληνικές θάλασσες

Μια περιοχή η οποία θα μπορούσε να είναι ένα υποψήφιο σημείο για την εγκατάσταση συσκευής εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας βρίσκεται στα στενά μεταξύ Κάσου-Κάρπαθου. Για το συγκεκριμένο σημείο έγινε υπολογισμός της κυματικής ενέργειας σε ετήσια και εποχιακή βάση.

Η μέση ετήσια κυματική ενέργεια υπολογίστηκε, 6.4 kW/m. Ενώ σε εποχιακή βάση, υπολογίστηκε ότι στα στενά μεταξύ Κάσου-Κάρπαθου, η κυματική ενέργεια είναι 4.91 kW/m το φθινόπωρο, ενώ το χειμώνα φθάνει 9.58 kW/m. Κατά τη διάρκεια της άνοιξης και του καλοκαιριού, οι μέσες τιμές της ενέργειας από τα κύματα είναι 5.75 kW/m και 5.41 kW/m, αντίστοιχα. Το διάγραμμα στο σχήμα (Εικόνα 6.1.3.) δείχνει την κατανομή της συχνότητας εμφάνισης της διάδοσης των κυμάτων σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα σημαντικά ύψη κύματος σε αυτή την περιοχή σε ετήσια βάση (27° 0.00 E, 35 °45 B). Η κυρίαρχη κατεύθυνση του κύματος στην περιοχή αυτή, είναι δυτικά-βορειοδυτικά και βρίσκεται στον τομέα [285°, 300°] με συχνότητα εμφάνισής περίπου 25%. Οι υψηλότερες τιμές του σημαντικού ύψους κύματος όμως, συμβαίνουν στον τομέα [315°, 345°].



Εικόνα 6.1.3.: Ετήσιο ροδόγραμμα στην περιοχή Κάσου-Καρπάθου

6.2. Εκτίμηση κυματικού δυναμικού από επιτόπιες μετρήσεις

Τα κυματικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία, για την εκτίμηση του κυματικού δυναμικού συνίστανται σε χρονοσειρές φασματικών παραμέτρων καλύπτοντας μια περίοδο που κυμαίνεται από 5 έως 12 χρόνια (1999-2011). Οι μετρήσεις κύματος έχουν διάρκεια καταγραφής 1024s και διενεργούνται κάθε 3 ώρες. Ειδικότερα, οι μετρήσεις έχουν αποκτηθεί από 5 πλωτούς μετρητικούς σταθμούς (buoys) του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ, οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στις περιοχές βαθέων υδάτων (Εικόνα 6.2.1.):

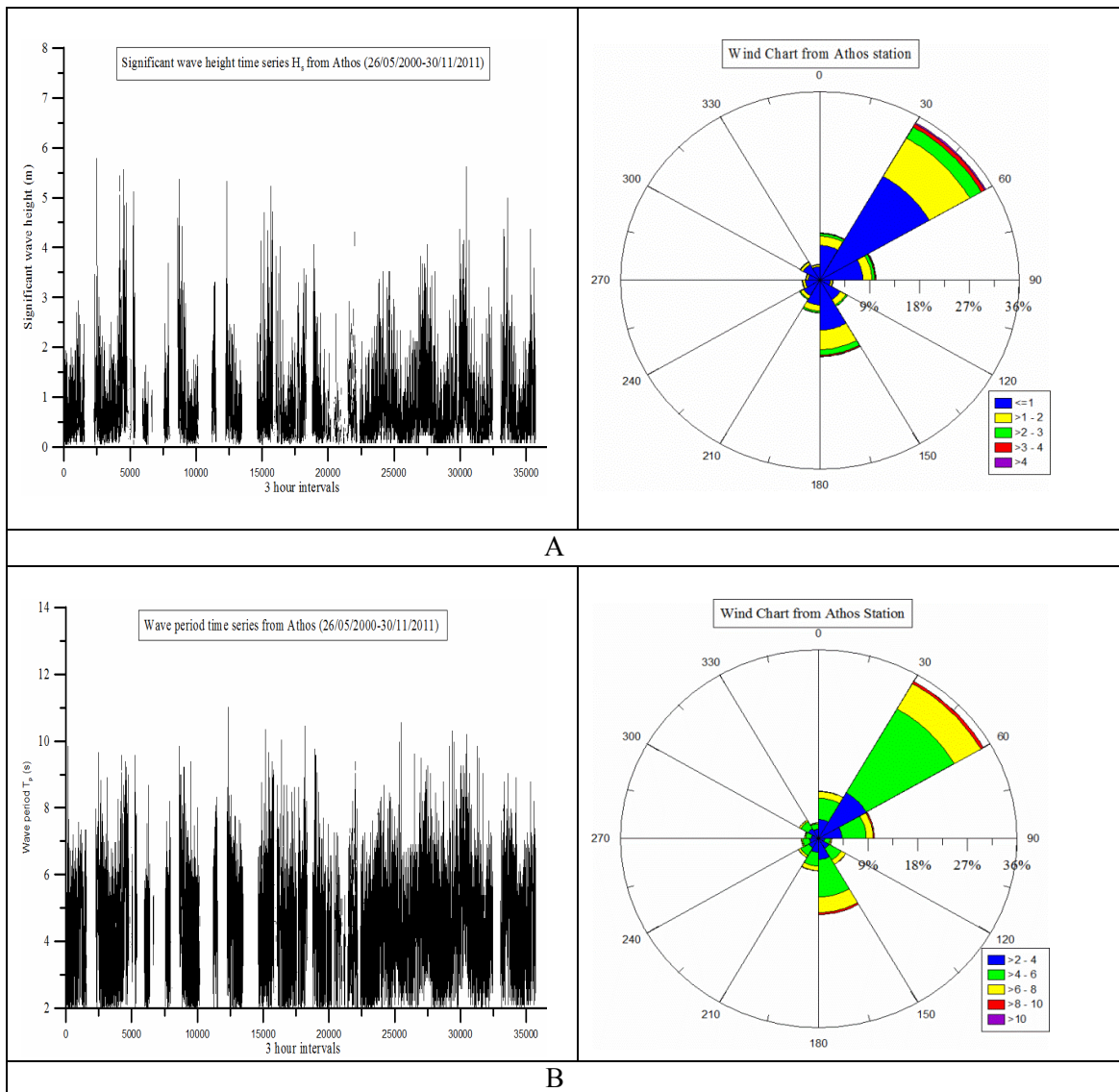
- Άθως [39.9635° Β, 24.7226° Α]
- Μύκονος [37.5113° Β, 25.4590° Α]
- Ε1Μ3Α [35.7860° Β, 24.9199° Α]
- Πύλος [36.8359° Β, 21.6113° Α]
- Ζάκυνθος [37.9541° Β, 20.6104° Α]



Εικόνα 6.2.1.: Θέσεις πλωτών σταθμών του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ

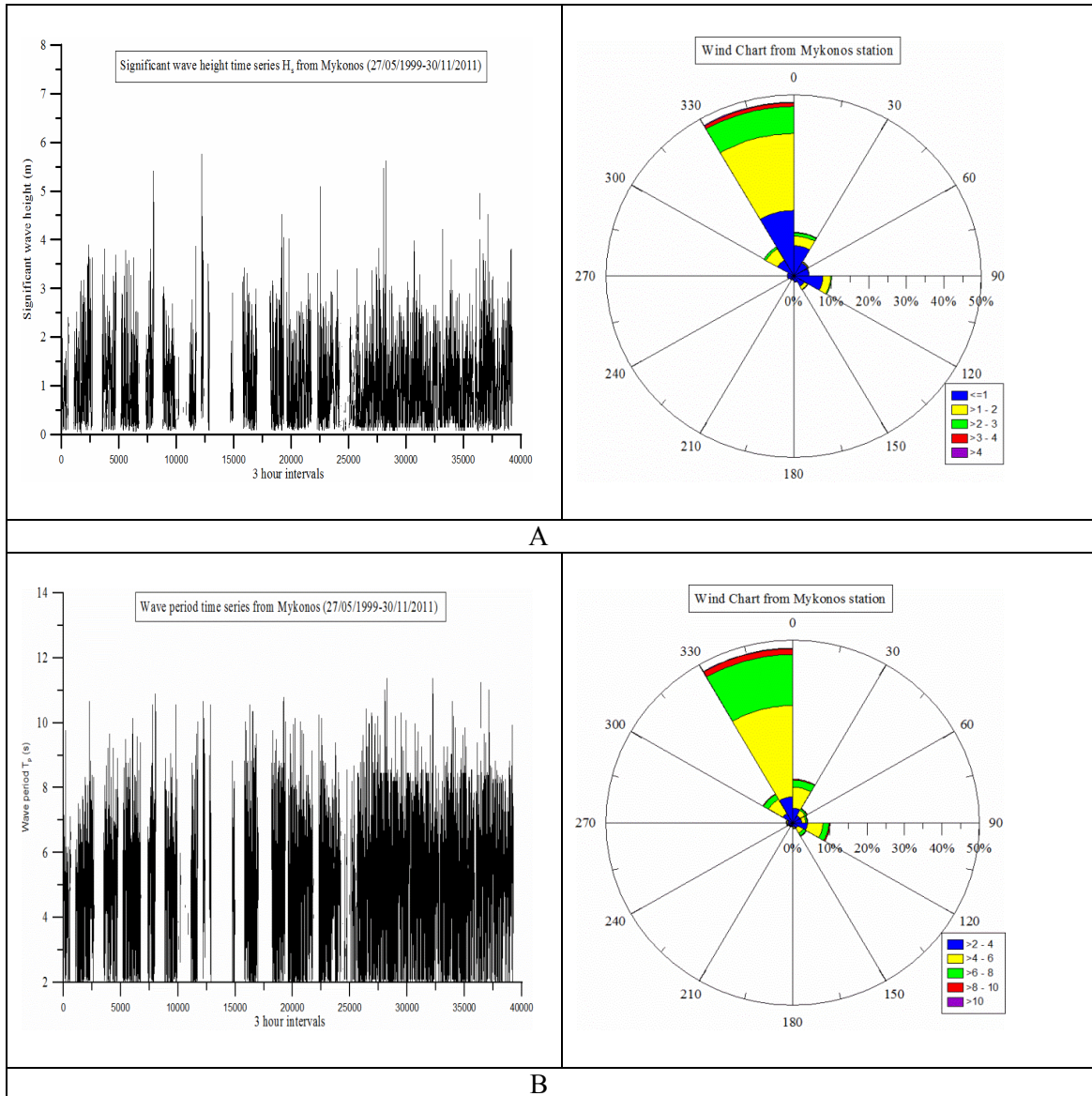
6.2.1. Ανάλυση κυματικών δεδομένων

Αρχικά πραγματοποιήθηκε διόρθωση και φιλτράρισμα των ληφθέντων δεδομένων, δηλαδή έγινε απαλοιφή των αρνητικών, μηδενικών και ακραίων τιμών που περιέχονταν σ' αυτά. Ακόμα, απερρίφθησαν οι μήνες στους οποίους υπήρχαν μετρήσεις κάτω από 10 ημέρες. Στη συνέχεια, ακολουθούν διαγράμματα που απεικονίζουν την χρονοσειρά του σημαντικού ύψους κύματος με το αντίστοιχο ροδόγραμμα καθώς και της περιόδου κύματος με το αντίστοιχο ροδόγραμμα για τους 5 πλωτούς μετρητικούς σταθμούς [(Εικ. 6.2.1.1.) -(Εικ. 6.2.1.5.)]. Τα ροδογράμματα των κυματικών δεδομένων περιέχουν την κατεύθυνση, το σημαντικό ύψος κύματος και την περίοδο του κύματος για αυτούς τους σταθμούς.



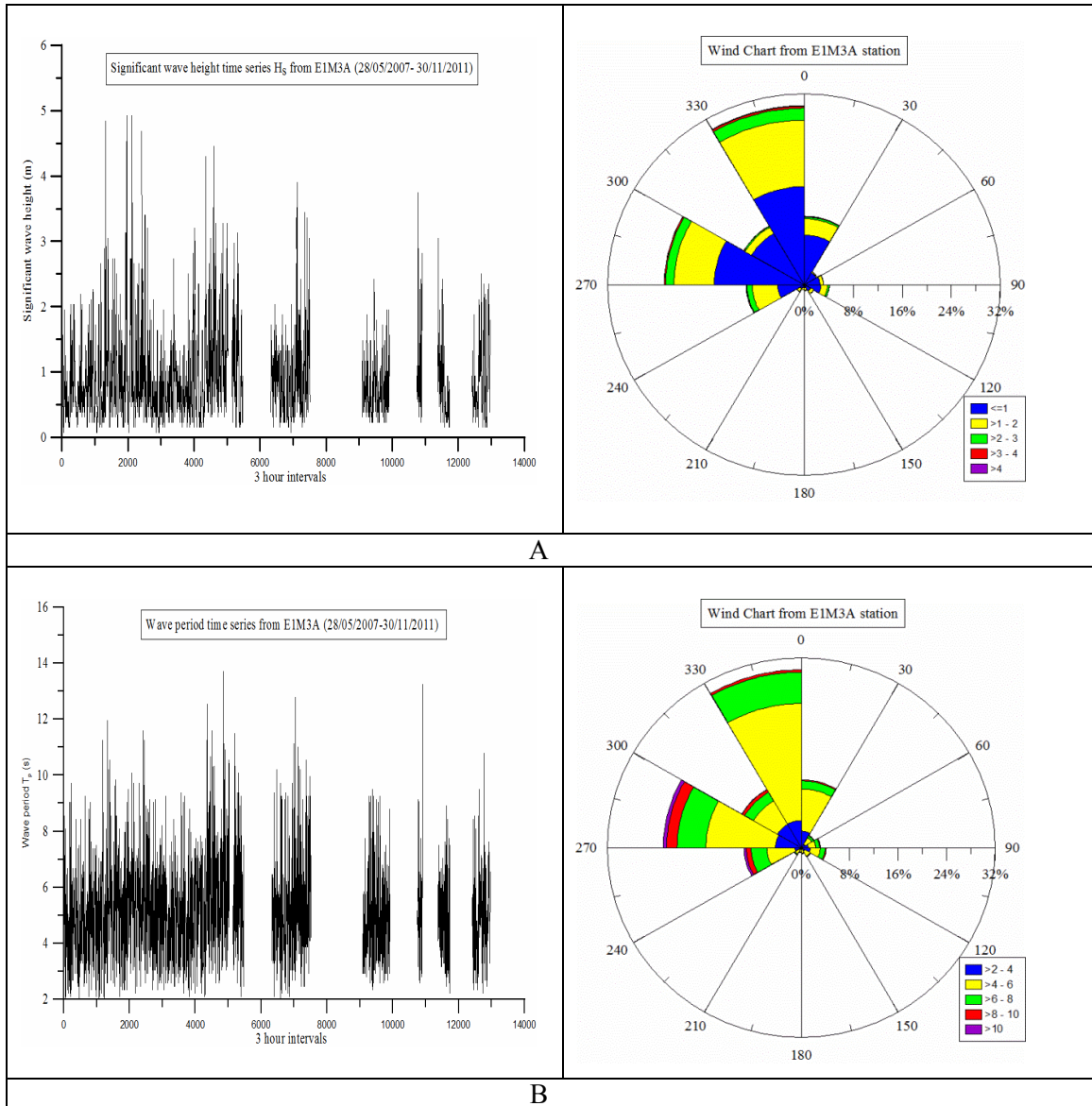
Εικόνα 6.2.1.1.: (Α) Διάγραμμα χρονοσειράς σημαντικού ύψους κύματος και το αντίστοιχο ροδόγραμμα & (Β) Διάγραμμα χρονοσειράς της περιόδου κύματος και το αντίστοιχο ροδόγραμμα για τον σταθμό Άθως.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα από τα ροδογράμματα σημαντικού ύψους και περιόδου κύματος (Εικ. 6.2.1.1.), φαίνεται ότι η κύρια κατεύθυνση του κυματισμού στον σταθμό Άθως, είναι ΒΑ, με μέγιστο καταγεγραμμένο σημαντικό ύψος κύματος 5.79 m που προέρχεται από την κατεύθυνση 38.51°, ενώ επικρατούν και κυματισμοί ΝΝΑ που χαρακτηρίζονται από σημαντικό ύψος κύματος μικρότερο των 3 m και περιόδου κύματος μικρότερης των 8 sec.



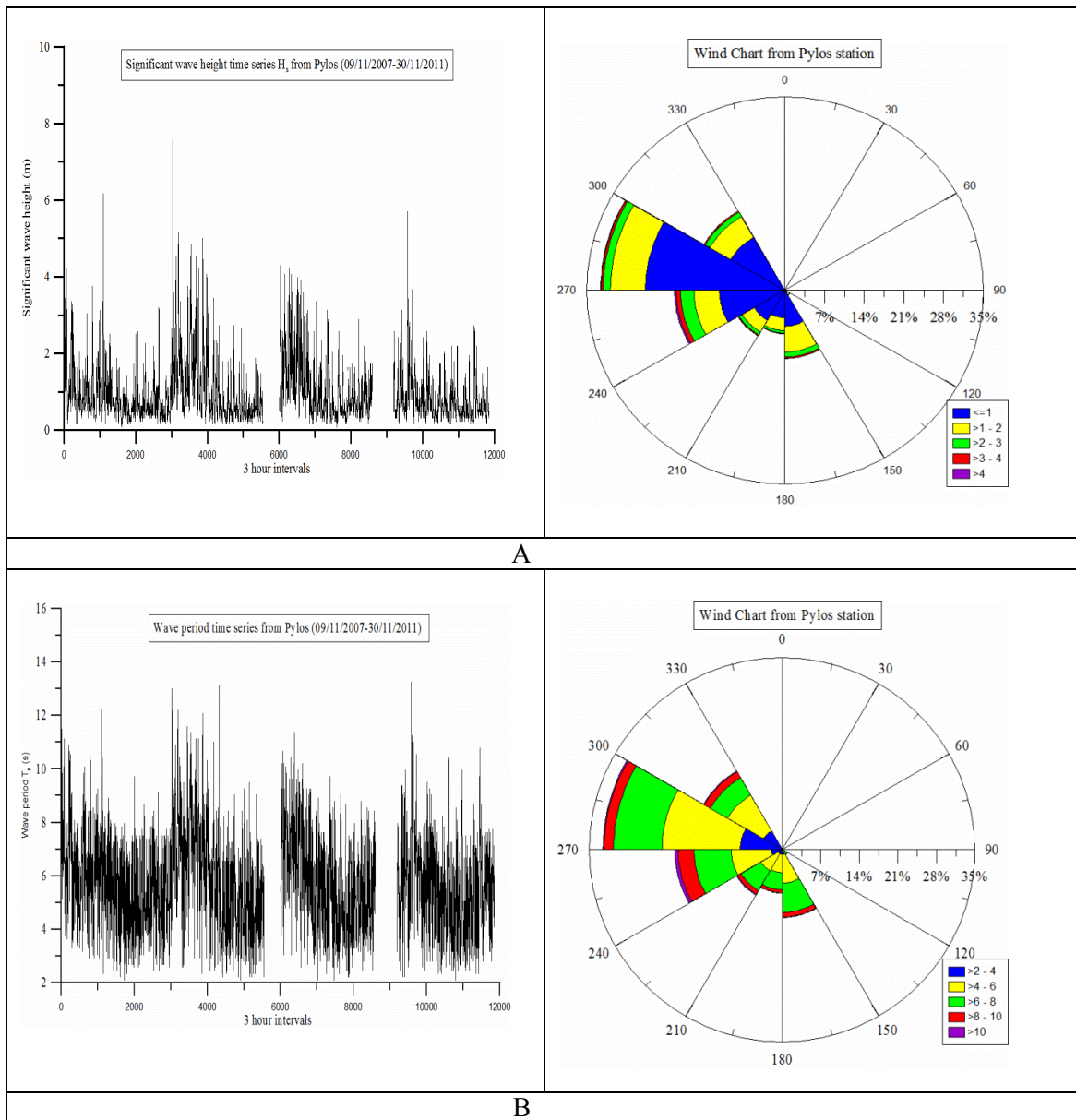
Εικόνα 6.2.1.2.: (Α) Διάγραμμα χρονοσειράς σημαντικού ύψους κύματος και το αντίστοιχο ροδόγραμμα & (Β) Διάγραμμα χρονοσειράς της περιόδου κύματος και το αντίστοιχο ροδόγραμμα για τον σταθμό Μύκονος.

Για τον σταθμό της Μυκόνου (Εικ. 6.2.1.2), η κύρια κατεύθυνση του κυματισμού είναι ΒΔ. Το σημαντικό ύψος κύματος είναι κυρίως 1-3 m, με μέγιστο 5.76 m που προέρχεται από την κατεύθυνση 340.26° , ενώ η περίοδος κύματος είναι κυρίως 4-8 sec, με μέγιστη τιμή 12.33 sec από την κατεύθυνση 90.86° .



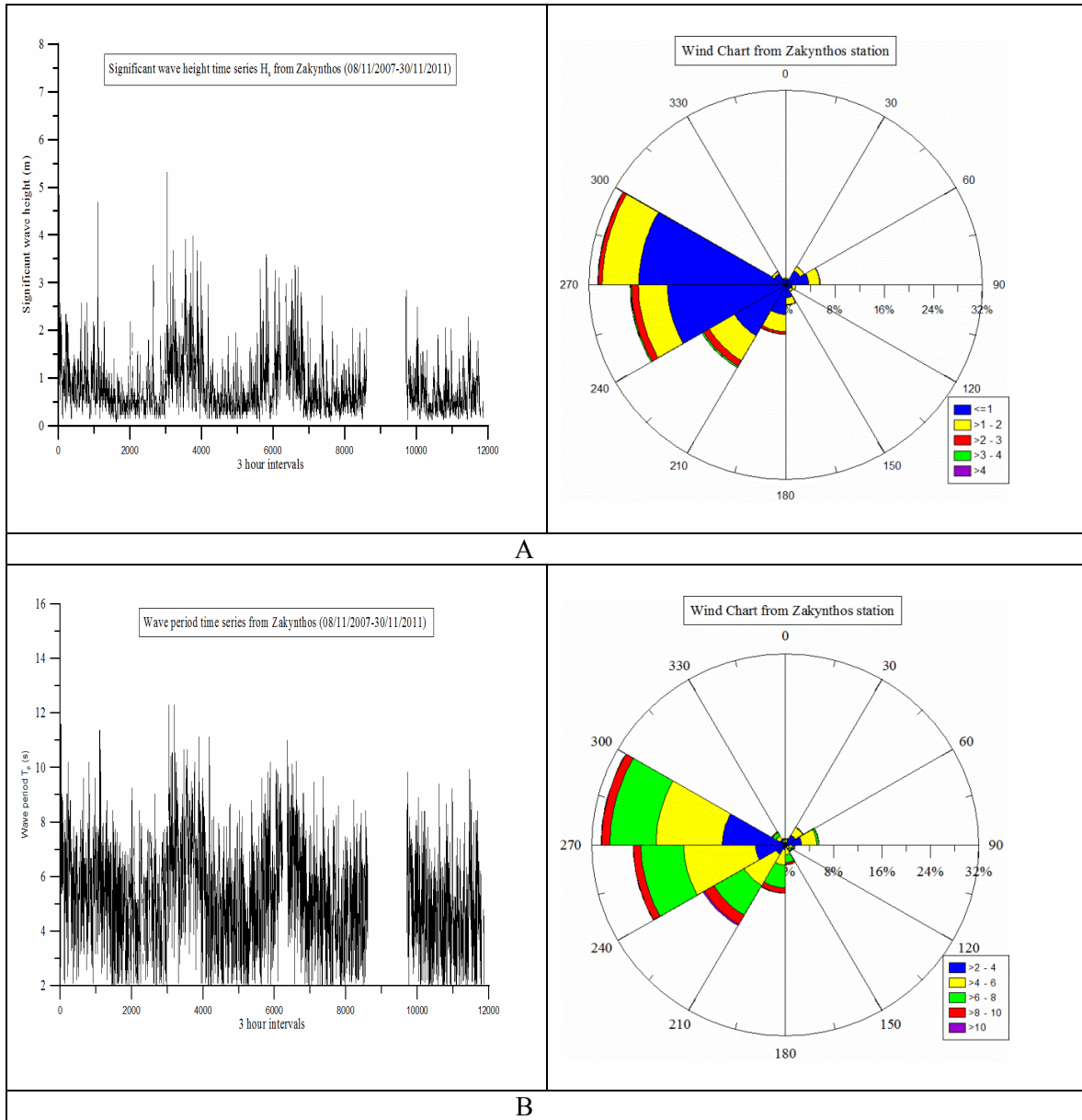
Εικόνα 6.2.1.3.: (Α) Διάγραμμα χρονοσειράς σημαντικού ύψους κύματος και το αντίστοιχο ροδόγραμμα & (Β) Διάγραμμα χρονοσειράς της περιόδου κύματος και το αντίστοιχο ροδόγραμμα για τον σταθμό Ε1Μ3Α.

Από τα ροδογράμματα του σημαντικού ύψους και περιόδου κύματος για τον σταθμό Ε1Μ3Α (Εικ. 6.2.1.3) φαίνεται ότι η κύρια κατεύθυνση του κυματισμού, είναι ΒΔ, με μέγιστο καταγεγραμμένο σημαντικό ύψος κύματος 4.93 m που προέρχεται από την κατεύθυνση 5.625° και μέγιστη περίοδο κύματος 13.7 sec που προέρχεται από την κατεύθυνση 268.59°, ενώ επικρατούν και αρκετοί Δ κυματισμοί με τιμές πάνω από 2 m και 8 sec.



Εικόνα 6.2.1.4.: (Α) Διάγραμμα χρονοσειράς σημαντικού ύψους κύματος και το αντίστοιχο ροδόγραμμα & (Β) Διάγραμμα χρονοσειράς της περιόδου κύματος και το αντίστοιχο ροδόγραμμα για τον σταθμό Πύλος.

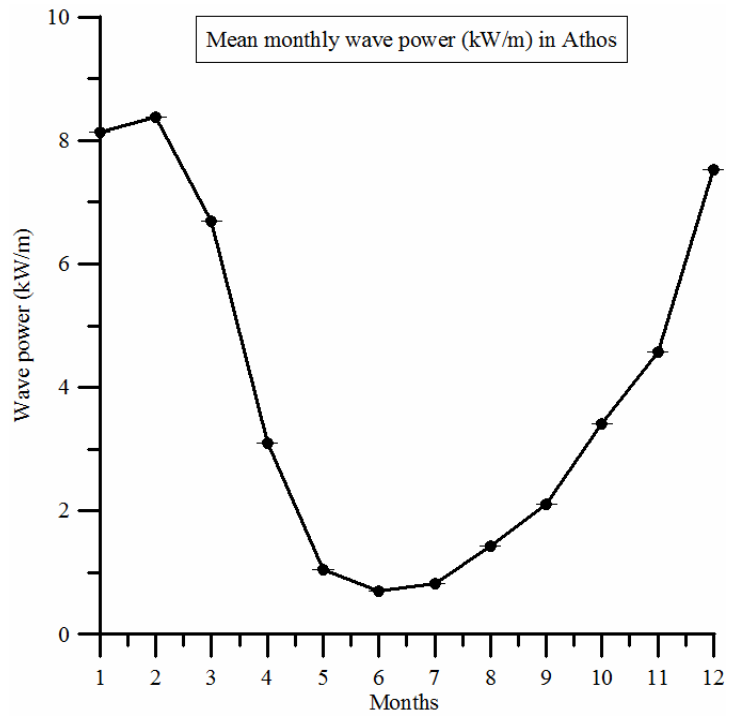
Στον σταθμό της Πύλου (Εικ. 6.2.1.4.), ο κυματισμός είναι Δ και ΝΔ με αρκετές διακυμάνσεις τόσο στο σημαντικό ύψος όσο και στην περίοδο κύματος. Το μέγιστο καταγεγραμμένο σημαντικό ύψος κύματος προέρχεται από την κατεύθυνση 278.43° και είναι 7.57 m, ενώ η μέγιστη τιμή της περιόδου κύματος είναι 13.24 sec από την κατεύθυνση 226.4° .



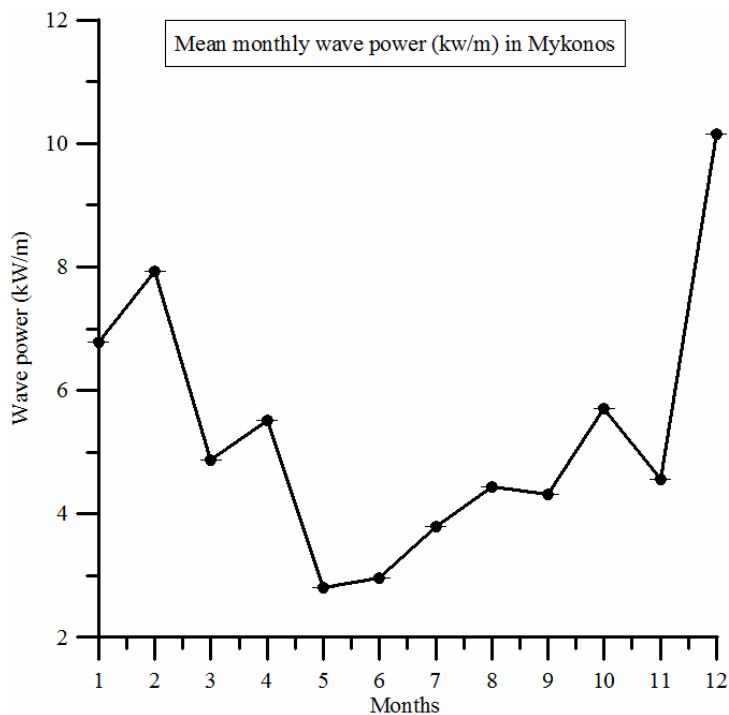
Εικόνα 6.2.1.5. (Α) Διάγραμμα χρονοσειράς σημαντικού ύψους κύματος και το αντίστοιχο ροδόγραμμα & (Β) Διάγραμμα χρονοσειράς της περιόδου κύματος και το αντίστοιχο ροδόγραμμα για τον σταθμό Ζάκυνθος.

Τέλος, σύμφωνα με τα αποτελέσματα από τα ροδογράμματα σημαντικού ύψους και περιόδου κύματος (Εικ. 6.2.1.5.), για τον σταθμό Ζάκυνθος, φαίνεται ότι η κύρια κατεύθυνση του κυματισμού είναι Δ και ΝΔ με μέγιστο καταγεγραμμένο σημαντικό ύψος κύματος 5.31 m που προέρχεται από την κατεύθυνση 99.84° και μέγιστη περίοδο 12.30 sec από την κατεύθυνση 237.65° .

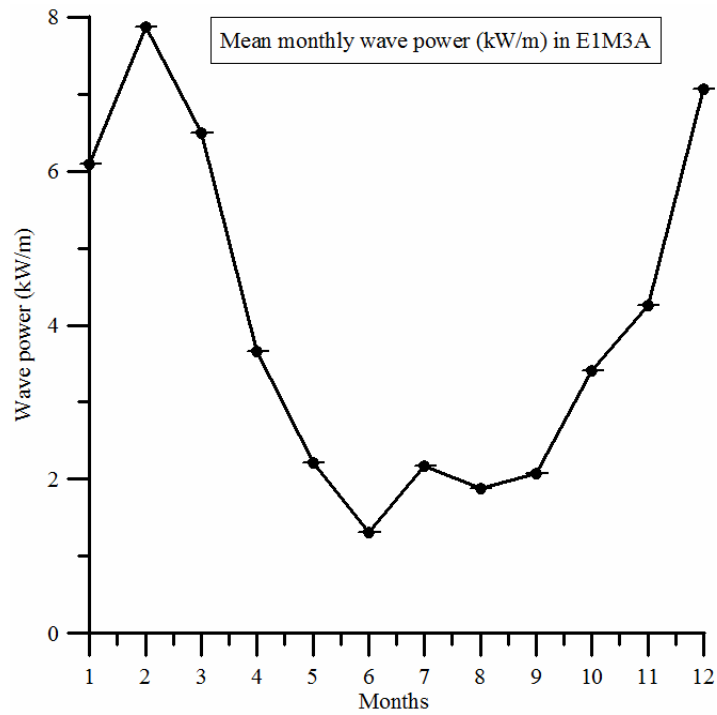
Από τα φιλτραρισμένα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, με την βοήθεια της προγραμματιστικής γλώσσας Matlab R2011a έγινε υπολογισμός του μέσου μηνιαίου και ετήσιου κυματικού δυναμικού για όλες τις διαθέσιμες μετρήσεις, χρησιμοποιώντας την σχέση (5.3.2.). Για την αξιοποίηση των δεδομένων όλων των χρόνων, δημιουργήθηκαν διαγράμματα που απεικονίζουν τη μέση τιμή ανά μήνα της κυματικής ενέργειας αντίστοιχα, για κάθε μία από τις πέντε περιοχές μελέτης που βρίσκονται στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο [(Εικ. 6.2.1.6.) - (Εικ. 6.2.1.10.)].



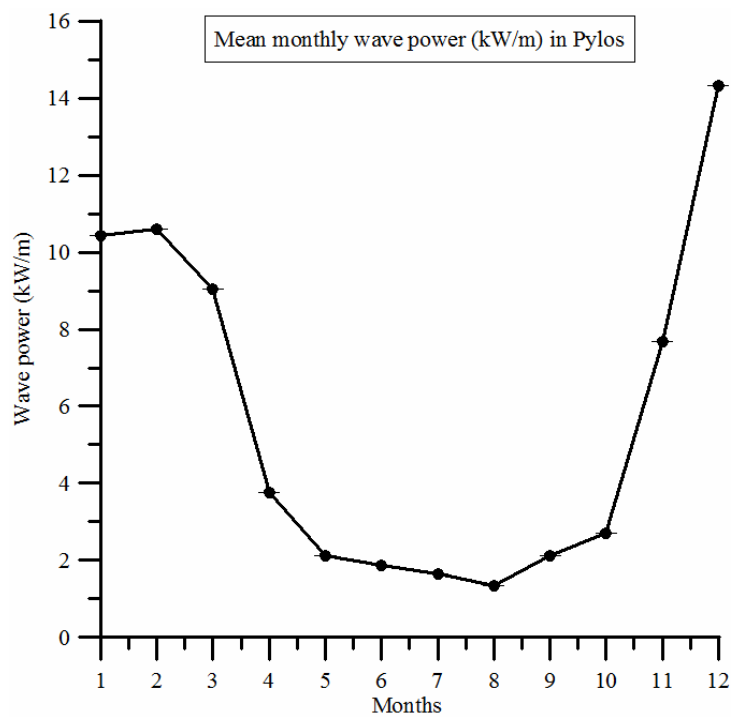
Εικόνα 6.2.1.6.: Μέση μηνιαία διακύμανση κυματικής ενέργειας για την περίοδο 2000-2011 για το σταθμό Άθως.



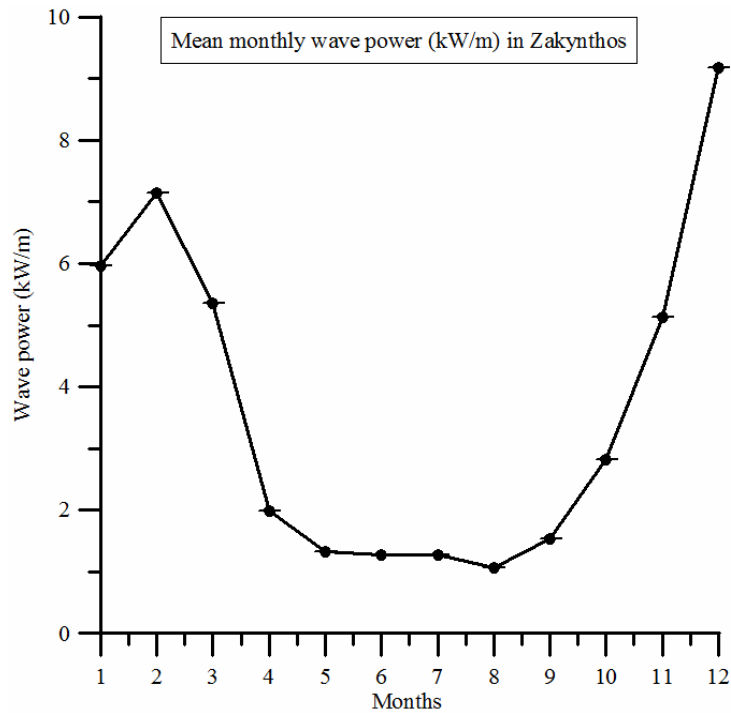
Εικόνα 6.2.1.7.: Μέση μηνιαία διακύμανση κυματικής ενέργειας για την περίοδο 1999-2011 για το σταθμό Μύκονος.



Εικόνα 6.2.1.8.: Μέση μηνιαία διακύμανση κυματικής ενέργειας για την περίοδο 2007-2011 για το σταθμό E1M3A.



Εικόνα 6.2.1.9.: Μέση μηνιαία διακύμανση κυματικής ενέργειας για την περίοδο 2007-2011 για το σταθμό Πύλος.

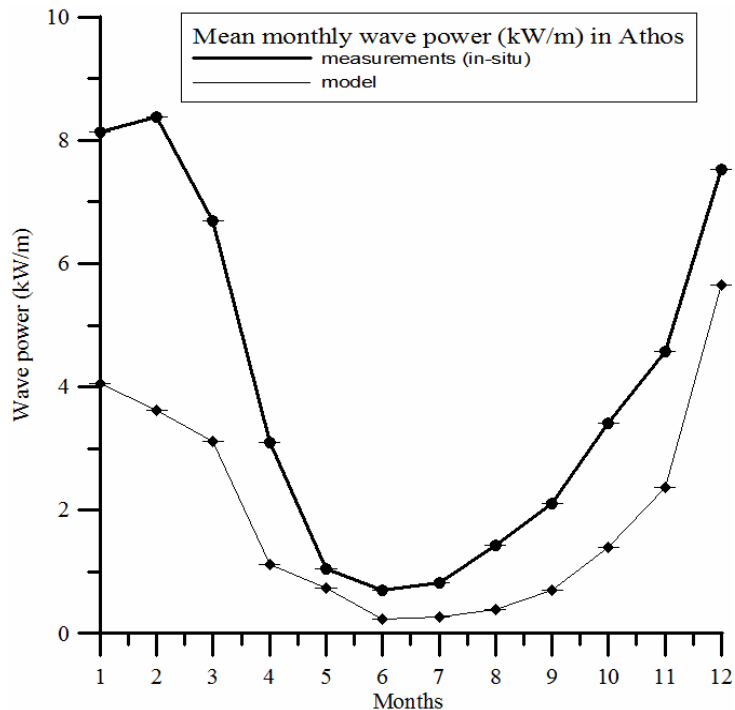


Εικόνα 6.2.1.10.: Μέση μηνιαία διακύμανση κυματικής ενέργειας για την περίοδο 2007-2011 για το σταθμό Ζάκυνθος.

Από τις παραπάνω εικόνες [(Εικ. 6.2.1.6.)-(Εικ.6.2.1.10)], παρατηρείται ότι στο σύνολο των σταθμών, η διακύμανση του κυματικού δυναμικού ακολουθεί μια τυπική ετήσια συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, κατά τους χειμερινούς μήνες παρατηρούνται οι υψηλότερες τιμές του δυναμικού, ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες, εμφανίζονται οι χαμηλότερες τιμές. Η Μύκονος αποτελεί την περιοχή μελέτης όπου παρατηρήθηκαν οι υψηλότερες τιμές κυματικής ενέργειας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες για την περίοδο 1999-2011. Όμως, η μέγιστη τιμή της κυματικής ενέργειας για όλους τους σταθμούς, εμφανίζεται στον σταθμό της Πύλου το μήνα Δεκέμβριο ($P=14 \text{ kW/m}$), παρόλο που η αιολική ενέργεια παραμένει σχετικά χαμηλή. Αυτό αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της κυματικής ενέργειας, όπου ενώ ο άνεμος δεν είναι έντονος, ο κυματισμός εξακολουθεί να είναι σημαντικός, στην μορφή αποθάλασσης.

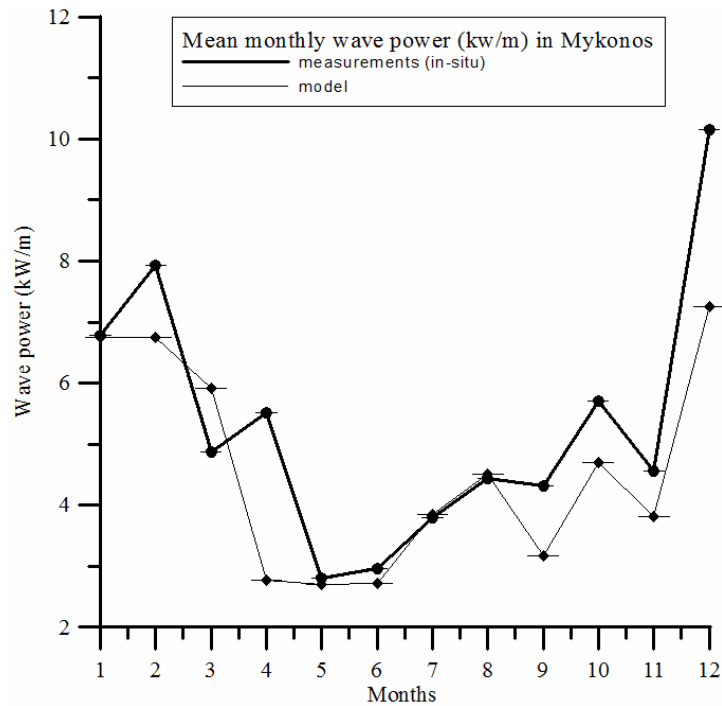
7. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΜΕ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΥΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται εκτίμηση του κυματικού δυναμικού από hindcast δεδομένα σε 4 πλωτούς σταθμούς (Άθως, Μύκονος, Πύλος και Ζάκυνθος) ακολουθώντας την ίδια διαδικασία, όπως και στους παραπάνω υπολογισμούς. Στην συνέχεια, τα διαγράμματα που ακολουθούν, απεικονίζουν τη μέση τιμή ανά μήνα της κυματικής ενέργειας από δεδομένα του κυματικού μοντέλου (αχνή γραμμή) σε σύγκριση με τη μέση τιμή ανά μήνα της κυματικής ενέργειας από τις κυματικές μετρήσεις των σταθμών του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ (έντονη γραμμή).



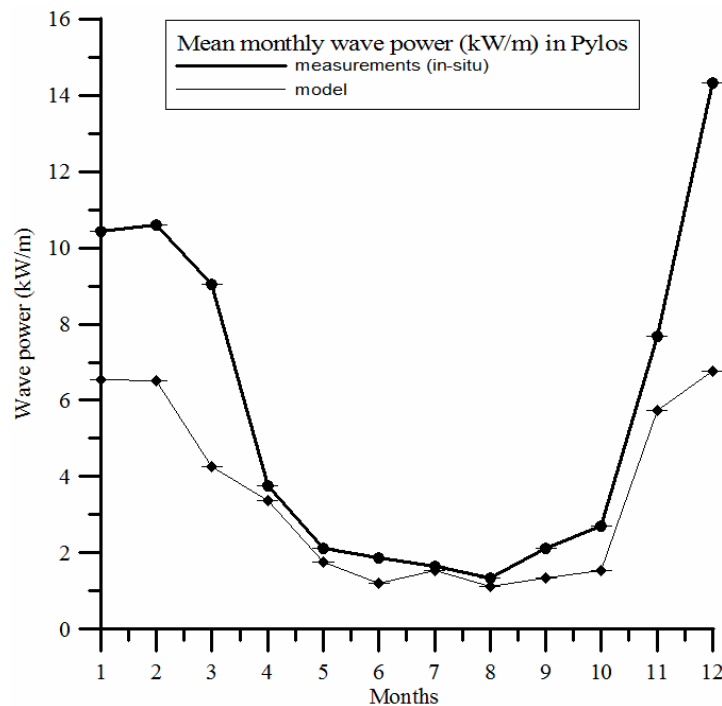
Εικόνα 7.1.: Σύγκριση μετρήσεων με αποτελέσματα κυματικού μοντέλου της μέσης μηνιαίας διακύμανσης κυματικής ενέργειας για το σταθμό Άθως.

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται πως η μηνιαία διακύμανση του κυματικού μοντέλου ακολουθεί πολύ ικανοποιητικά την μηνιαία διακύμανση από επιτόπιες μετρήσεις. Αυτό που αξίζει να αναφερθεί είναι πως τα αποτελέσματα για την κυματική ενέργεια από το κυματικό μοντέλο είναι μικρότερα από αυτά που προκύπτουν από τις επιτόπιες μετρήσεις. Ιδιαίτερα τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο εμφανίζεται μια διαφορά της τάξεως των 4-5 kW/m, ενώ στους μήνες Οκτώβριο-Νοέμβριο-Δεκέμβριο, μία διαφορά της τάξεως 2 kW/m.



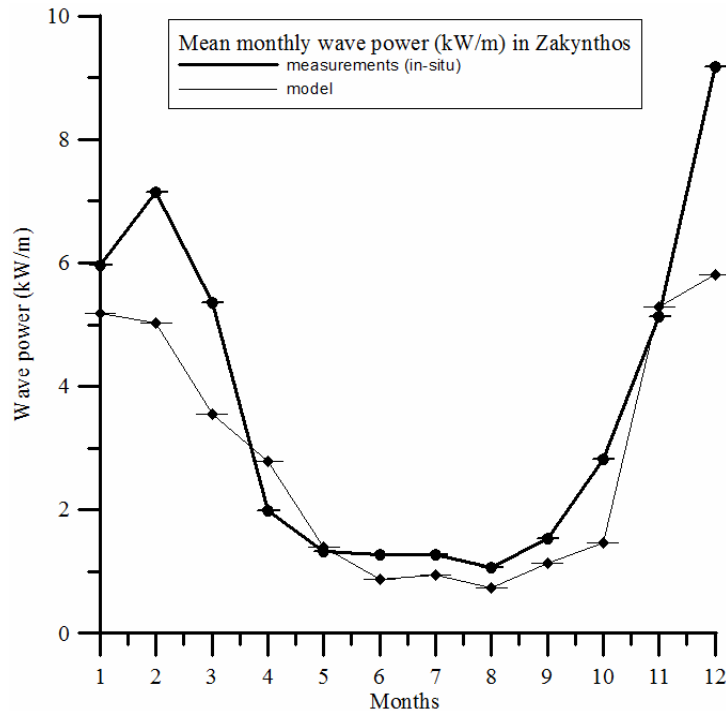
Εικόνα 7.2.: Σύγκριση μετρήσεων με αποτελέσματα κυματικού μοντέλου της μέσης μηνιαίας διακύμανσης κυματικής ενέργειας για το σταθμό Μύκονος.

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων για τον σταθμό της Μυκόνου, παρατηρείται πως οι μήνες Μάιος - Αύγουστος έχουν ελάχιστες διαφορές, ενώ τον μήνα Δεκέμβριο παρατηρείται μια απόκλιση 3 kW/m. Στους υπόλοιπους μήνες εμφανίζεται μια μείωση των αποτελεσμάτων του μοντέλου, αλλά αυτό που πρέπει να σημειωθεί, είναι πως τον Απρίλιο εμφανίζεται επίσης μια έντονη μείωση 3 kW/m.



Εικόνα 7.3.: Σύγκριση μετρήσεων με αποτελέσματα κυματικού μοντέλου της μέσης μηνιαίας διακύμανσης κυματικής ενέργειας για το σταθμό Πύλος.

Στον σταθμό Πύλος, τα αποτελέσματα από το κυματικό μοντέλο είναι μικρότερα σε σχέση με των επιτόπιων μετρήσεων. Συγκεκριμένα, τους μήνες Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο εμφανίζεται μια απόκλιση περίπου 4-5 kW/m, ενώ τον Δεκέμβριο εμφανίζεται μία μεγάλη απόκλιση της τάξης των 8 kW/m. Οι υπόλοιποι μήνες έχουν πολύ μικρές αποκλίσεις, ενώ η γενική ετήσια διακύμανση ακολουθείται ικανοποιητικά.



Εικόνα 7.4.: Σύγκριση μετρήσεων με αποτελέσματα κυματικού μοντέλου της μέσης μηνιαίας διακύμανσης κυματικής ενέργειας για το σταθμό Ζάκυνθος.

Στο συγκεκριμένο σταθμό παρατηρείται πως η μηνιαία διακύμανση από μετρήσεις του κυματικού μοντέλου ακολουθεί ικανοποιητικά την μηνιαία διακύμανση από επιτόπιες μετρήσεις, με χαμηλότερες όμως τιμές και μικρές γενικά αποκλίσεις. Τον Φεβρουάριο και τον Μάρτιο εμφανίζεται μια διαφορά περίπου 2 kW/m, ενώ τον Δεκέμβριο εμφανίζεται μια απόκλιση της τάξης των 4 kW/m.

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφ. 6.2.1) η μέγιστη τιμή της κυματικής ενέργειας από επιτόπιες μετρήσεις, εμφανίζεται κατά τον μήνα Δεκέμβριο στον σταθμό της Πύλου ($P=14.334$ kW/m), ενώ η αντίστοιχη τιμή της κυματικής ενέργειας από μετρήσεις του κυματικού μοντέλου, είναι $P=6.7522$ kW/m. Η μέγιστη τιμή της κυματικής ενέργειας από τα δεδομένα του κυματικού μοντέλου εμφανίζεται τον μήνα Δεκέμβριο στον σταθμό Μύκονος, $P=7.2457$ kW/m, ενώ η αντίστοιχη τιμή από επιτόπιες μετρήσεις είναι $P=10.154$ kW/m.

Από τα παραπάνω διαγράμματα, παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου για κάθε σταθμό, ακολουθούν αρκετά ικανοποιητικά τη μέση μηνιαία μορφή διακύμανσης από επιτόπιες μετρήσεις. Η ουσιαστική διαφορά της σύγκρισης των μετρήσεων είναι πως το κυματικό μοντέλο υποεκτιμά τις υψηλές τιμές της κυματικής ενέργειας, σε αντίθεση με τις χαμηλές, όπου παρατηρείται παρόμοια διακύμανση. Ακόμα, παρατηρείται πως το μήνα Δεκέμβριο εμφανίζεται μια συστηματική απόκλιση για όλους τους σταθμούς.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία παρουσιάσθηκαν αποτελέσματα προγνώσεων του κυματικού μοντέλου WAM-cycle 4 στις ελληνικές θάλασσες για μία περίοδο 10 ετών (1995-2004), αποτελέσματα μετρήσεων από επιτόπιες μετρήσεις του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ για μια περίοδο 5-12 ετών (1999-2011) καθώς και αποτελέσματα σύγκρισης με μετρήσεις σε τέσσερις πλωτούς μετρητικούς σταθμούς.

Σε εποχιακή βάση, όπως αυτές προσδιορίσθηκαν από το μοντέλο, η έντονη περίοδος σε ότι αφορά στις κυματικές συνθήκες εκτείνεται από τον Νοέμβριο μέχρι τον Φεβρουάριο στο Νότιο, Νοτιοδυτικό και Δυτικό Αιγαίο, ενώ κατά τους χειμερινούς μήνες, διακρίνεται ένας σαφής σχηματισμός έντονου κυματικού πεδίου και στο κεντρικό Αιγαίο. Τον Μάρτιο, παρατηρείται η μορφή του κυματικού πεδίου των προηγούμενων τεσσάρων μηνών, αλλά με πολύ μικρότερη ένταση (με τις τιμές να είναι πιο κοντά σε αυτές του Νοεμβρίου). Τους θερινούς μήνες διακρίνεται εμφανώς η επίδραση των “ετησίων” ανέμων (μελέμια) που πνέουν από βόρεια-βορειοδυτικά προς νότια-νοτιοανατολικά στο Αιγαίο Πέλαγος :τον Ιούνιο και τον Ιούλιο η κυματική δράση είναι πιο έντονη στο Νότιο-ανατολικό Αιγαίο (νότια από τα στενά Κάσου-Κρήτης και Ρόδου-Καρπάθου), ενώ τον Αύγουστο μεγάλες τιμές του ύψους κύματος εμφανίζονται επίσης και σε μία ευρύτερη περιοχή του Κεντρικού Αιγαίου, βόρεια του συμπλέγματος των Κυκλάδων (στα στενά μεταξύ Μυκόνου και Ικαρίας). Τέλος, τα μικρότερα ύψη κύματος εμφανίζονται τον Σεπτέμβριο, ενώ τον Μάιο οι ανεμολογικές και κυματικές συνθήκες είναι σχετικά ήπιες.

Σε ετήσια βάση, οι υψηλότερες τιμές του κυματικού δυναμικού, εμφανίζονται στο Ιόνιο Πέλαγος και στα στενά μεταξύ Κρήτης - Κάσου, Κρήτης – Κυθήρων, Κάσου-Καρπάθου και Καρπάθου – Ρόδου, καθώς και στο κεντρικό Αιγαίο, βόρεια των Κυκλάδων.

Από τα αποτελέσματα των μετρήσεων του συστήματος ΠΟΣΕΙΔΩΝ παρατηρείται ότι στο σύνολο των σταθμών, η διακύμανση του κυματικού δυναμικού ακολουθεί μια τυπική ετήσια συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, κατά τους χειμερινούς μήνες παρατηρούνται οι υψηλότερες τιμές του δυναμικού, ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες, εμφανίζονται οι χαμηλότερες τιμές. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν το μέσο ετήσιο κυματικό δυναμικό που υπολογίστηκε στις περιοχές μελέτης κυμαίνεται ως εξής: 0.78-8.37 kW/m για τον σταθμό Άθως, 2.81-10.15 kW/m για τον σταθμό Μύκονος, 1.31-7.87 kW/m στον σταθμό Ε1Μ3Α, 1.33-14.33 kW/m στην Πύλο και 1.05-9.18 kW/m στον σταθμό Ζάκυνθος.

Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των μετρήσεων των πλωτών σταθμών, προκύπτει ότι το μοντέλο περιγράφει ικανοποιητικά τις τάσεις του κυματικού δυναμικού, αλλά εμφανίζεται να υποεκτιμά τις καταστάσεις της θάλασσας και ιδιαίτερα τις έντονες. Ακόμα, η σύγκριση δείχνει πως το κυματικό μοντέλο εμφανίζει μια συστηματική απόκλιση για όλους τους σταθμούς τον μήνα Δεκέμβριο. Συγκεκριμένα, η ετήσια διακύμανση του κυματικού δυναμικού βάση των αποτελεσμάτων του μοντέλου είναι: 0.23-5.65 kW/m για τον σταθμό Άθως, 2.69-7.24 kW/m για τον σταθμό Μύκονος, 1.10-6.75 kW/m στην Πύλο και 0.73-5.81 kW/m στον σταθμό Ζάκυνθος.

Χώρες με υψηλό κυματικό δυναμικό προσβλέπουν στην κάλυψη σημαντικού ποσοστού των ενεργειακών αναγκών τους από σταθμούς κυματικής ενέργειας, ενώ χώρες με μέτριας στάθμης –πλην όμως εκμεταλλεύσιμο- κυματικό δυναμικό θα μπορούσαν να καλύψουν τοπικές ανάγκες σε παράκτιες περιοχές, νησιά ή να εκμεταλλευθούν αυτό το είδος ενέργειας συμπληρωματικά προς συμβατικές ή άλλου είδους ΑΠΕ. Από την ανάλυση των δεδομένων φαίνεται ότι το κυματικό δυναμικό της Ελλάδας, οι ιδιαίτερες συνθήκες και η τοπογραφία του Αιγαίου συμβάλλουν στην ανάπτυξη αξιοποιήσιμων κυματισμών (σύμφωνα με Clement et al, 2002). Οι εκτιμήσεις του ανέμου-κύματος σε περιοχές κοντά στα νησιά του Αιγαίου Πελάγους δείχνουν ότι η ενέργεια που υπάρχει, μπορεί να καλύψει την ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας σε ποσοστό που υπερβαίνει το 85-90%, ακολουθούμενη από την

ελαχιστοποίηση των εισαγόμενων καυσίμων και την σημαντική μείωση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Oikonomou E. et al., 2008).

Σύμφωνα με (Nobre et al., 2007), στις πιθανές περιοχές εγκατάστασης κυματικής συσκευής θα πρέπει να εξετάζονται οι σταθμισμένοι παράγοντες που ακολουθούν:

- Απόσταση από την ακτογραμμή
- Απόσταση από λιμένες
- Απόσταση από το ηλεκτρικό δίκτυο σε σημεία σύνδεσης
- Τύπος θαλάσσιου βυθού
- Κυματικό κλίμα

Οι ακόλουθες περιοχές αποτελούν μη εκτελεστικές περιοχές λόγω διάφορων περιορισμών στη χρήση τους:

- Περιοχές Στρατιωτικής άσκησης
- Θαλάσσιες προστατευόμενες περιοχές
- Περιοχές 500 m γύρω από τα υποβρύχια καλώδια
- Περιοχές κυματικής σκίασης
- Εισόδους λιμένων και πλοήγηση καναλιών
- Περιοχές με βάθος νερού κάτω από 30m και μεγαλύτερο από 200m.

Σε συνδυασμό με τα κριτήρια επιλογής χώρου, παρατηρούμε ότι αυτές οι περιοχές δεν περιλαμβάνουν περιορισμούς εκτέλεσης, με αποτέλεσμα η εγκατάσταση συσκευής εκμετάλλευσης κυματικής ενέργειας να είναι δυνατή. Αν και η αξιοποίηση της ενέργειας των κυμάτων για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος βρίσκεται ακόμα σε εμβρυακό στάδιο, αυτό δεν οφείλεται στο γεγονός ότι η κυματική ενέργεια δεν μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην αντιμετώπιση των κλιματικών αλλαγών. Άλλωστε, η συγκεκριμένη πηγή ενέργειας παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες ΑΠΕ. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εγκατάσταση τεχνολογιών κυματικής ενέργειας θεωρούνται ήπιες και ακόμα τα κύματα είναι πιο ισχυρά το χειμώνα – όταν είναι μεγαλύτερη και η ζήτηση για ηλεκτρισμό. Εξάλλου, ακόμη κι όταν ο άνεμος σταματήσει να πνέει και οι ανεμογεννήτριες πάψουν να λειτουργούν, ο κυματισμός της θάλασσας μπορεί να διαρκέσει για αρκετές ακόμη ώρες (στην μορφή αποθάλασσας) που αποτελεί ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα.

Τελικά, στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, υπάρχει εκμεταλλεύσιμο αιολικό και κυματικό δυναμικό. Επομένως, θα μπορούσε η ανάπτυξη υβριδικών συστημάτων απόληξης αιολικής και κυματικής ενέργειας στη θάλασσα, να αποτελέσει μια βιώσιμη και τεχνολογικά εφικτή λύση για την ηλεκτροδότηση της χώρας από Α.Π.Ε..

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Arlitt R.G.H., Tease K., Starzmann R., Lees J., 2007. “Dynamic System Modeling of an Oscillating Water Column Wave Power Plant based on Characteristic Curves obtained by Computational Fluid Dynamics to enhance Engineered Reliability”, Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto, Portugal, 2007
- Bhattacharyya R., McCormick M.E., 2003. “Wave energy conversion”, Elsevier Ocean engineering Book Series, 6, pp 135.
- Christensen Lars, Madsen Erik Friis, Kofoed Jens Peter, 2005. “The Wave Energy challenge The Wave Dragon case”, PowerGen Europe Conference.
- Clément, A, McCullen, P, Falcão, A, Fiorentino, A, Gardner, F, Hammarlund, K, Lemonis, G, Lewis, T, Nielsen, K, Petroncini, S, Pontes, M-T, Schild, Bengt-Olov Sjöström, P, Sørensen, H.C, Thorpe, T, 2002. “Wave energy in Europe: current status and perspectives”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 6, pp 405–431.
- CRES, 2002. “Wave energy Utilization in Europe Current Status and Perspectives”, European Thematic Network on Wave Energy.
- Cruz João, (2008). *Ocean Wave Energy Current Status and Future Perspectives*, Springer Verlag Berlin Heidelberg, pp 434.
- Currie R., 2002. “Hydrogen, Fuel Cells and the Optimisation of the LIMPET 500 on Islay”, Faculty of Engineering- Energy Systems Division-University of Strathclyde-Glasgow.
- Dean G.R, Dalrymple A.R., (1991). *Water waves mechanics for engineers and scientists*, World Scientific, pp 371.
- Duckers L.J., Lockett F.P., Loughridge B.W., Peatfield A.M., West M.J. and White P.R.S., 1994. “Optimisation of the Clam wave energy converter”, Elsevier Science Ltd, Renewable Energy, Vol.5, Part II pp. 1464-1466.
- Energy in Sweden, 2010, “Facts and figures, Table 46, Total world energy supply, 1990 2009, Table 53 Global supply of renewable energy”, 1990–2008.
- Falnes J., 2007. “A review of wave-energy extraction”, Marine Structures 20, pp 185–201.
- Farley J.M. Francis, 2008. “Wave power converters”, Review for ECOR Symposium, St. Johns, Newfoundland, 23-24 Oct 2008.
- Farley J.M Francis and Rainey R.C.T., 2006. “Anaconda: The bulge wave sea energy Converter”, Maritime Energy Developments Ltd.
- Fengzhen Chen, Neven Duic, Luis Manuel Alves, Maria da Graca Carvalho, 2007. “Renewislands-Renewable energy solutions for islands”, Elsevier Ltd 11, pp 1888-1902.
- Harrison P. Gareth, Wallace A. Robin, 2005. “Climate sensitivity of marine energy”, Renewable Energy 30, pp 1801–1817.
- Holthuijsen H. Leo, (2007). *Waves in oceanic and coastal waters*, Cambridge University

Press, pp 450.

- Iglesias, G., López, M., Carballo, R., Castro, A., Fraguera, J.A., Frigaard, P., 2009. "Wave energy potential in Galicia (NW Spain)", *Renewable Energy*, Vol. 34, pp 2323–2333.
- Kallos G., Nickovic S., Papadopoulos A., et al., 1997. "The regional weather forecasting system SKIRON: An overview", *Symposium on Regional Weather Prediction on Parallel Computer Environments*, pp. 109-122.
- Liu C. Paul, 1983, "A representation for the frequency of wind-generated waves", *Ocean Eng*, Vol. 10, No 6, pp.429-441.
- Margheritini, L., Kofoed, J.P., and Frigaard, P., 2006. "Status and performance of the SSG, Wave Energy Converter", Aalborg University, Denmark.
- Mollison, D, Pontes, M- T, 1992. "Assessing the Portuguese resource wave-power", *Energy*, Vol. 17, No.3, pp 255-268.
- Nam B.W., Shin S.H., Hong K.Y., 2008. "Numerical Simulation of Wave Flow over the Spiral-Reef Overtopping Device", *Maritime & Ocean Engineering Research Institute. Pasific/Asia Offshore Mechanics Symposium*.
- Nobre Ana, Pacheco Miguel, Jorge Raquel, Lopes M.F.P., Gato L.M.C., 2007. "Geo-spatial multi-criteria analysis for wave energy conversion system deployment", *Renewable Energy*, pp 1-15.
- Oikonomou K. Emmanouil, Kiliass Vassilios, Gounas Aggelos, Rigopoulos Alexandros, Karakatsani Eirini, Damasiotis Markos, Papastefanakis Dimitrios, Marini Natasa, 2008. "Renewable energy sources (RES) projects and their barriers on regional scale: The case study of wind parks in the Dodecanese islands", *Greece, Energy Policy*, pp 1-10.
- Pontes, M-T, Sempreviva, A.M, Barthelmie, R, Giebel, G, Costa, P, Sood, 2007. "Integrating Offshore Wind and Wave Resource Assessment", *Paper on the 7th European Wave and Tidal Energy Conference, Porto (PT)*.
- Pontes M.A., Falcao A., 2001. "Ocean energies: Resources and utilization", *World Energy Council 18th Congress, Buenos Aires*.
- Previsic Mirko, 2004. "Assessment Waveberg Wave Energy Conversion Device", *E2I EPRI. Report: E2I EPRI WP - US – 004*.
- REN 21, 2010. "Renewables Global Status Report", *Renewable Energy Policy Network for the 21st Century*
- Soukissian T., Prospathopoulos A., Hatzinaki M., Kabouridou M., 2008. "Assessment of the Wind and Wave Climate of the Greek Seas Using 10-Year Hindcast Results", *The Open Ocean Engineering Journal*, pp 1-12.
- Soukissian T., Hatzinaki M., Korres G., Papadopoulos A., Kallos G., Anadranistakis E., 2007. "Wind and Wave Atlas of the Hellenic Seas", *Hellenic Centre for Marine Research Publ.*, pp 300
- Soukissian T., Chronis G., Nittis K., 1999. "POSEIDON: Operational Marine Monitoring System for Greek Seas", *Sea Technology*, Vol. 40, No. 7, pp. 31-37,

- Soukissian T.H., Prospathopoulos A., 2006. “The Errors-in-Variables approach for the validation of the WAM wave model in the Aegean Sea”, *Mediterranean Marine Science*, Vol. 7, No. 1, pp. 47-62,
- The Queen’s University of Belfast Contract JOR3-CT98-0312, Publishable Report 1 November 1998 to 30 April 2002, Islay Limpet wave power plant, Research funded in part by The European commission, In the framework of the Non Nuclear Energy Programme JOULE III.
- Thorpe Tom, 2003. Presentation: A Brief Overview of Wave & Tidal Energy.
- Waveberg Development, 2009. “Clean Energy Investment Presentation”, New Energy Symposium 9 July 2009.
- Waters R., Engström J., Isberg J., Leijon M., 2009. “Wave climate off the Swedish west Coast”, *Renewable Energy* 34, pp 1600–1606.
- Wen Fan, 2011. “Study of fully developed wind wave spectrum by application of quantum Statistics”, *Physica A* 390, pp 3855–3869.
- Zhen Liu, Beom-Soo Hym, Key-yong Hong, 2008. “Practical Calculation of Parabolic Overtopping Wave Energy Converter”, *ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium*.

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αθανασούλης Γ.Α., Μπελιμπασάκης Κ.Α., 2003. Σημειώσεις για το μάθημα *Κυματικά Φαινόμενα στο θαλάσσιο περιβάλλον*, Δ.Π.Μ.Σ: Ναυτική & Θαλάσσια Τεχνολογία & Επιστήμη, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π., Αθήνα, Οκτώβριος 2003.
- Ελληνική Δημοκρατία, Υπουργείο Ανάπτυξης, 2007. 1^η Έκθεση για το μακροχρόνιο ενεργειακό σχεδιασμό της Ελλάδας 2008-2020.
- Λεμονής Γ., 2002. “Κυματική ενέργεια στην Ευρώπη: Εθνικές δραστηριότητες και προοπτικές αξιοποίησης”, Πρακτικά Συνεδρίου, Έβδομο εθνικό συνέδριο για τις ήπιες μορφές ενέργειας, Πάτρα 6-8 Νοεμβρίου 2002.
- Μαυράκος Σ.Α., 2007. Παρουσίαση: Θαλάσσια Ενέργεια, Εργαστήριο Πλωτών Κατασκευών και Συστημάτων Αγκύρωσης, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.
- Νίτσης Κ. Α, Χρόνης Γ. Θ., 2003. Σημειώσεις για το μάθημα *Επιχειρησιακή Ωκεανογραφία*. Τμήμα Επιστήμης της Θάλασσας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου.
- Οργανισμός Βιομηχανικής Ιδιοκτησίας, 2006. *Ειδικό Δελτίο Βιομηχανικής Ιδιοκτησίας*, Τεύχος Α, Ευρεσιτεχνίες, Νοέμβριος 2006.
- Σουκισιάν Τακβόρ, 2000-2004. Σημειώσεις για το μάθημα *Κυματική Δυναμική*, Τμήμα Επιστημών της Θάλασσας, Πανεπιστημίου Αιγαίου.
- Χαβιαρόπουλος Π., Βιώνης Π., Δημούδη Α., Καρύτσας Κ., Λεμονής Γ., Λυμπερόπουλος Ν.,

Πανούτσου Κ., Πρωτογερόπουλος Χ., 2001. “Πρόσφατες Τεχνολογικές Εξελίξεις στις ΑΠΕ”, Εθνικό Συνέδριο Εφαρμογή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας – Προτεραιότητες σε Συνθήκες Απελευθερωμένης Αγοράς, Αθήνα 19-21/3/2001.

Χριστόπουλος Σ., Σολομωνίδης Χ., 1997. “Εκτίμηση κυματικών παραμέτρων με τη χρήση αριθμητικών μοντέλων και μετρήσεων πεδίου”, Πρακτικά 5^ο Πανελληνίου Συμποσίου Ωκεανογραφίας & Αλιείας, Τόμος Ι -351.

Πηγές Internet

- www.allaboutenergy.gr/Paragogi31.html
- www.alternative-energy-news.info/pelamis-offshore-wave-energy-portugal/
- www.aquaret.com
- ΔΕΗ, www.dei.gr
- www.dpenergy.com/information/wave.html
- www.ecocrete.gr
- www.eepe.murdoch.edu.au/resources/info/Tech/wave/index.html
- www.energypress.gr
- <http://ec.europa.eu>
- <http://inhabitat.com/wave-energy-aquabuoy-20-wave-power-generator/aquabuoy-finavera-wave-power-wave-energy-renewables/>
- www.poseidon.hcmr.gr
- www.renewablesinternational.net
- www.sigmahellas.gr
- www.wavebob.com
- www.wavesenergy.com
- www.wrsc.org/presentation/china-energy-geography
- www.wikipedia.org
- ΥΠΕΚΑ, www.ypeka.gr
- Χατζηλάκος, <http://toswet.com/>
- Anaconda, www.bulgewave.com
- AWS converter, www.awsocan.com
- C-Wave, www.cwavepower.com
- CES, www.oceanmotion.ws
- CETO, www.carnegiewave.com
- Daedalus WECA, www.daedalus.gr
- DEXA, www.dexawave.com
- LAbBuoy, www.cres.gr/kape
- Limpet, www.wavegen.co.uk
- McCabe Wave Pump, www.ocean-energy-systems.org
- Mighty Whale, www.jamstec.go.jp
- Oceanlinx, www.oceanlinx.com
- OPT Powerbuoy, www.oceanpowertechnologies.com
- OWEC, www.owec.co
- Oyster, www.aquamarinepower.com
- PELAMIS, www.pelamiswave.com
- Poseidon’s Organ, www.poseidonorgan.com
- SARA MWEC, www.sara.com/RAE/ocean_wave.html
- SDE, www.sde.co.il
- SeaClam: www.sealtd.co.uk
- SeaSlot-SSG, www.waveenergy.no
- Tapchan, www.taperedchannelwaveenergy.weebly.com
- Waveberg, www.waveberg.com

- Wave Blanket, www.windwavesandsun.com
- Wave Dragon, www.wavedragon.net
- Wave Master, www.oceanwavemaster.com
- Waveroller, www.aw-energy.com
- WaveStar, www.wavestarenergy.com

10. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

	Χώρα Προέλ.	Είδος Εγκατάς	Πιο πρόσφατη υλοποίηση	Απόσταση από την ακτή (km)	Βάθος Τοποθ. (m)	Συνολική Εγκατ. ισχύς μονάδας	Πιο πρόσφατη υλοποίηση τεχνολογίας	Κλίμ. μοντέλου	Μελλοντική Ανάπτυξη-Εφαρμογή	Βασικό πλεονέκτημα
1) ΕΞΑΣΘΕΝΗΤΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ										
Waveberg	Η.Π.Α	Π	Florida, USA	-	-	100 -300 kW	Πειραματικό μοντέλο του 1997	100%	Χαβή για παροχή ηλεκτρικής ενέργειας 1,2MW (12 συσκευές)	Κινείται με την ροή των κυμάτων χωρίς να αντιστέκεται σε αυτά
Pelamis	Σκωτία	Υ	Βόρεια Πορτογαλία και στο EMEC του Orkney	5 με 10	50 - 100	750 kW	Μοντέλο πλήρους κλίμακας για εμπορική εκμετάλλευση του (πρώτη υλοποίηση το 2003).	100%	Επέκταση εγκατάστασης με Pelamis 2 στη Βόρεια Πορτογ.(με επιπλέον 20MW) και στο EMEC, Orkney (3MW) και εγκατάσταση στο Wave Hub, Cornwall (μέχρι 5MW)	Ικανότητα επιβίωσης, είναι ανθεκτικά συνδεδεμένς υδροστατικά και άτρωτο υδροδυναμικά
DEXA	Δανία, Αγγλία	Υ	Northsea, Hanstholm, Δανία και Marsascala, Μάλτα	16	-	2 MW	Τον Μάρτιο του 2011 εγκαταστάθηκε μετατροπέας στην πόλη Marsascala, Μάλτα.	1:10	Η δοκιμαστική περίοδος εκτείνεται μέχρι το τέλος του 2012.	Είναι προσδεμένο στον βυθό και μπορεί να λειτουργεί αδιάλειπτα για ως και 10 μέτρα παλίρροιας
Crestwing	Δανία	Υ	-	-	-	-	Πειραματικό μοντέλο πολύ μικρής κλίμακας.	<<	Προβλέπονται δοκιμές και επίδειξη της τεχνολογίας, εφόσον βρεθεί η αναγκαία χρηματοδότηση.	Η εκμετάλλευση της ατμοσφαιρικής πίεσης και η ικανότητα να διατηρείται σταθερό στα επερχόμενα κύματα.
Floating Wave Generator	-	Υ	-	-	-	250 kW	Πειραματικό μοντέλο πολύ μικρής κλίμακας.	100%	Περαιτέρω ανάπτυξη εφόσον βρεθεί χρηματοδότης	
McCabe Wave Pump	Σκωτία	Υ	Ιρλανδία	-	-	400 kW	Δοκιμαστικό πρωτότυπο μοντέλο του 1996	100%	-	
Sea Clam	Αγγλία	Υ	Λόχ Νες της Σκωτίας	-	-	25 MW	Το 1984 που διέθετε 12 αεροθαλάμους, στην λίμνη Λοχ Νες.	-	-	
2) ΣΗΜΕΙΑΚΟΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΗΣ										
LabBuoy	Ελλάδα, Δανία, Αγγλία	Ε	Δεξαμενή δημιουργίας τεχνητών κυμάτων ΕΜΠ	0	< 5	-	Δοκιμαστική εγκατάσταση 5 μετατροπέων στη σειρά.	1:15	Προβλεπόμενη εγκατάσταση πολλών μετατροπέων (όχι εξασφαλισμένη).	
SDE	Ισραήλ	Ε	Ισραήλ	0	-	40 kW	Δοκιμαστικό πρωτότυπο	100%	Προβλεπόμενη συνολική παραγωγή 50Μwκαι 200MW στη Σρι Λάνκα	

WET EnGen	Καναδά	Π	Καναδάς	-	-	20 kW	Δοκιμαστικό πρωτότυπο	<	Εγκατάσταση μοντέλου επίδειξης των 40kW το 2008 και μετά κατασκευή και εγκατάσταση μοντέλων πλήρους κλίμακας.	Είναι το Smart Float που κινείται κατά μήκος ενός άκαμπτου άξονα που επιτρέπει στην συσκευή να περιστρέφεται ελεύθερα και να παράγει ηλεκτρική ενέργεια και κατά την ανύψωση και κατά την πτώση των κυμάτων.
CES	Η.Π.Α	Π	-	-	-	5.000 - 50.000 kW	Δοκιμαστικό μοντέλο της κύματο-αντλίας το 2002	1 :20	Στάσιμη λόγω έλλειψης επαρκούς χρηματοδότησης.	Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει και τις λειτουργίες της πλατφόρμας εκτός από τα να μεταφερθεί στην ακτή.
Trotman Unit	-	Π	-	-	30	5.000 kW για 2 ώρες ημερησίως	Έχουν κατασκευαστεί κάποιες δοκιμαστικές αντλίες.	100%	- Βρίσκεται σε πρώιμο σχεδιαστικό στάδιο.	Σε περίπτωση ακραίων συνθηκών είναι ασφαλές λόγω ότι ένα μεγάλο τμήμα του είναι βυθισμένο κάτω από την επιφάνεια και αντιδρά ως αυτό-απορροφητής.
AquaBuOY	Καναδά	Υ	Newport, Oregon	-	-	-	Δοκιμαστικό πρωτότυπο 2.0 του 2007	-	5 project στις Ηνωμένες Πολιτείες (1MW και 100MW), στην Πορτογαλία (100MW), στον Καναδά (5 MW), και στη Νότιο Αφρική (20MW).	Ο μετατροπέας αποτελείται από επιμέρους μονάδες και μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα μεγέθη.
PowerBuoy	Η.Π.Α	Υ	Orkney Isles της Σκωτίας (2009)	1,5 με 5	18 - 50	500 kW	Δοκιμαστικά μοντέλα PB-150 ισχύ 150kW	100%	Εγκαταστάθηκε στις 15 Απριλίου του 2011 μοντέλο το PB150	Ελεύθερη κλίμακα κατασκευής (>100MW)
Wave Star	Δανία	Υ	Nissum Breeding, Δανία	10 με 20	-	5,5 kW	Δοκιμαστικό πρωτότυπο του 2006	1:10	Κατασκευή μοντέλου των 500kW κλίμακας 1:2 για εγκατάσταση στη Βόρεια Θάλασσα και έτοιμη προς πώληση το 2012/2013.	Όταν τα κύματα ξεπεράσουν ένα ορισμένο ύψος, το μηχάνημα ανυψώνει αυτόματα όλα τα πλωτά σώματα έξω από την θάλασσα.
SyncWave	Καναδά	Υ	-	-	> 20	-	Πειραματικό μοντέλο για δοκιμή σε δεξαμενή.	<	Τροφοδότηση δικτύων μικρής κλίμακας (20 με 2.000kW) και μετά το 2011 στόχος για κατασκευή μεγαλύτερης κλίμακας.	Κλίμακα κατασκευής από πολύ μικρή έως πολύ μεγάλη και σταματάει την λειτουργία σε περίπτωση ακραίων φαινομένων.
FO³	Νορβ. Αγγλία Σουηδία Ολλανδία Βέλγιο	Υ	Brevik, Νορβηγία	-	-	2.500 kW	Δοκιμαστική πλατφόρμα του 2005.	1:3	Ανάπτυξη της επόμενης γενιάς.	Λόγω του υλικού κατασκευής (φάμπερκλας) διατηρεί το κόστος σε χαμηλά επίπεδα.

FWEPS	Πορτογ. Ρωσία	Y	-	-	-	< 50 kW	Πειραματικά μοντέλα μικρής κλίμακας για δοκιμή σε δεξαμενή	<	Ολοκλήρωση κατασκευής ενός πειραματικού πρωτοτύπου μικρής ισχύος ανοιχτής θαλάσσης, κατασκευή ενός μοντέλου πλήρους κλίμακας 10kW και προβλέπεται η εγκατάσταση "φάρμας" έως και 10MW.	Η ιδιότητα της ελεύθερης ταλάντωσης της συσκευής που ακολουθεί την κίνηση των κυμάτων, προσδίδει στην συσκευή την αποδοτικότερη μέθοδο PTO (Power Take-Off).
Brandl Generator	Γερμανία	Y	-	< 3	-	1.000 kW	Πειραματικά μοντέλα πολύ μικρής κλίμακας για δοκιμή ανοιχτής θαλάσσης.	<<	Πρώιμο στάδιο	Η συσκευή χρησιμοποιώντας μοντέρνα υψηλή τάση DC θα έχει απώλειες ενέργειας για σύνδεση στην ακτή κάτω από 10%.
WaveBlanket	-	Y	-	-	-	Ανάλογα την έκταση	0,0027 με 0,0068	-	Έχουν γίνει οικονομικές μελέτες για πιθανές εγκαταστάσεις στο Block Island (3,3MW), Hawaii (2.267MW) και North Carolina (12.393MW).	Είναι η καταλληλότερη λύση για τοποθεσίες με κύματα σχετικά χαμηλής ενέργειας (30kW)
Wave2water	Ελλάδα	Y	Λαύριο Αττικής.	-	-	-	Δοκιμαστική λειτουργία συσκευής στην περιοχή του Λαυρίου Αττικής.	100%	-	Όσο υψηλό κύμα και αν δημιουργηθεί, το μόνο που μπορεί να συμβεί στην συσκευή είναι απλώς η κάλυψη του πλωτήρα, χωρίς να υπάρχει κίνδυνος καταστροφής της.
Manchester Bobber	Αγγλία	Y	-	-	30-60	25-30 μονάδες με μέση ισχύ 0,20MW	Πειραματικό μοντέλο	1:10	Σχεδιασμός, κατασκευή και δοκιμές φυσικής κλίμακας μέχρι τέλους 2011	Μόνο το αδρανές πλωτό σώμα έργεται σε επαφή με το θαλασσινό νερό.
3) ΤΑΛΑΝΤΕΥΟΜΕΝΗ ΥΔΑΤΙΝΗ ΣΤΗΛΗ										
LIMPET	Αγγλία, Πορτογ.	E	Νήσος Islay, Σκωτία	0	6	500 kW	Εγκατάσταση συνδεδεμένη στο δίκτυο από το 2000	100%	Κατασκευή απλούστερου και οικονομικότερου μοντέλου	
Daedalus WECA	Ελλάδα	E	-	0	-	20 kW	Πειραματικό μοντέλο	<	-	
SARA MWEC	Η.Π.Α.	Π	-	-	-	100 kW	Δοκιμαστικό πρωτότυπο	<	Κατασκευή δοκιμαστικού μοντέλου ανοιχτής θαλάσσης	Δεν έχει γρανάζια, μοχλούς, στρόβιλους, μάντες κίνησης κ.λ.π..
Oceanlinx	Αυστραλ.	Y	Port Kembla, Αυστραλία	-	-	450 kW	Δοκιμαστικό πρωτότυπο	0,1 - 1,5MW	6 project στην Αυστραλία (450kW και 27MW), στο Ηνωμένο Βασίλειο (5 MW), στις Ηνωμένες Πολιτείες (20MW και 2,7MW) και στην Αφρική (15MW).	Ο στρόβιλος Dennis-Auld με με πρωτοποριακό χαρακτηριστικό το σύστημα ελέγχου της κλίσης του πτερυγίου που τους επιτρέπει να περιστρέφεται προς την ίδια κατεύθυνση ανεξάρτητα από την

										κατεύθυνση ροής του αέρα.
Sperboy	Αγγλία	Y	Plymouth Sound, Αγγλία	> 50	450	0,067 με 0,187 kW	Δοκιμαστικό πρωτότυπο	1:5	Προβλεπόμενη εγκατάσταση "φάρμας κυμάτων" με 750 περίπου συσκευές	
WaveMaster	Αγγλία	Y	-	-	50	-	Δοκιμαστικό πρωτότυπο	~ 1:10	Κατασκευή μοντέλου εμπορικής κλίμακας 200 μέτρων και εξόδου 50MW.	Επειδή λειτουργεί κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας είναι προστατευμένος από μεγάλα κύματα.
MAWEC	Δανία	Y	-	-	-	-	Δοκιμαστικό πρωτότυπο του 2005	1:40	Δοκιμή του μοντέλου 1:40 στην ανοιχτή θάλασσα.	Μικρό βάρος, απλή κατασκευή & λειτουργία.
Mighty Whale	Ιαπωνία	Y	Ιαπωνία	-	40	110 kW	Δοκιμαστικό πρωτότυπο του 1998	100%	-	
4) ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΚΥΜΑΤΙΚΗΣ ΠΑΛΙΝΑΡΟΜΗΣΗΣ										
Oyster	Σκωτία	Π	-	-	10 - 12	300 - 600 kW	Πειραματικό μοντέλο πολύ μικρής κλίμακας.	100%	Το 2012 και το 2013 πρόκειται να εγκατασταθούν δύο ακόμα επόμενης γενιάς συσκευές Oyster 800 στο Orkney, ενώ η εταιρία έχει θέσει ως στόχο την εγκατάσταση και λειτουργία συσκευής Oyster στα ύδατα της Ιρλανδίας (5MW) μέχρι το 2015.	Ότι αποφεύγει μεγάλα κυματικά φορτία κατά την διάρκεια καταιγίδα και ότι βρίσκεται κοντά στην ακτή.
bioWAVE	Αυστραλ.	Π	-	< 2	-	500 -2.000 kW	Δοκιμαστικό πρωτότυπο μικρής κλίμακας του 2007.	100%	Ανάπτυξη πρωτότυπων μοντέλων πλήρους κλίμακας (εξασφαλισμένη χρηματοδότηση).	Φιλική προς το περιβάλλον και οικονομικά αποδοτική.
WaveRoller	Φινλαν.	Π	EMEC, Orkney	-	7 - 15	13 kW	Δοκιμαστικό πρωτότυπο πλήρους κλίμακας του 2007	100%	Τον Ιανουάριο του 2012 στην Peniche, Πορτογαλία τοποθετήθηκε πιλοτική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε πλατφόρμες και η τελική εγκατάσταση του σταθμού θα πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια των προσεχών μηνών.	Η εξελιξιμότητα της τεχνολογίας, αφού δεν υπάρχει κάποιος συγκεκριμένος περιορισμός στο τελικό μέγεθος μιας εγκατάστασης
Poseidon's Organ	Δανία	Y	-	-	-	-	Δοκιμαστικό πρωτότυπο μικρής κλίμακας.	1:25	Κατασκευάζεται ένα πρωτότυπο κλίμακας 1:6 για εγκατάσταση στο Lolland της Δανίας και σχεδιάζεται ένα μοντέλο κλίμακας 1:2 των 30MW	Ο δυναμικός σχεδιασμός των πλωτών περυγίων, το αυτόματο σύστημα κλίσης και η δυνατότητα υβριδικών συστημάτων.

									συνολικά, με 3 ενσωματωμένες ανεμογεννήτριες.	
OWEL WEC	Αγγλία	Y	-	-	> 40	12.000 kW	0,036 με 0,054	100%	Κατασκευάζεται ένα πρωτότυπο κλίμακας 3 προς 4 (750kW) για εγκατάσταση στο EMEC του Orkney και σχεδιάζεται μια εμπορική πλατφόρμα πλήρους κλίμακας (12MW)	Η συσκευή παγιδεύει τον αέρα των διαδοχικών κοιλοτήτων των κυμάτων, τον συμπιέζει και τον αποθηκεύει σε ένα ρεζερβουάρ συμπιεσμένου αέρα.
C-Wave	Αγγλία	Y	-	5 με 20	-	-	-	100%	Προβλέπεται η εγκατάσταση ενός συστήματος πολλών MW σε βαθιά νερά.	Ο βαθμός απόδοσης της μετατροπής της ενέργειας των κυμάτων σε ηλεκτρική.
5) ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΗΣ ΠΙΕΣΗΣ										
AWS	Σκωτία	Y	Πορτογαλία	-	40 - 100	1.000 kW	Δοκιμαστικό πρωτότυπο του 2004	100%	Η κατασκευή ενός πλήρους συστήματος AWS-III ισχύος 2.5MW (2013) και το 2015 η κατασκευή συστήματος ισχύος 10MW (4 AWS III συσκευές)	Ικανότητα επιβίωσης και πυκνότητα ισχύος.
CETO	Αυστραλ.	Y	-	-	> 15	-	Δοκιμαστικό πρωτότυπο II του 2007	-	Κατασκευή του μοντέλου III και φάσμα επίδειξης 50MW μέχρι το 2012	Χρησιμοποιεί μεγάλο αριθμό ίδιων μονάδων.
OWEC	Η.Π.Α.	Y	-	-	-	-	Πειραματικά μοντέλα πολύ μικρής κλίμακας για δοκιμή σε δεξαμενή.	<<	Προβλέπεται η κατασκευή και εγκατάσταση μοντέλων διαφόρων μεγεθών σε διάφορες τοποθεσίες.	
6) ΥΠΕΡΧΕΙΑΙΣΗΣ										
TapChan	Νορβηγ.	E	Toftstallen, Νορβηγία	0	-	-	-	-	-	Δεν παράγει ρύπους, ελάχιστα κινούμενα μέρη και παροχή ενέργειας όταν αυτή ζητηθεί
SSG	Νορβηγ.	E	-	0	-	20.000 kW	-	100%	Η ανάπτυξη, η δοκιμή και η εγκατάσταση ενός πρωτότυπου πλήρους κλίμακας (συνεργασία με NTNU)	Μπορεί να είναι πλωτή υπράκτια εγκατάσταση ή ως σταθερή εγκατάσταση ακτής ενσωματωμένη σε κυματοθραύστη.
Wave Dragon	Δανία	Y	Nissum Brending, Δανία	-	6	20 kW	Δοκιμαστικό πρωτότυπο του 2003	1:4,5	Κατασκευή "φάρμας κυμάτων" (70MW) στη Κελτική Θάλασσα και ενός μοντέλου (7MW) στην Peninsula.	Συνδυάζει υπάρχουσα και ανεπτυγμένη τεχνολογία ανοιχτής θάλασσας και υδροστροβίλων και μπορεί να κατασκευαστεί σε οποιαδήποτε κλίμακα.
7) ΑΛΛΕΣ ΣΥΣΚΕΥΕΣ										
Anaconda	-	Y	Gosport,	-	-	1MW	Συσκευή δοκιμής			Όταν ολοκληρωθούν οι

			Hampshire				μήκους 9 μέτρα σε δεξαμενή		δοκιμές, στοχεύουν στην κατασκευή ενός μοντέλου κλίμακας 1:4 για πιθανές δοκιμές στη θάλασσα.	
--	--	--	-----------	--	--	--	----------------------------	--	---	--

<<: Πολύ μικρή

<: Μικρή

Υ: Υπεράκτια

Π: Παράκτια

Ε: Επάκτιο